ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)

ปริญญา

ปฐพีวิทยา
สาขา

ปฐพีวิทยา
ภาควิชา

เรื่อง การใช้แบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลศึกษาอิทธิพลความรุนแรงของฝนกรดจำลองต่อความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน

Uses of Empirical Models to Study the Effect of Simulated Acid Rain on Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Availabilities in Soil

นามผู้วิจัย นางสาวณัฏฐยา เรือนแป้น

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์กุมุท สังขศิลา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(อาจารย์วิสุทธิ์ วีรสาร, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(รองศาสตราจารย์ทศพล พรพรหม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, วท.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้แบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลศึกษาอิทธิพลความรุนแรงของฝนกรดจำลองต่อความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน

Uses of Models to Study the Effect of Simulated Acid Rain on Nitrogen, Phosphorus and Potassium Availabilities in Soil

โดย

นางสาวณัฏฐยา เรือนแป้น

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)
พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฏฐยา เรือนแป้น 2553: การใช้แบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลศึกษาอิทธิพลความรุนแรงของฝนกรดจำลองต่อความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์กุมุท สังขศิลา, Ph.D. 83 หน้า

ศึกษาผลของฝนกรดจำลองต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน โดยเขียนเป็นแบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลที่เน้นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสมดุลและการเปลี่ยนรูปมวลของธาตุอาหารพืชเหล่านี้ ใช้ความหนาแน่นรวมของดิน (ρ_b) ความชื้นดินโดยมวล (θ_m) ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) และพืชที่ปลูก (Pt) เป็นปัจจัยหลักในการกำหนดค่าความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร หาค่าคงที่ของแบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ล โดยใช้ข้อมูลงานทดลองที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับผลของฝนกรดจำลองระดับความรุนแรงต่างๆ ต่อความเป็นประโยชน์ธาตุอาหารพืชในชุดดินอยุธยา แบบจำลองความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนใช้ข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันของเวลาของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและอินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N) ในดิน ปริมาณแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และไนเตรทไอออน (NO_3^-) ในสารละลายดิน ส่วนการหาค่าคงที่ของแบบจำลองความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ใช้ข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันของเวลาของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ในดินตามลำดับ ค่าคงที่ที่ยอมรับได้ให้ค่าความคลาดเคลื่อนแบบ standardized bias (R) ที่น้อยกว่า 1.0 ผลการหาค่าคงที่ทำให้พบว่าถ้าฝนกรดจำลองมีความรุนแรงที่สูงขึ้นส่งผลให้ Org-N และ NH_4^+ มีสัดส่วนในดินที่สูง ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและค่า pH ของดินทำให้ความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในรูป NH_4^+ และ Org-N สูงขึ้น แต่จะลดความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของความรุนแรงฝนกรดและ ρ_b จะลดความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ และ Org-N ส่วนปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดและ θ_m จะลดความเป็นประโยชน์ของ NO_3^-และ Org-N ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดและปริมาณ OM และ Pt จะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ และ NO_3^-สำหรับผลต่อฟอสฟอรัสพบว่าปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของความรุนแรงฝนกรดและ pH หรือ θ_m จะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดกับ OM หรือ Pt จะลดความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน ส่วนผลต่อโพแทสเซียมพบว่าปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดและ pH หรือ θ_m หรือ OM จะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียม แต่ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดและ Pt จะลดความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน แบบจำลองและค่าคงที่เอ็มไพริเกิ้ลที่สร้างขึ้นในรายงานนี้มีความเจาะจงอย่างมากกับสถานการณ์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง ดังนั้นการนำค่าคงที่ของแบบจำลองที่หาได้ไปใช้จึงควรมีความเจาะจงในงานที่มีลักษณะที่คล้ายกับงานทดลอง แต่ถ้าเหตุการณ์มีความแตกต่างจากงานทดลองควรจะสอบเทียบหาค่าคงที่ของสมการเสียใหม่จึงจะมีความเหมาะสม

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Nathaya Ruanpan 2010: Uses of Empirical Models to Study the Effect of Simulated Acid Rain on Nitrogen, Phosphorus and Potassium Availabilities in Soil. Master of Science (Agriculture), Major Field: Soil Science, Department of Soil Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kumut Sangkhasila, Ph.D. 83 pages.

Uses of empirical models of effects of simulated acid rains on plant nutrients (nitrogen, phosphorus, and potassium) availability were presented in this thesis. The models consisted of processes involving of plant nutrients mass balances and transformations whose availabilities were controlled by the soil properties namely, soil bulk density (ρ_b), water content (θ_m), soil reaction (pH), content of organic matter (OM) and mass of growing plant (Pt). Values empirical constants of the models were evaluated by using published data related to the effects of simulated acid rains on the availability of N, P, K in Ayuthaya soil series. Time dependent data of total contents of soil nitrogen and organic nitrogen (Org-N) and of contents of ammonium ions (NH_4^+) and nitrate ions (NO_3^-) were used to calibrate N-availability model while time dependent data of available phosphate and soluble potassium contents were used to calibrate the P and K availability models, respectively. The acceptable model constants gave the standardized error and bias (R) with their values lesser than 1.0. Results of the finding constants showed that the higher degree of acid rain severity gave the higher contents of Org-N and NH_4^+. Interaction of severity degree of acid rain (SDAR) and pH raised the N availability, most in terms of Org-N and NH_4^+. It reduced the N-availability of NO_3^- form. Interaction of SDAR and ρ_b reduced N-availability of Org-N and NH_4^+ forms. Interaction of SDAR and θ_m reduced N-availability of Org-N and NO_3^- forms. Interactions of SDAR and either OM or Pt increased N-availability of NH_4^+ and NO_3^- forms. Empirical constants of available P model suggested that the interactions of SDAR and either pH or θ_m increased the P-availability in soil, while the interactions of SDAR and either OM or Pt decreased P-availability. The available K model suggested that the interactions of SDAR and either pH or θ_m or OM increased the availability of K, while interaction of SDAR and Pt decreased K availability. Model constants presented in this thesis were highly specific to conditions of obtained experimental data. Model constants should be re-calibrated for the different conditions and situations.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กุมุท สังขศิลา ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. วิสุทธิ์ วีรสาร และรองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล พรพรหม กรรมการที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยาที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาในด้านการเรียนการวิจัย และให้คำปรึกษาและคำแนะนำ เพื่อนำความรู้ที่ได้ศึกษาเล่าเรียนมา ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อสังคม และขอขอบคุณนางสาวจิตตานันท์ รังสิมันตุชาติ ที่อนุญาตให้ใช้ข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำลังใจ และส่งเสริมด้านศึกษามาโดยตลอด ขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. กุมุท สังขศิลา ที่สนับสนุนทุนการศึกษามาโดยตลอด พร้อมทั้งอบรมสั่งสอนการงานต่างๆ ศิลปะการดำเนินชีวิต และอีกหลายสิ่งหลายอย่างที่อาจารย์อบรมสั่งสอนให้ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาปฐพีวิทยา ครอบครัวเรือนแป้น และครอบครัวกลิ่นแก้วทุกคนที่เป็นกำลังใจในการเรียน การทำวิทยานิพนธ์ และคอยช่วยเหลือจนถึงทุกวันนี้ ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านด้วยใจจริง

ณัฏฐยา เรือนแป้น

กุมภาพันธ์ 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	75
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	77
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	83

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุและไนโตรเจนในดินของประเทศไทย	3
2	รูปของสารประกอบไนโตรเจนที่พบในดิน	4
3	ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าคงที่ K_1, K_2,..., K_{16} ของแบบจำลองไนโตรเจนในระดับ pH ฝนต่างๆ	49
4	ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าคงที่ K_{17}, K_{18},..., K_{20} ของแบบจำลองฟอสฟอรัสในระดับ pH ฝนต่างๆ	51
5	ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าคงที่ K_{21}, K_{22},..., K_{24} ของแบบจำลองโพแทสเซียมในระดับ pH ฝนต่างๆ	52
6	ค่าคงที่ในแบบจำลองไนโตรเจนที่ระดับ pH ของฝนกรดจำลองต่างๆ	53
7	ค่า standardized bias (R) ในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลองของไนโตรเจนรูปต่างๆ	55
8	ค่าคงที่ในแบบจำลองฟอสฟอรัสที่ระดับ pH ของฝนกรดจำลองต่างๆ	55
9	ค่า standardized bias (R) ในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลองของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	56
10	ค่าคงที่ในแบบจำลองโพแทสเซียมที่ระดับ pH ของฝนกรดจำลองต่างๆ	57
11	ค่า standardized bias (R) ในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลองของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	57

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการได้มา เปลี่ยนแปลง และสูญเสียมวลของไนโตรเจนในดิน	9
2	กระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการได้มา เปลี่ยนแปลง และสูญเสียมวลของฟอสฟอรัสในดิน	12
3	ไดอะแกรมแสดงกลไกการปลดปล่อยและตรึงโพแทสเซียมของ primary micas, fine-grained mica (illite clay) และ vermiculite	14
4	กระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการได้มา เปลี่ยนแปลง และสูญเสียมวลของโพแทสเซียมในดิน	16
5	แสดงสัดส่วนของ H_3PO_4 และฟอสเฟตไอออน 3 ชนิดในสารละลาย (ก.) และการตรึงฟอสเฟตในดิน (ข.) ที่ระดับ pH ต่างๆ	18
6	แบบจำลองความคิดรวบยอดแสดงกลไกการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในดิน ค่า K และ KK แทนค่าคงที่ ตัวห้อย e, s, p, i และ g เป็นตัวย่อของ exchangeable, solution, plant, immobilized และ gaseous phases	22
7	แบบจำลองความคิดรวบยอดแสดงการสูญเสียและการได้รับของไนโตรเจน	24
8	แบบจำลองความคิดรวบยอดแสดงแหล่งที่มาและการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในแบบจำลอง EPIC	25
9	ลักษณะการเคลื่อนย้ายโพแทสเซียมในดิน	32
10	แสดงอิทธิพลระหว่างระดับ pH ของดินต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช	37
11	ช่วงเวลาการปฏิบัติงานของการศึกษาอิทธิพลของฝนกรดจำลองที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟตในชุดดินอยุธยาที่ปลูกกระเจี๊ยบเขียวเป็นพืชทดสอบ	45
12	เปรียบเทียบปริมาณ Total N และ Org-N ในดิน NH_4^+ และ NO_3^- ในสารละลายดินที่คำนวณได้กับปริมาณที่วัดได้จริง ณ เวลาต่าง ในการทดลองให้ฝนจำลองอนุมูลซัลเฟต	54
13	เปรียบเทียบปริมาณ Avai. P ในดินที่คำนวณได้กับปริมาณที่วัดได้จริง ณ เวลาต่าง ในการทดลองให้ฝนจำลองอนุมูลซัลเฟต	56

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	เปรียบเทียบปริมาณ Exch. K ในดินที่คำนวณได้กับปริมาณที่วัดได้จริง ณ เวลาต่างในการทดลองให้ฝนจำลองอนุมูลซัลเฟต	58
15	ค่าของ K_1, K_2, K_3 และ K_4 ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต	65
16	ค่าของ K_5, K_6, K_7 และ K_8 ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต	66
17	ค่าของ K_9, K_{10}, K_{11} และ K_{12} ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต	67
18	ค่าของ K_{13}, K_{14}, K_{15} และ K_{16} ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต	68
19	ค่าของ K_{17}, K_{18}, K_{19} และ K_{20} ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต	73
20	ค่าของ K_{21}, K_{22}, K_{23} และ K_{24} ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต	74

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

N	=	ธาตุไนโตรเจน
P	=	ธาตุฟอสฟอรัส
K	=	ธาตุโพแทสเซียม
Total N	=	ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน
NH_4^+	=	แอมโมเนียม
NO_3^-	=	ไนเตรต
Org-N	=	อินทรีย์ไนโตรเจน
Avai. P	=	ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์
Exch. K	=	โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้
$\frac{\partial}{\partial t} N_{Total}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล N ทั้งหมด มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจนต่อเวลา (g-N day^{-1})
$\frac{\partial}{\partial t} N_{NH_{4(S)}^+}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล N ของ NH_4^+ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจนต่อเวลา (g-N day^{-1}) ตัวห้อย (S) ระบุว่าอยู่ในสารละลายดิน
$\frac{\partial}{\partial t} N_{NO_{3(S)}^-}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล N ของ NO_3^- ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจนต่อเวลา (g-N day^{-1}) ตัวห้อย (S) ระบุว่าอยู่ในสารละลายดิน
$\frac{\partial}{\partial t} N_{Org-N}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลอินทรีย์ไนโตรเจนในดินทั้งหมด มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจนต่อเวลา (g-N day^{-1})
$\frac{\partial}{\partial t} P_{Avai}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ มีหน่วยเป็นมวลฟอสฟอรัสต่อเวลา (g-P day^{-1})
$\frac{\partial}{\partial t} K_{Exch}$	=	อัตราการการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีหน่วยเป็นมวลโพแทสเซียมต่อเวลา (g-K day^{-1})
N_{Total}^t	=	ปริมาณมวล N ทั้งหมดในดินที่เวลา t มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจน (g-N)
N_{Total}^{t-1}	=	ปริมาณมวล N ทั้งหมดในดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจน (g-N)
$N_{NH_{4(S)}^+}^t$	=	ปริมาณมวล N ของ NH_4^+ ในสารละลายดินที่เวลา t มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจน (g-N)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$N_{NH_{4(S)}^{+}}^{t-1}$ = ปริมาณมวล N ของ NH_4^+ ในสารละลายดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจน (g-N)

$N_{NO_{3(S)}^{-}}^{t}$ = ปริมาณมวล N ของ NO_3^- ในสารละลายดินที่เวลา t มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจน (g-N)

$N_{NO_{3(S)}^{-}}^{t-1}$ = ปริมาณมวล N ของ NO_3^- ในสารละลายดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจน (g-N)

$N_{Org.N}^{t}$ = ปริมาณมวล N ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดินที่เวลา t มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจน (g-N)

$N_{Org.N}^{t-1}$ = ปริมาณมวล N ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจน (g-N)

P_{Avai}^{t} = ปริมาณมวล P ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ในดินที่เวลา t มีหน่วยเป็นมวลฟอสฟอรัส (g-P)

P_{Avai}^{t-1} = ปริมาณมวล P ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ในดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นมวลฟอสฟอรัส (g-P)

K_{Exch}^{t} = ปริมาณมวล K ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่เวลา t มีหน่วยเป็นมวลโพแทสเซียม (g-K)

K_{Exch}^{t-1} = ปริมาณมวล K ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นมวลโพแทสเซียม (g-K)

pH^{t-1} = ค่าปฏิกิริยาดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 ไม่มีหน่วย

ρ_b^{t-1} = ค่าความหนาแน่นรวมของดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นเมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($Mg\ m^{-3}$)

θ_m^{t-1} = ปริมาณความชื้นโดยมวลของดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 ไม่มีหน่วย

OM^{t-1} = ปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$plant^{t-1}$ = มวลแห้งของพืชที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็นกรัม (g)

Δt = ผลต่างของเวลา t และ t-1

K_1 = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของปริมาณมวล NH_4^+ ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ตามลำดับ ไม่มีหน่วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

K_2 = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของปริมาณมวล NO_3^- ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ตามลำดับ ไม่มีหน่วย

K_3 = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของปริมาณมวล Org-N ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ตามลำดับ ไม่มีหน่วย

K_4 = อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนรูปอื่นๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนทั้งหมดในดิน เช่น สารประกอบเชิงซ้อนที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น กำหนดให้เป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจนต่อเวลา (g-N day^{-1})

K_5 = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NH_{4(S)}^+}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_6 = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ ρ_b ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NH_{4(S)}^+}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น (Mg m^{-3} $day)^{-1}$

K_7 = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ OM ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NH_{4(S)}^+}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น (% $day)^{-1}$

K_8 = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของมวลแห้งของพืชต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NH_{4(S)}^+}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น (g $day)^{-1}$

K_9 = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NO_{3(S)}^-}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_{10} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ θ_m ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NO_{3(S)}^-}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_{11} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ OM ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NO_{3(S)}^-}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น (% $day)^{-1}$

K_{12} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของมวลแห้งของพืชต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NO_{3(S)}^-}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น (g $day)^{-1}$

K_{13} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{Org.N}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

K_{14} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ θ_m ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{Org.N}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_{15} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ ρ_b ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{Org.N}$ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น $(Mg\ m^{-3}\ day)^{-1}$

K_{16} = ค่าคงที่กำหนดขนาดของอิทธิพลปัจจัยทางดินอื่นๆ เช่นอุณหภูมิดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_{17} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลง P_{Avai} ในดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_{18} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ θ_m ต่อการเปลี่ยนแปลง P_{Avai} ในดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_{19} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ OM ต่อการเปลี่ยนแปลง P_{Avai} ในดิน มีหน่วยเป็น $(\%\ day)^{-1}$

K_{20} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของมวลแห้งของพืชต่อการเปลี่ยนแปลง P_{Avai} ในดิน มีหน่วยเป็น $(g\ day)^{-1}$

K_{21} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลง K_{Exch} ในดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_{22} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ θ_m ต่อการเปลี่ยนแปลง K_{Exch} ในดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}

K_{23} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของ OM ต่อการเปลี่ยนแปลง K_{Exch} ในดิน มีหน่วยเป็น $(\%\ day)^{-1}$

K_{24} = ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของมวลแห้งของพืชต่อการเปลี่ยนแปลง K_{Exch} ในดิน มีหน่วยเป็น $(g\ day)^{-1}$

R = ค่า standardized bias

O_i = ค่าที่ได้จากของมูลจริง

S_i = ค่าคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การใช้แบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลเพื่อศึกษาอิทธิพลความรุนแรงของฝนกรดจำลองต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน

Uses of Empirical Models the Effect of Simulated Acid Rain on Nitrogen, Phosphorus and Potassium Availabilities in Soil

คำนำ

ฝนกรด (Acid rain) หมายถึง น้ำฝนที่มี pH ต่ำกว่า 5.6 ซึ่งชะล้างก๊าซในบรรยากาศ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) เกิดเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนทริก (HNO_3) และตกลงมาเกิดเป็นฝนกรด (ฐนันดร์ศักดิ์, 2534; Environmental Resources Limited, 1983; Simachaya, 1993) มักเกิดบริเวณรอบๆ แหล่งอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยก๊าซอนุมูลซัลเฟตและไนเทรต ฝนกรดมีผลทำให้ศักยภาพของดินในพื้นที่การเกษตรและป่าไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น เนื่องจากฝนกรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดินบางประการ อาทิเช่น ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ความหนาแน่นรวมของดิน (ρ_b) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) และปริมาณความชื้นดิน (θ_m) (David and Bela, 2000; Robert *et al*., 2001) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติดินต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินด้วย โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K)

แบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลที่มีรูปสมการเป็นฟังก์ชันของเวลาสามารถนำมาอธิบายการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในกระบวนการต่างๆ ได้ (Dutt *et al*., 1972; Mehran and Tanji, 1974) ดังนั้นหากใช้แบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลมาอธิบายความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน โดยใช้สมบัติดินเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดค่าความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารนั้นๆ อาจจะทำให้ทราบว่าสมบัติดินมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในลักษณะใดได้ชัดเจนมากขึ้น ด้วยเหตุนี้การใช้แบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลศึกษาอิทธิพลของฝนกรดจำลองต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน มีความคาดหวังว่าแบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายความเป็นประโยชน์และการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารในดินได้ และปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของความรุนแรงฝนกรดจำลองและค่าสมบัติดินต่างๆ จะเพิ่มหรือลดความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประเมินและหาแนวโน้มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินหรือความเสียหายที่จะเกิดขึ้นเมื่อได้รับฝนกรดในระดับที่แตกต่างกันในอนาคต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเมื่อได้รับความรุนแรงของฝนกรดที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ด้วยแบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ล

2. ศึกษาปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของความรุนแรงฝนกรดจำลองและค่าสมบัติดินต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม (NH_4^+) ไนเทรต (NO_3^-) และอินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N) ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (Avai. P) และโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exch. K) เมื่อได้รับความรุนแรงของฝนกรดที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ด้วยแบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. ไนโตรเจนในดิน

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่พืชต้องการปริมาณมากและสะสมในเนื้อเยื่อที่แห้งของพืชในความเข้มข้นสูงกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (พืชแห้ง) เป็นธาตุที่มีบทบาทในการเจริญเติบโตของพืช ช่วยให้พืชสร้างโปรตีนได้อย่างเพียงพอ โปรตีนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโพรโทพลาซึม (protoplasm) และไนโตรเจนยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกรดอะมิโน เอนไซม์ต่างๆ นิวคลีโอโปรตีน (nucleoprotein) และคลอโรฟิลล์ ในวิตามินและ adenosine triphosphate (ATP) ต่างก็มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548; ยงยุทธ, 2546)

เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนของดินในประเทศไทยอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าไนโตรเจนบางส่วนจะได้มาจากการสลายตัวของอินทรียวัตถุ (มีไนโตรเจนประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์) แต่ปริมาณของอินทรียวัตถุที่มีในดินการเกษตรทั่วไปมีอยู่ในช่วง 1-3 เปอร์เซ็นต์ จึงมักจะให้ธาตุไนโตรเจนไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548; กรมพัฒนาที่ดิน, 2548ก, 2548ข)

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุและไนโตรเจนในดินของประเทศไทย

รายการวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์
อินทรียวัตถุ (%)	1.42
ไนโตรเจน (%N)	0.07

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2548ก, 2548ข)

1.1 สารประกอบของไนโตรเจนในดิน

พิจารณารูปของไนโตรเจนในดินในแง่ความเป็นประโยชน์ต่อพืช อาจจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ รูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที (relatively unavailable form) และรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที (readily available form) รูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที เช่น สารที่มีโมเลกุลใหญ่โครงสร้างของโมเลกุลสลับซับซ้อนและอะตอมของธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบก็เกาะกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แน่นละลายน้ำได้ยาก เช่น อินทรียวัตถุ เป็นต้น สำหรับรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที ได้แก่ สารประกอบที่อาจแตกตัวเป็นไอออนได้ง่ายซึ่งส่วนนี้อยู่ในสารละลายของดิน กับไอออนที่ดูดซับอยู่กับผิวของคอลลอยด์ดิน (adsorbed ions) หรือไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable ions) เช่น แอมโมเนียม (NH_4^+) ไนเทรต (NO_3^-) และไนไตรต์ (NO_2^-) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548; Brady and Weil, 2004)

ตารางที่ 2 รูปของสารประกอบไนโตรเจนที่พบในดิน

กลุ่มที่ 1 สารที่มีองค์ประกอบซับซ้อน	กลุ่มที่ 2 สารประกอบอย่างง่ายๆ และเป็นประโยชน์ต่อพืช	
	สารประกอบ	ไอออนที่พืชใช้ได้
อินทรียสารที่มีโปรตีน กรดนิวคลีอิก	เกลือแอมโมเนียม	NH_4^+
กรดอะมิโนซูการ์และอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ	เกลือไนไตรต์	NO_2^-
	เกลือไนเตรต	NO_3^-

ที่มา: คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548)

1.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องต่อความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในดิน

1.2.1 แหล่งได้มาของมวลไนโตรเจนในดินนั้นมีอยู่ 4 แหล่งคือ การตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศโดยจุลินทรีย์ที่มีภาวะอยู่รวมกันกับพืชบางชนิด การตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศโดยพวกจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดิน ได้จากน้ำฝน และการย่อยสลายอินทรียวัตถุและใส่ปุ๋ยให้แก่ดินและพืช

ก. การตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศโดยจุลินทรีย์ที่มีภาวะอยู่รวมกันกับพืชบางชนิด (symbiotic nitrogen fixation) เช่น การตรึงแก๊สไนโตรเจนของไรโซเบียม (Rhizobium) ที่อาศัยอยู่ที่ปมของรากพืชตระกูลถั่ว และ Actinomycete (*Frankia sp.*) กับพืชอื่นที่ไม่ใช่พืชตระกูลถั่ว จุลินทรีย์พวกนี้ตรึงแก๊สไนโตรเจน (N_2) จากอากาศมาใช้และแบ่งไนโตรเจนที่ตรึงได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ให้แก่พืช แต่ก็ได้รับอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตจากพืชด้วยเช่นกัน (ยงยุทธ, 2546)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข. การตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศโดยพวกจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดิน (non-symbiotic nitrogen fixation) ได้แก่ แบคทีเรียพวก Azotobacter, Clostridium และพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) เช่น Anabaena, Calothrix และ Nostoc เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนที่ตรึงได้จากอากาศนั้นประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ จะได้จากการตรึงไนโตรเจนโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยที่ได้มาจากจุลินทรีย์ที่มีภาวะอยู่รวมกันกับพืชและพวกที่มิได้อยู่ร่วมกับพืช คิดเป็น 70 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนอีกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ได้จากน้ำฝน การเกิดฟ้าแลบนั้นเอง จุลินทรีย์พวกนี้สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ไม่ต่ำกว่า 7.3-8.2 กิโลกรัมต่อปี (ยงยุทธ, 2546)

ค. ได้จากน้ำฝน (rain) การเกิดฟ้าแลบ (lightning) แก๊สไนโตรเจน (N_2) ในอากาศจะถูกออกซิไดส์ ให้กลายเป็นไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งจะละลายในน้ำฝนตกลงมายังผิวดิน มีผู้คำนวณว่าปีหนึ่งๆ ไนโตรเจนในดินที่มาจากกระบวนการนี้มีปริมาณ 0.8 กิโลกรัมต่อปีในรูปของ NH_4^+ และ 0.3 กิโลกรัมต่อปีในรูปของ NO_3^-

ง. การใส่ปุ๋ยให้แก่ดินและพืช ปุ๋ยเคมีซึ่งเป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นจาก N_2 ในอากาศถือว่าเป็นแหล่งที่สำคัญแหล่งหนึ่งที่เพิ่มไนโตรเจนให้แก่ดิน และนอกจากนี้ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด และปุ๋ยอินทรีย์ไนโตรเจนอื่นๆ ก็ถือว่าเป็นแหล่งไนโตรเจนในดินที่สำคัญเช่นเดียวกัน

1.2.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแปรสภาพของมวลไนโตรเจนในดิน ไนโตรเจนในดินจากแหล่งต่างๆ ดังกล่าวไปแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปหรือแปรสภาพอยู่ตลอดเวลา การแปรสภาพของไนโตรเจนในดินส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางชีววิทยา (biological process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องมีเอนไซม์หรือจุลินทรีย์ดินเข้ามาเกี่ยวข้องจึงจะเกิดขึ้นได้ กระบวนการแปรสภาพของไนโตรเจนมีดังนี้

ก. อะมิไนเซชัน (aminization) กระบวนการนี้เป็นการย่อยสลายสารประกอบโปรตีนไปเป็นสารประกอบอะมีน (amine) และกรดอะมิโน (amino acid) ต่างๆ โดยจุลินทรีย์พวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotroph) กระบวนการนี้อาจเขียนเป็นไดอะแกรมแสดงได้ง่ายๆ ดังนี้

$$\text{Proteins} \xrightarrow{Enzyme} R-NH_2 + CO_2 + energy + other\ \ products \qquad (1)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารประกอบอะมีน และกรดอะมิโน ($R-NH_2$) ที่เกิดขึ้น บางส่วนจะถูกแปรสภาพกลายเป็นสารประกอบไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียโดยกระบวนแอมโมนิฟิเคชัน (ammonification)

ข. แอมโมนิฟิเคชัน (ammonification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารประกอบพวกอะมีน หรือกรดอะมิโน ($R\text{-}NH_2$) ให้เป็น NH_3, แอลกอฮอล์ (R-OH) และพลังงาน (energy) ดังสมการ (2.1) และ (2.2)

$$R-NH_2 + \xrightarrow{Enzyme} R-OH + NH_3 + energy \tag{2.1}$$

$$2NH_3 + H^+ + HCO_3^- \longrightarrow (NH_4)_2CO_3 \leftrightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \tag{2.2}$$

กระบวนการนี้จะดำเนินไปด้วยดีในสภาพที่ดินมีการถ่ายเทอากาศดี มีแคตไอออนที่เป็นด่าง (basic cation) เพียงพอ สำหรับ NH_4^+ ที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนแปลงต่อไปอีก 4 ทางคือ 1) จุลินทรีย์ในดินนำไปใช้ 2) พืชนำไปใช้ 3) ถูกตรึงอยู่ระหว่างผลึก (crystal lattice) ของอนุภาคแร่ดินเหนียว (clay mineral) และ 4) ถูกออกซิไดส์เป็น NO_2^- และ NO_3^- โดยกระบวนการไนทริฟิเคชัน (nitrification)

ค. ไนทริฟิเคชัน (nitrification) เป็นกระบวนการ enzymatic oxidation ซึ่งเกิดขึ้นได้โดย *nitrifying bacteria* ในดิน ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดที่ต้องการแก๊สออกซิเจน (O_2) กระบวนการนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันสองขั้น กล่าวคือ NH_4^+ จะถูกออกซิไดส์ให้เป็น NO_2^- ก่อนโดยแบคทีเรียพวก *Nitrosomonas* และ *Nitrosococcus* ดังต่อไปนี้

$$2NH_4^+ + 3O_2 \xrightarrow{Enzyme} 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+ + energy \tag{3}$$

ต่อมา NO^-_2 จะถูกออกซิไดส์ให้เป็น NO^-_3 โดยแบคทีเรียพวก *Nitrobacter* ดังต่อไปนี้

$$2NO_2^- + O_2 \xrightarrow{Enzyme} 2NO_3^- + energy \tag{4}$$

NO_3^- ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้จะเปลี่ยนแปลงต่อไปได้ 4 ทางคือ 1) จุลินทรีย์ที่อาศัยในดินนำไปใช้ 2) พืชนำไปใช้ 3) สูญหายไปจากดินโดยการชะละลาย (leaching) และ 4) สูญหายไปจากดินในรูปของแก๊ส (volatilization)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2.3 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียมวลไนโตรเจนในดินมีหลายทาง ได้แก่ พืชและจุลินทรีย์ในดินนำไปใช้ การชะละลาย และการสูญเสียในรูปของแก๊ส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. พืชและจุลินทรีย์ในดินนำไปใช้ เป็นการสูญเสียไนโตรเจนแบบชั่วคราวและจะกลับคืนสู่ดินเมื่อพืชและจุลินทรีย์นั้นตายและเน่าเปื่อยลง แต่ถ้ามีการขนย้ายผลิตผลออกไปก็หมายถึงว่าเป็นการสูญเสียไนโตรเจนจากดินนั้นอย่างถาวร

ข. การชะละลาย (leaching) น้ำฝนหรือน้ำชลประทานที่ซึมผ่านชั้นดินจนเลยเขตรากพืชแล้วจะเกิดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของไนไตรต์ (NO_2^-) และไนเทรต (NO_3^-) ได้

ค. การสูญเสียในรูปของแก๊ส (volatilization) จะเกิดขึ้นเมื่อดินอยู่ในสภาพที่มีการถ่ายเทอากาศไม่ดี กระบวนการรีดักชันในดินจึงเกิดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ NO_2^- และ NO_3^- เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแก๊สได้ เช่น กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (denitrification) จุลินทรีย์พวก *Pseudomonas* และ *Thiobacillus denitrificans* จะรีดิวซ์ NO_2^- หรือ NO_3^- ในดินให้กลายเป็นแก๊สรูปต่างๆ (N_2, N_2O, NO) และสูญเสียออกไปจากดิน ตามขั้นตอนดังนี้

$$2H^+ + 2NO_3^- \xrightarrow{-O^*} 2H^+ + 2NO_2^- \xrightarrow{-O^*} \underset{hyponitrite}{H_2N_2O_2} \begin{cases} \xrightarrow{+H^{**}} N_{2(gas)} + 2H_2O \\ \longrightarrow \underset{nitrousoxide(gas)}{N_2O} + H_2O \\ \longrightarrow \underset{nitricoxide(gas)}{2NO} + H_2O \end{cases} \quad (5)$$

หมายเหตุ * -O คือ มีการสูญเสียออกซิเจนไปสองอะตอม

** +H คือ มีการรับไฮโดรเจนเข้ามาสองอะตอม

หากในดินมีสารประกอบพวกเกลือของแอมโมเนียม สารประกอบพวกอะมีน เช่น ยูเรียหรือสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรตอยู่ด้วยปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิดขึ้นได้ดังสมการต่อไปนี้

$$2HNO_2 + \underset{(Urea)}{CO(NH_4)_2} \longrightarrow H^+ + HCO_3^- + 2H_2O + 2N_2 \quad (6)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

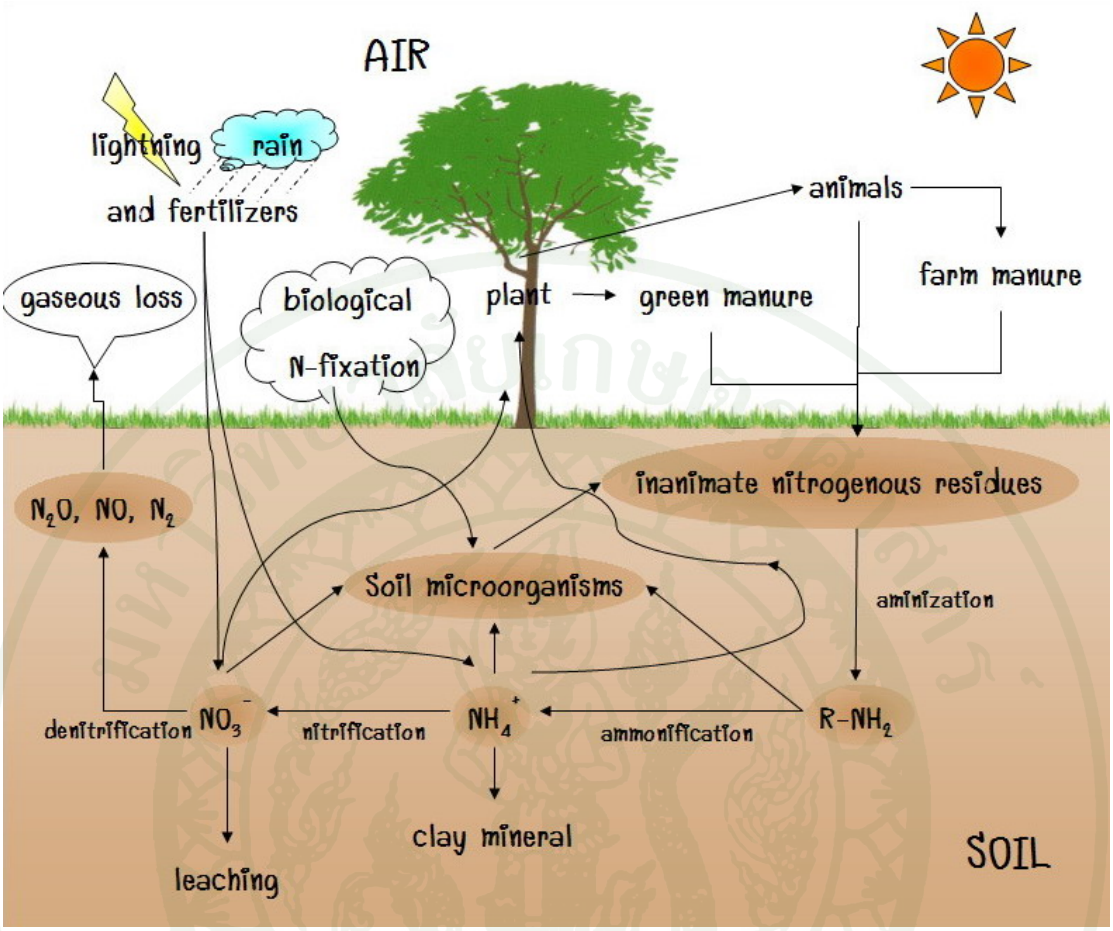
นอกจากนี้ NO^-_2 อาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแก๊สได้เมื่อมี transition metal เช่น Fe^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+} และอื่นๆ อยู่ในดินนั้น และกระบวนนี้เกิดขึ้นได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\underset{transition\ \ metal}{M^{2+}} + NO_2^- + 2H^+ \longrightarrow M^{2+} + NO + H_2O \qquad (7)$$

การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนลงไปสะสมในดินครั้งละมากๆ อาจเกิดการสูญเสียไนโตรเจนไปโดยเปล่าประโยชน์ในรูปของแก๊ส ดังนั้นควรใส่ปุ๋ยครั้งละน้อยๆ แต่บ่อยครั้ง และปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของดินให้โปร่งและร่วนซุยอยู่เสมอ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ในภาพที่ 1 เป็นวัฏจักรไนโตรเจน ซึ่งทำให้เห็นได้ชัดขึ้นว่ากระบวนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูป การได้มา และการสูญเสียไนโตรเจนมีความต่อเนื่องและสัมพันธ์กันอย่างไร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการได้มา เปลี่ยนแปลง และสูญเสียมวลของไนโตรเจนในดิน

ที่มา: ดัดแปลงมาจากคณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548); Brady and Weil (2004)

2. ฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการปริมาณมากและสะสมในเนื้อเยื่อแห้งของพืชในความเข้มข้นสูงกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความเกี่ยวข้องกับการสร้างเสริมการเติบโต ความแข็งแรงของพืช การออกดอกออกผล การแบ่งเซลล์ การสืบพันธุ์ การถ่ายทอดพลังงาน และการขนย้ายสารของพืช แต่ในดินมีฟอสฟอรัสต่ำมากเฉลี่ยประมาณ 0.06 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนเป็น 0.14 เปอร์เซ็นต์ และของโพแทสเซียมเป็น 0.83 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัสจึงไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช ดินบนของดินนาในประเทศไทยมีฟอสฟอรัสเฉลี่ย 0.02

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เปอร์เซ็นต์ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548ก, 2548ข) ต่ำกว่าดินบนของดินนาของประเทศอื่นๆ ทั้งสิ้น (พม่า 0.082, มาเลเซีย 0.040, ฟิลิปปินส์ 0.059 และญี่ปุ่น 0.080 เปอร์เซ็นต์)

2.1 สารประกอบของฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสเฟตในดินแบ่งออกได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ อินทรีย์ฟอสเฟต และอนินทรีย์ฟอสเฟต สารอินทรีย์ฟอสเฟตในดินประกอบด้วยสารหลายชนิด โดยเฉลี่ยแล้วพบว่ามี nucleic acid, phospholipids และ inositol hexaphosphate เป็น 2, 1 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 68 เปอร์เซ็นต์ ของอินทรีย์ฟอสเฟต ยังไม่สามารถจำแนกชนิดว่าเป็นสารประกอบใด

อนินทรีย์ฟอสเฟตในดินมีทั้งพวกที่เป็นไอออนฟอสเฟตในสารละลายดิน และเป็นสารประกอบหรือแร่ที่เป็นของแข็งอยู่ในดิน เช่น แร่ฟอสเฟตต่างๆ สารประกอบฟอสเฟตที่เกิดจากการใส่ปุ๋ยลงไปในดิน และฟอสเฟตที่ถูกดูดซับไว้ตามผิวของ hydrous oxide ของเหล็ก อะลูมินัม และแร่ดินเหนียว รูปของอนินทรีย์ฟอสเฟตที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ ส่วนใหญ่จะเป็น $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ส่วน PO_4^{3-} พืชอาจดูดกินได้แต่ไม่มีโอกาสเพราะมีอยู่น้อยมาก

2.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

2.2.1 การได้มาซึ่งมวลของฟอสฟอรัสในดินมีเพียงไม่กี่ทาง ได้แก่ การใส่ปุ๋ยทั้งปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยเคมีเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ดี เช่น $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$, $NH_4H_2PO_4$ และ $(NH_4)_2HPO_4$

2.2.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดิน ได้แก่ กระบวนการ mineralization เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์ฟอสเฟตในเศษซากพืชซากสัตว์ให้อยู่ในรูปของ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ในสารละลายดิน $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ในสารละลายดินบางส่วนก็จะเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอินทรีย์ฟอสเฟตได้เช่นกันเรียกว่ากระบวนการ immobilization

ในสภาวะที่เป็นดินด่างมักจะมีแคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$ และ $MgCO_3$) สะสมอยู่ และเกลือเหล่านี้จะแตกตัวให้ Ca^{2+}, Mg^{2+} มาก ฟอสเฟตไอออนจะทำปฏิกิริยาได้ดีและรวดเร็วกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในบางกรณีอาจทำปฏิกิริยากับเกลือ $CaCO_3$ หรือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$MgCO_3$ โดยตรง เกิดเป็นสารแคลเซียมหรือแมกนีเซียมฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก และพืชไม่อาจจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังสมการ

$$\underset{(soluble)}{3Ca^{2+} + 2H_2PO_4^-} \longleftrightarrow \underset{(insoluble)}{Ca_3(PO_4)_2} + 4H^+ \quad (8.1)$$

$$\underset{(soluble)}{3CaCO_3 + 2H_2PO_4^-} \longleftrightarrow \underset{(insoluble)}{Ca_3(PO_4)_2} + 3HCO_3^- + H^+ \quad (8.2)$$

$$\underset{(soluble)}{3Mg^{2+} + 2H_2PO_4^-} \longleftrightarrow \underset{(insoluble)}{Mg_3(PO_4)_2} + 4H^+ \quad (8.3)$$

$$\underset{(soluble)}{3MgCO_3 + 2H_2PO_4^-} \longleftrightarrow \underset{(insoluble)}{Mg_3(PO_4)_2} + 3HCO_3^- + H^+ \quad (8.4)$$

ที่มา: คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548)

ในสภาวะดินกรดสารประกอบต่างๆ ของเหล็กและอะลูมินัมที่สะสมอยู่ในดินจะละลายให้ Fe^{2+}, Fe^{3+} และ Al^{3+} ซึ่งจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับฟอสเฟตไอออนในสารละลายดินได้สารประกอบที่ละลายน้ำได้ยากดังสมการ

$$\underset{(soluble)}{Al^{3+} + H_2PO_4^- + 2H_2O} \longleftrightarrow 2H^+ + \underset{(insoluble)}{Al(HO)_2H_2PO_4} \quad [9]$$

ที่มา: Brady and Weil (2004)

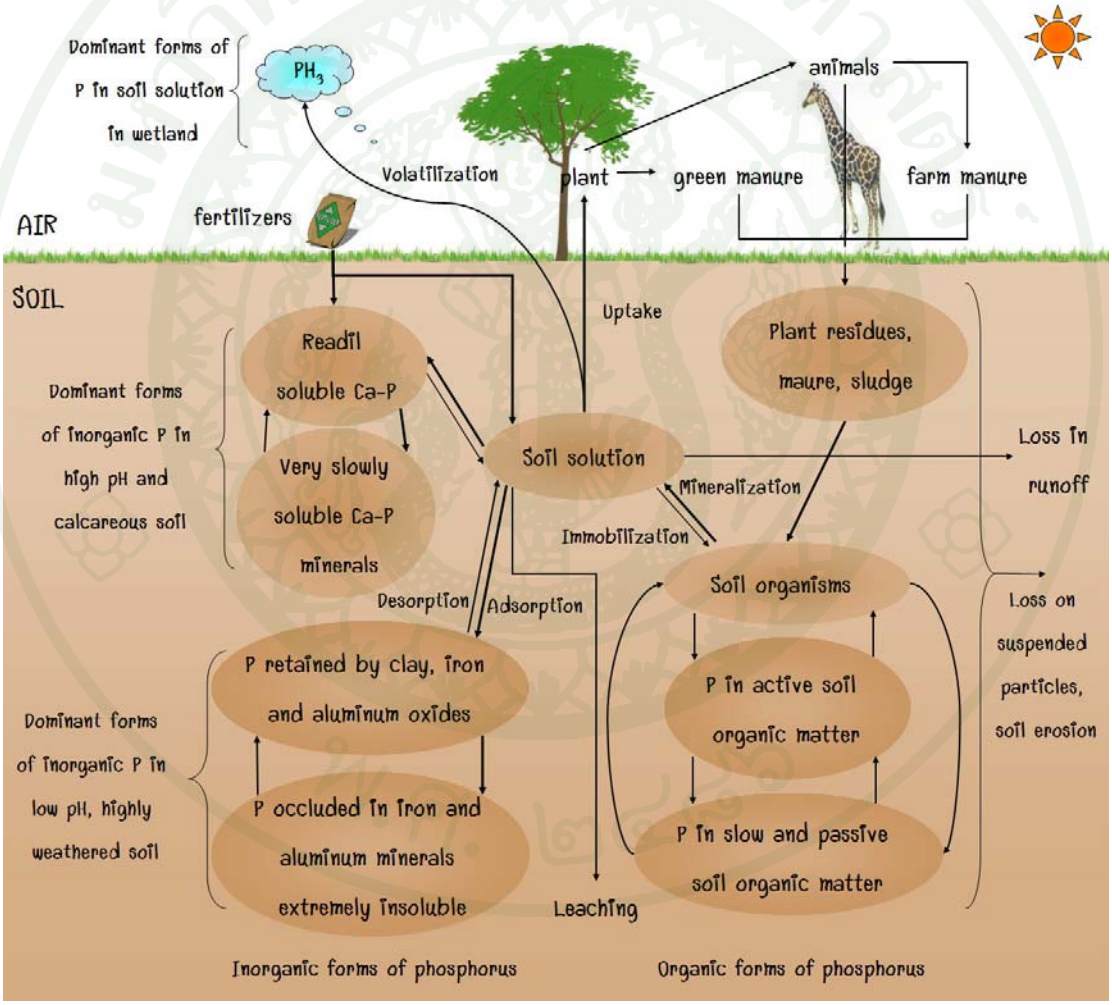
หากค่า pH ของดินต่ำและปริมาณความชื้นสูง hydrous oxide ของเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีสที่มีอยู่ในดินจะดูดซับไอออนฟอสเฟตเอาไว้ พืชใช้ประโยชน์ได้ยาก เรียกกระบวนการนี้ว่า polar adsorption หรือทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารที่ละลายได้ยาก แต่จะลดลงเมื่อ pH ของดินสูงขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548; Brady and Weil, 2004)

ฟอสเฟตไอออนสามารถเข้าแทนที่ hydroxyl group ที่อยู่รอบๆ ผิวผลึกของแร่ดินเหนียวซิลิเกตพวก kaolinite, montmorillonite และ illite แล้วทำปฏิกิริยากับอะตอมของอะลูมินัม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หรือของเหล็กที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ซิลิเกต จึงกลายเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวไป เรียกกระบวนการ surface reaction (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548; Brady and Weil, 2004)

2.2.3 กระบวนการเกี่ยวข้องกับการสูญเสียฟอสฟอรัสในดิน ได้แก่ ติดไปกับส่วนต่างๆ ของพืชที่ถูกเคลื่อนย้ายออกไปจากดิน (crop removal) ถูกชะละลาย (leaching) ระเหย (volatilization) ขึ้นในรูปของ PH_3 ในดินที่มีสภาพน้ำขัง และติดไปกับการกร่อนดิน (soil erosion) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการได้มา เปลี่ยนแปลง และสูญเสียมวลของฟอสฟอรัสในดิน

ที่มา: Brady and Weil (2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. โพแทสเซียมในดิน

โพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการปริมาณมากและสะสมในเนื้อเยื่อแห้งของพืชในความเข้มข้นสูงกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โพแทสเซียมจำเป็นต่อกิจกรรมหรือกระบวนการสร้างสมต่างๆ ในเซลล์ที่มีชีวิต เช่น กระบวนการสร้างน้ำตาลและแป้ง มีผลต่อการเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาล นอกจากนี้โพแทสเซียมยังมีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงและการหายใจ ในดินทั่วไปมีโพแทสเซียมสูงกว่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3.1 สารประกอบของโพแทสเซียมในดิน

สารประกอบของโพแทสเซียมในดินถ้าแบ่งตามความเป็นประโยชน์ (availability) จะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่ 1) ส่วนที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (relatively unavailable form) 2) ส่วนที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที (readily available form) และ 3) ส่วนที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้าๆ (slowly available form)

3.1.1 ส่วนที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ สารที่มีโพแทสเซียมอยู่ในรูปนี้ก็คือ แร่เฟลด์สปาร์และไมกา แร่เหล่านี้สลายตัวได้ยากแต่เป็นแหล่งที่จะให้โพแทสเซียมให้แก่ดิน โพแทสเซียมจะถูกปลดปล่อยให้ออกมาอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ โดยการทำละลายของน้ำที่มีคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) อยู่ดังปฏิกิริยาข้างล่างนี้ โพแทสเซียมส่วนนี้มีอยู่มากถึง 90-98 เปอร์เซ็นต์ ของโพแทสเซียมที่มีอยู่ในดิน (ภาพที่ 3)

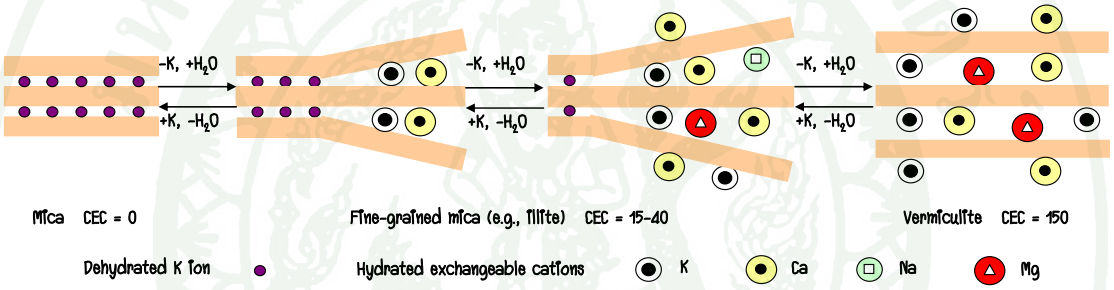
$$\underset{\substack{Microcline,\\ Feldspar}}{2KAlSi_3O_8} + H_2CO_3 + H_2O \longleftrightarrow H_4Al_2Si_2O_8 + \underset{(soluble)}{K_2CO_3} + 4SiO_2 \qquad (10)$$

3.1.2 ส่วนที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที แบ่งออกเป็นโพแทสเซียมที่อยู่ในสารละลายดิน (soil solution) จะมีอยู่ 0.1-0.2 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณโพแทสเซียมที่มีอยู่ในดิน และโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวคอลลอยด์ในรูปแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable form) จะมีอยู่ 1-2 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณโพแทสเซียมที่มีอยู่ในดินตามลำดับ (ภาพที่ 4) โพแทสเซียมที่อยู่ในสารละลายดินจะถูกพืชนำไปใช้และถูกชะละลายได้ง่ายกว่าโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวคอลลอยด์ โพแทสเซียมส่วนที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พืชใช้ประโยชน์ได้ทันทีทั้ง 2 รูปนี้จะอยู่ในสภาพสมดุลกันตลอดเวลา คือ เมื่อพืชนำโพแทสเซียมในสารละลายไปใช้จะเกิดการเสียสมดุล โพแทสเซียมในรูปแลกเปลี่ยนได้จะถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปของโพแทสเซียมในสารละลายเพื่อปรับสมดุล หรือ เมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ลงไป ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายดินเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงก็จะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม โพแทสเซียมในสารละลายดินจะเคลื่อนย้ายไปอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้

3.1.3 ส่วนที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้าๆ โพแทสเซียมไอออน (K^+) ในสารละลายดินเมื่อถูกดูดซับไว้ที่ผิวคอลลอยด์ดินแล้วยังถูกตรึงไว้ระหว่างชั้นอนุภาคดินเหนียวพวก illite, vermiculite, simectite และแร่ดินเหนียวพวก 2:1 อื่นๆ (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ไดอะแกรมแสดงกลไกการปลดปล่อยและตรึงโพแทสเซียมของ primary micas, fine-grained mica (illite clay) และ vermiculite

ที่มา: Brady and Weil (2004)

โพแทสเซียมที่ถูกตรึงไว้นี้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้จึงเรียกว่าโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนไม่ได้ (nonexchangeable K) พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้นอกจากจะถูกปลดปล่อยออกมาเป็นรูปที่แลกเปลี่ยนได้ การปลดปล่อยโพแทสเซียมจากรูปแลกเปลี่ยนไม่ได้นี้จะช้าเร็วขึ้นอยู่กับระบบความสมดุลที่มีกับส่วนของโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) และส่วนของโพแทสเซียมไอออน (K^+) ในสารละลายดินดังไดอะแกรมต่อไปนี้

(11)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปแลกเปลี่ยนไม่ได้นี้จะไม่สูญหายไปโดยขบวนการชะละลาย นับเป็นผลดีต่อดินเพราะช่วยสงวนโพแทสเซียมในดินไว้ไม่ให้สูญหายไปอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปแล้วปริมาณของโพแทสเซียมที่พืชใช้ได้อย่างช้าๆ (slowly available K) ในดินมีอยู่ประมาณ 1-10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณโพแทสเซียมที่มีทั้งหมดในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548; Brady and Weil, 2004)

3.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องต่อความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน

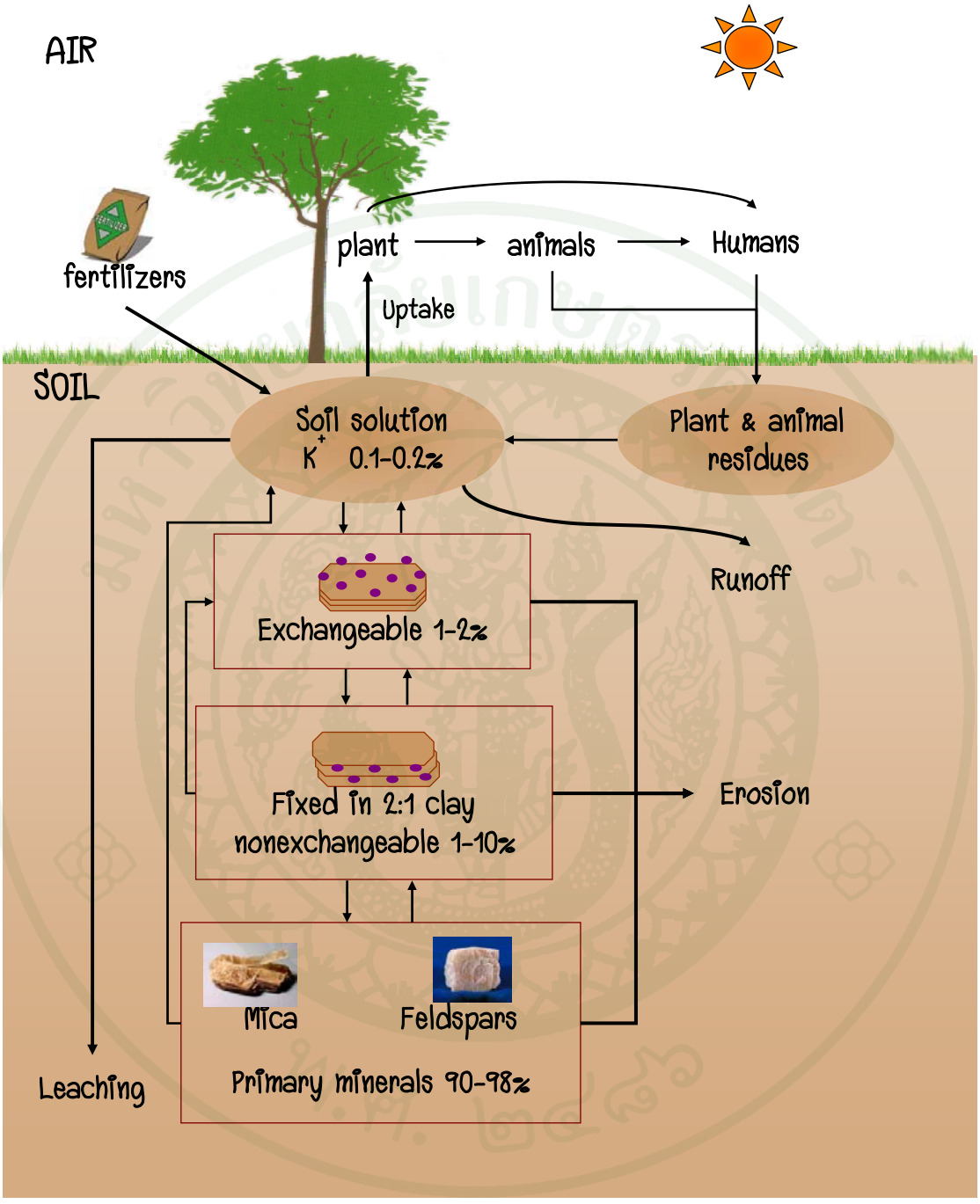
3.2.1 การได้มาซึ่งมวลของโพแทสเซียมในดิน ได้แก่ การใส่ปุ๋ยทั้งปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ หรือติดมากับเศษซากพืชซากสัตว์ และติดมากับตะกอนที่ถูกพัดพามา

3.2.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปของโพแทสเซียมในดิน ได้แก่ การย่อยสลาย (decomposition) เศษซากพืชและสัตว์ของจุลินทรีย์ดิน ได้โพแทสเซียมไอออนในสารละลายดิน ไอออนบางส่วนจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์ เรียกว่าโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จะถูกตรึงไว้ระหว่างชั้นอนุภาคของแร่ดินเหนียว เรียกว่าโพแทสเซียมแลกได้อย่างช้าๆ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตรึงโพแทสเซียมในดิน ได้แก่ ชนิดของคอลลอยด์ในดินเพราะคอลลอยด์ต่างๆ มีความสามารถในการตรึงแตกต่างกัน ปริมาณการใช้ปูนในดินกรดเพราะแคลเซียมไอออนจะไปไล่ที่โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จนทำให้เหลือน้อย อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ระดับของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงขึ้น สภาพดินที่เปียกและแห้งที่สลับกันมีผลต่อการปลดปล่อยหรือตรึงโพแทสเซียม

โพแทสเซียมที่อยู่ในแร่ปฐมภูมิ (primary minerals) micas และ feldspars เมื่อแร่เหล่านี้แตกหักและย่อยสลายก็จะปลดปล่อยออกมาในรูปของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ และจะเปลี่ยนเป็นโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และโพแทสเซียมในสารละลายดิน ซึ่งรูปของโพแทสเซียมเหล่านี้จะอยู่ในระบบสมดุลตลอดเวลา

3.2.3 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียของโพแทสเซียมในดิน ได้แก่ ถูกพืชนำไปใช้หรือถูกพืชดูดเข้าไปมากเกินความต้องการของพืชในดินที่มีระดับโพแทสเซียมสูง สูญเสียไปโดยการชะละลายออกไปจากหน้าตัดดิน หรือสูญเสียไปกับการกร่อนของผิวดินเมื่อถูกน้ำที่ไหลบ่าตามผิวดินเซาะไป (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548; Brady and Weil, 2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 กระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการได้มา เปลี่ยนแปลง และสูญเสียมวลของโพแทสเซียมในดิน

ที่มา: Brady and Weil (2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. อิทธิพลของสมบัติดินต่อการได้มา เปลี่ยนแปลง และสูญเสียมวลของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน

มีการศึกษาจำนวนมากถึงสมบัติดินอย่างง่าย ได้แก่ ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) ความชื้นในดิน (θ_m) และความหนาแน่นดินรวม (ρ_b) ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการได้มา เปลี่ยนรูปหรือเปลี่ยนแปลง และสูญเสียมวลของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน ยกตัวอย่างเช่น

4.1 ปฏิกิริยาดิน (pH)

ค่า pH ดินมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน เช่น การตรึงไนโตรเจนของไรโซเบียมและอะโซสไปริลัมจะเกิดขึ้นดีในระหว่าง pH 5.0-8.0 และ pH 6.8-7.8 ตามลำดับ การย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินจะเกิดขึ้นได้สูงสุดที่ pH 7 ถ้าค่า pH มากกว่าหรือน้อยกว่า 7 อัตราการย่อยสลายจะลดลง ในกระบวนการ nitrification ค่า pH ดินที่เหมาะสมกับการทำงานของ *nitrifying bacteria* อยู่ในช่วง pH 6.5-7.5 ถ้าค่า pH ของดินลดลงใกล้ 5.8-6.0 อัตราการเกิดจะช้าลงถึง 10-20 เปอร์เซ็นต์ หรือค่า pH สูงเกิน 7.5 อัตราการเกิดจะช้าลงและหยุดชะงักในที่สุด ส่วนกระบวนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนอื่นๆ ที่มีจุลินทรีย์เกี่ยวข้อง ค่า pH ดินย่อมมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์เหล่านั้นด้วย (ธงชัย, 2546; Metcalf and Eddy, 2003)

เมื่อ pH ดินพิ่มขึ้น เหล็กฟอสเฟตหรืออะลูมินัมฟอสเฟตจะปลดปล่อยฟอสเฟตไอออนออกมาสู่สารละลายดินและเปลี่ยนเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์หรืออะลูมินัมไฮดรอกไซด์ แต่ถ้า pH ดินลดลงจะเกิดปฏิกิริยาผันกลับดังนี้

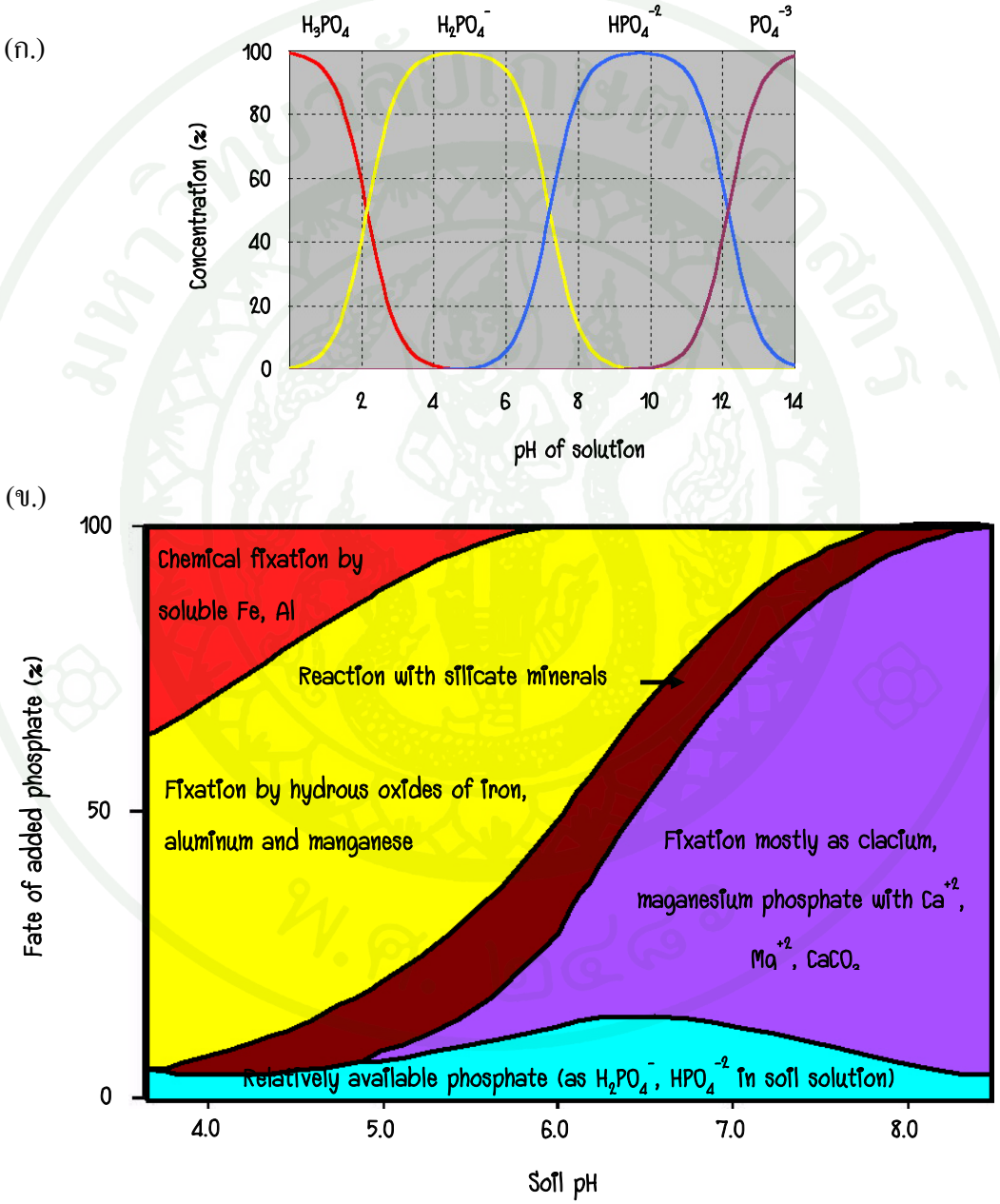
$$Al(H_2PO_4)_3 + 3OH^- \longleftrightarrow Al(OH)_3 + 3H_2PO_4^- \qquad (12)$$

และเมื่อ pH ดินลดลงการละลายได้ของพวกแคลเซียมฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นทำให้ฟอสเฟตในสารละลายดินสูงขึ้นอีกด้วย แสดงได้ดังนี้

$$\underset{(hydroxy\ \ apatite)}{Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6} + 14H^+ \longleftrightarrow 10Ca^{2+} + 2H_2O + 6H_2PO_4^- \qquad (13)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระดับ pH มีความสำคัญต่อชนิดหรือรูปของออร์โทฟอสเฟตไอออน (ภาพที่ 5) และมีผลต่อการตรึงฟอสเฟตไอออนในดิน เช่น เมื่อ pH น้อยกว่า 6 ฟอสเฟตจะถูกตรึงโดยแคตไอออนที่ละลายได้ (Fe^{2+}, Al^{3+}) และ hydrous oxide ของเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีส แต่ถ้า pH มากกว่า 7 ก็จะถูกตรึงโดย Ca^{2+} Mg^{2+} และ $CaCO_3$ เกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟต



ภาพที่ 5 แสดงสัดส่วนของ H_3PO_4 และฟอสเฟตไอออน 3 ชนิดในสารละลาย (ก.) และการตรึงฟอสเฟตในดิน (ข.) ที่ระดับ pH ต่างๆ

ที่มา: (ก.) Stephen (2004) (ข.) Brady and Weil (2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2 อินทรียวัตถุ (Orgnic matter; OM)

อินทรียวัตถุในดินจัดได้ว่าเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญมากของธาตุอาหารพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน เนื่องจากการย่อยสลายอินทรียวัตถุโดยจุลินทรีย์จำพวก heterotroph ทำให้ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์เหล่านี้ถูกปลดปล่อยออกมา พืชจึงสามารถนำไปใช้ได้ กรดอินทรีย์ที่ได้จาการย่อยสลายจะทำให้ pH ของดินลดลงไป ซึ่งจะเพิ่มการตรึงฟอสเฟตของดิน อินทรียวัตถุมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อนประกอบด้วยกลุ่มแอนไอออนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงคาดว่ากลุ่มไอออนเหล่านี้ของอินทรียวัตถุจะไปแก่งแย่งที่กับฟอสเฟตไอออนในการที่จะถูกดูดซับอยู่ที่พื้นผิวของสารคอลลอยด์อื่นๆ ดังนั้นอินทรียวัตถุจะทำให้ฟอสเฟตถูกตรึงน้อยลง

3.3 ความชื้นในดิน (θ_m)

น้ำมีความสำคัญในการดำรงชีวิตและมีอิทธิพลอย่างมากต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ เช่น ระดับความชื้นที่พอเหมาะต่อการย่อยสลายอินทรียวัตถุอยู่ที่ค่าศักย์น้ำ (water potential) ประมาณ 0.01 ถึง -0.05 MPa (megapascal) อัตราการสลายตัวมักลดลงอย่างรวดเร็ว หากมีความชื้นมากขึ้นเกินกว่า -0.01 MPa ไปจนถึงสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (0 MPa) ในกระบวนการ nitrification ความชื้นประมาณร้อยละ 60 ของน้ำหนักทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้จะเหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของแบคทีเรีย ถ้าความชื้นในดินมากเกินไปก็จะทำให้การถ่ายเทอากาศไม่ดีพอ หรือถ้าความชื้นในดินน้อยเกินไปก็จะทำให้ดินมีสภาพแห้งเกินไปไม่เหมาะแก่การเจริญและการทำงานของแบคทีเรีย

ปริมาณความชื้นในดินมีผลต่อการชะละลาย (leaching) ของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ส่วนปริมาณความชื้นที่สูงเกินกว่าที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้จะก่อให้เกิดการไหลบ่าของน้ำที่ผิวดิน (runoff) โดยเฉพาะพื้นที่ลาดชันปริมาณความชื้นที่สูง ส่งเสริมให้เกิดการกร่อนของดิน (erosion) ได้ง่าย ซึ่งอนุภาคของดินที่ติดไปกับน้ำหรือสูญเสียไปกับการกร่อนดินนั้นจะนำพาธาตุอาหารไปด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.4 ความหนาแน่นดินรวม (ρ_b)

ความหนาแน่นของดินมีความเกี่ยวข้องกับการระบายอากาศของดิน ในดินที่มีความหนาแน่นดินรวมสูงนั้นการระบายอากาศในดินจะไม่ค่อยดี ซึ่งการระบายอากาศของดินมีผลต่อการย่อยสลายอินทรียวัตถุในดิน เนื่องจากจุลินทรีย์จำพวก heterotroph ใช้ O_2 ในการหายใจเพื่อนำมาสร้างพลังงาน ในสภาพที่มี O_2 เพียงพอ การย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วและสมบูรณ์กว่าในสภาพที่มี O_2 ไม่เพียงพอ เช่น ในดินเนื้อหยาบหรือดินที่มีการไถพรวนบ่อยครั้งจะมีอัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์รวดเร็วและมีระดับอินทรียวัตถุเหลืออยู่ในดินค่อนข้างต่ำในทางตรงข้าม ดินที่อยู่ในสภาพขาดอากาศหรือมีน้ำท่วมขังอัตราการสลายตัวจะลดลงอย่างมากมายและเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ สารที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวมักเป็นกรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์และสารอื่นๆ อีกหลายชนิดเช่น amine mercaptan aldehyde ketone และเกิดแก๊สต่างๆ มากมายเช่น CO_2, H_2S, H_2, หรือแม้แต่ CH_4 จุลินทรีย์กลุ่มหลักที่ทำให้เกิดการแปรสภาพของสารอินทรีย์แบบนี้คือ แบคทีเรียพวกที่ไม่ต้องการอากาศ (anaerobic bacteria)

กระบวนการ nitrification เป็นกระบวนการ oxidation และจุลินทรีย์ *nitrifying bacteria* เป็นพวกที่ต้องการ O_2 ในการหายใจ ดังนั้น O_2 จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการนี้ เมื่อดินอยู่ในสภาพที่มีอากาศดี O_2 เพียงพอแก่ความต้องการของจุลินทรีย์ กระบวนการนี้ก็จะดำเนินไปด้วยดี

5. แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ในดินของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับธาตุอาหารในดินมักสร้างมาในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีการประยุกต์ผลทางด้านสถิติมาจัดสร้างแบบจำลอง ซึ่งอาจจัดสร้างด้วยการอาศัยแบบจำลองแนวคิดรวบยอดก่อน จากนั้นพยายามสร้างระบบทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับแบบจำลองแนวคิดรวบยอด โดยกำหนดให้ทั้งข้อมูลที่ต้องป้อนให้กับแบบจำลองและผลลัพธ์หรือผลกระทบกับระบบเป็นตัวแปรทางคณิตศาสตร์ ส่วนความสัมพันธ์ของหน่วยย่อย และผลที่จะเกิดจากหน่วยย่อยหนึ่งๆ อาจจะใช้ผลที่ได้จากการประมวลผลทางสถิติเข้าช่วยได้ (กุมุท, 2549)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.1 แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ไนโตรเจน

Dutt *et al*. (1972) กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนโดยใช้แบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ล (empirical model) อธิบายดังนี้

$$Y = c + b_1 x_1 + b_2 x_2 + ... + b_n x_n \tag{14}$$

เมื่อ Y คือ อัตราการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน

x_i คือ ตัวแปรพื้นฐานของการเปลี่ยนรูป ตัวที่ I เมื่อ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

b_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรพื้นฐาน ตัวที่ I เมื่อ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

c คือ ค่าคงที่ของสมการ

ในที่นี้ขอยกตัวอย่างของสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในกระบวนการ nitrification ที่ Dutt *et al*. (1972) ได้ศึกษามาอธิบายดังสมการ

$$N = 4.64 + 0.00162T(NH_4 - N) + 0.00162\ln_{10}(NH_4 - N) - 2.51\ln_{10}(NO_3 - N) \tag{15}$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส $NH_4 - N$, $NO_3 - N$ คือรูปของไนโตรเจนในดิน (Shaffer *et al*., 1977) ต่อมาได้นำ zero-order kinetic model เข้ามาช่วยอธิบายรูปแบบสมการของกระบวนการ denitrification เป็นดังนี้

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -k_0 \tag{16}$$

เมื่อ k_0 เป็น rate constant ส่วน $\frac{\partial N}{\partial t}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนในดิน

Mehran and Tanji (1974) แนะนำให้ใช้ first-order kinetics อธิบายกระบวนการต่างๆ ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนในดิน ไม่ว่าจะเป็น nitrification, denitrification, mineralization, immobilization และ plant uptake มีรูปสมการโดยทั่วไปเป็น

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -k_1 N \tag{17}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนจากหลายๆ กระบวนการ มีการกำหนดให้เป็นแบบจำลองพลวัตโดยมีรูปสมการทั่วไปเป็น

$$\frac{\partial[N_c]}{\partial t} = -\sum_{i=1}^{n} K_i[N_c] + \sum_{j=1}^{n} K_j[N_m] \qquad (18)$$

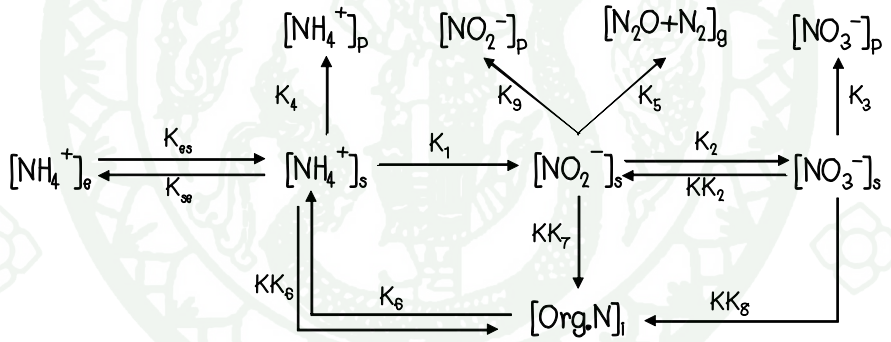
เมื่อ N_c คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนรูปที่สนใจ

N_m คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนรูปอื่น

K_i คือ ค่าคงที่ของกลไกการให้หรือสูญเสียไนโตรเจนรูปที่สนใจ โดยที่ i = 1,..., n

K_j คือ ค่าคงที่ของกลไกการรับหรือได้ไนโตรเจนในรูปอื่น โดยที่ j = 1,..., n

K_i และ K_j บอกเป็นนัยถึงกระบวนการที่ i และ j ที่เกี่ยวข้องกับไนโตรเจนรูปที่สนใจ



ภาพที่ 6 แบบจำลองความคิดรวบยอดแสดงกระบวนการการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในดิน ค่า K และ KK แทนค่าคงที่ ตัวห้อย e, s, p, i และ g เป็นตัวย่อแสดงความหมายในเชิงกระบวนการ exchangeable, solution, plant, immobilized และ gaseous phases

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Mehran and Tanji (1974)

จากรูปสมการ (18) นำมาหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียมในสารละลายดินต่อเวลาในภาพที่ 6 ได้ดังนี้

$$\frac{d[NH_4]_s}{dt} = -(K_1 + K_{se} + K_4 + KK_6)[NH_4]_s + K_{se}[NH_4]_e + K_6[Org.N]_i \qquad (19)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จะเห็นว่ากลไกใดที่ทำให้สูญเสียแอมโมเนียมไปจะมีเครื่องหมายเป็นลบ กลไกได้ที่เพิ่มแอมโมเนียมจะมีเครื่องหมายเป็นบวก จากรูปแบบในสมการ (19) สามารถนำมาประยุกต์เขียนเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NO_2 และ NO_3 ในสารละลายดินต่อเวลาได้ในทำนองเดียวกัน เช่น

$$\frac{d[NO_2]_S}{dt} = -(K_2 + K_5 + K_9 + KK_7)[NO_2]_S + K_1[NH_4]_S + KK_2[NO_3]_S \quad (20)$$

$$\frac{d[NO_3]_S}{dt} = -(K_3 + KK_2 + KK_8)[NO_3]_S + K_2[NO_2]_S \quad (21)$$

Richter (1987) ได้เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายกระบวนการ nitrification ในชั้นหน้าตัดดินดังสมการ [22.1] ถึง [22.3] และเขียนแบบจำลองความคิดรวบยอดได้ดังภาพที่ 7

$$\frac{\partial([N_{NH_4}] + k[N_{NH_4}])}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2[N_{NH_4}]}{\partial^2 z} - v_w \frac{\partial[N_{NH_4}]}{\partial z} + k_{01} N_{total} - k_{12}[N_{NH_4}] \quad (22.1)$$

$$\frac{\partial[N_{NO_2}]}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2[N_{NO_2}]}{\partial^2 z} - v_w \frac{\partial[N_{NO_2}]}{\partial z} + k_{12}[N_{NH_4}] - k_{23}[N_{NO_2}] \quad (22.2)$$

$$\frac{\partial[N_{NO_3}]}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2[N_{NO_3}]}{\partial^2 z} - v_w \frac{\partial[N_{NO_3}]}{\partial z} + k_{23}[N_{NO_2}] - k_{34}[N_{NO_3}] \quad (22.3)$$

โดยที่ $[N_{NH_4}]$ คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม

$[N_{NO_2}]$ คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปไนไตรต์

$[N_{NO_3}]$ คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปไนเตรต

D_1, D_2, D_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์

v_w คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านในชั้นหน้าตัดดิน

z คือ ระดับความลึกของชั้นหน้าตัดดิน

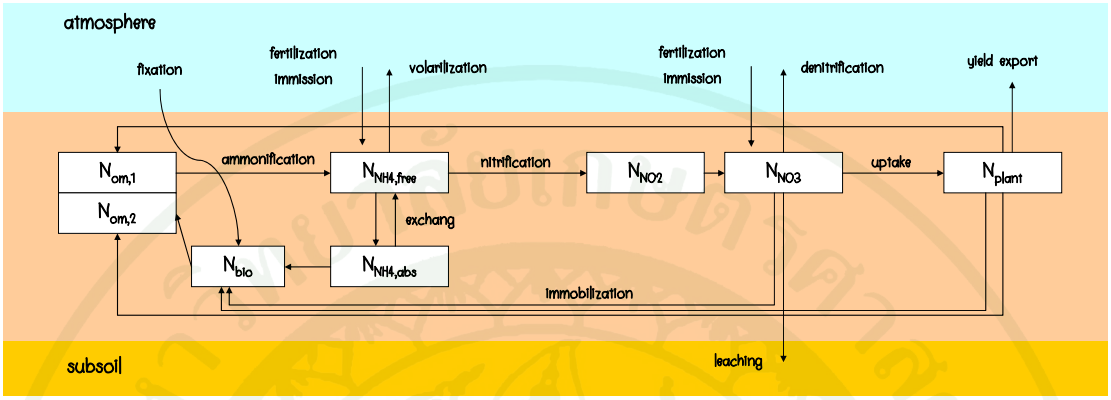
k_{01} คือ ค่าคงที่ในการเปลี่ยน N_{OM} เป็น N_{NH_4}

k_{12} คือ ค่าคงที่ในการเปลี่ยน N_{NH_4} เป็น N_{NO_2}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

k_{23} คือ ค่าคงที่ในการเปลี่ยน N_{NO_2} เป็น N_{NO_3}

k_{34} คือ ค่าคงที่ในการที่พืชนำ N_{NO_3} ไปใช้



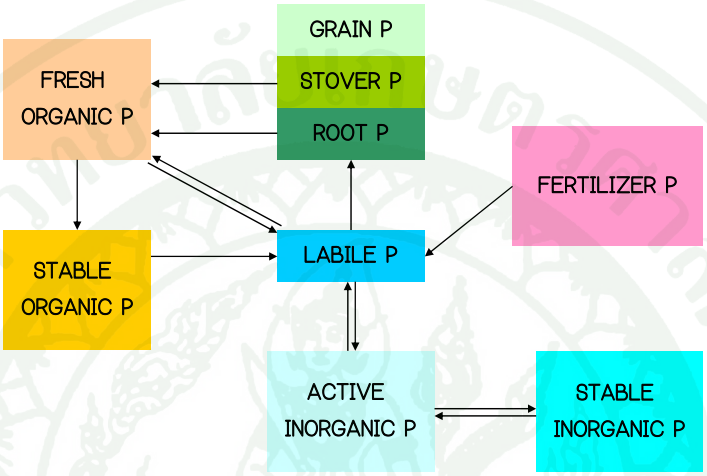
ภาพที่ 7 แบบจำลองความคิดรวบยอดแสดงการสูญเสียและการได้รับของไนโตรเจน

ที่มา: Richter (1987)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.2 แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับฟอสฟอรัส

Jones *et al.* (1984) กล่าวถึงแบบจำลองฟอสฟอรัสซึ่งมีต้นแบบมาจากแบบจำลอง Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) (Williams *et al.*, 1983, 1984) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แบบจำลองความคิดรวบยอดแสดงแหล่งที่มาและการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในแบบจำลอง EPIC

ที่มา: Jones *et al.* (1984)

จากภาพที่ 8 ดัชนีบ่งชี้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน (F_l) เป็นฟังก์ชันของปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไป ดังสมการ [23]

$$F_l = (P_{ilf} - P_{ili}) / P_f \qquad (23)$$

เมื่อ F_l คือ ฟังก์ชันของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยแอนไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ของเรซินหลังจากได้รับการบ่มแล้ว ไม่มีหน่วย

P_f คือ ปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัส มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

P_{ilf} คือ ปริมาณ labile P หลังจากการใส่ปุ๋ย มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

P_{ili} คือ ปริมาณ labile P ก่อนการใส่ปุ๋ย มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การเปลี่ยนรูประหว่าง labile P และ active inorganic P สามารถคำนวณได้จากสมการ (24)

$$P_{ia} = P_{il}(1 - F_l)/F_l \tag{24}$$

เมื่อ P_{ia} คือ ปริมาณ active inorganic P มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

P_{il} คือ ปริมาณ labile P มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

สำหรับอัตราการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสระหว่างรูป labile P และ active inorganic P สามารถคำนวณได้ดังสมการ (25)

$$R_{la} = 0.1\{P_{il} - P_{ia}[F_l/(1 - F_l)]\}F_{im}F_{it} \tag{25}$$

เมื่อ R_{la} คือ อัตราการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสจากรูป P_{il} เป็น P_{ia} มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1}

F_{im} คือ ฟังก์ชันความชื้นสำหรับการเปลี่ยนรูป inorganic P ไม่มีหน่วย

F_{it} คือ ฟังก์ชันอุณหภูมิสำหรับการเปลี่ยนรูป inorganic P ไม่มีหน่วย

ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมค่าคงที่ใช้คำนวณ R_{la} เป็น 0.1 d^{-1} (Rajan and Fox, 1972) ถ้า $P_{il} = P_{ia}F_l/(1 - F_l)$ แล้ว R_{la} จะไม่เกิดขึ้น และถ้า $P_{il} > P_{ia}F_l/(1 - F_l)$ แล้ว R_{la} ที่ได้จะมีค่าเป็นบวก แต่ถ้า $P_{il} < P_{ia}F_l/(1 - F_l)$ แล้ว R_{la} ที่ได้จะมีค่าเป็นลบ ส่วน F_{im} และ F_{it} มีค่าในช่วง 0.0 ถึง 1.0 การเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสจากรูป P_{ia} เป็น P_{il} ไม่เกิดขึ้น เนื่องจากกลไกเกิดความสมดุลระหว่าง P_{ia} และ P_{il} เพราะการใส่ปุ๋ยไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ P_{ia} และ P_{il} สุดท้ายการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสจากรูป P_{il} เป็น P_{ia} นั้นเลียนแบบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของฟอสฟอรัสที่ดินได้มาจากปุ๋ย และผลที่ตามมาคือ labile P ลดลง ฟังก์ชันความชื้นและอุณหภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการ [26] (Barrow and Shaw, 1975a, 1975b) และ [27] (Barrow, 1974)

$$F_{im} = W/W_{0.03} \tag{26}$$

$$F_{it} = \exp(0.115T - 2.88) \tag{27}$$

เมื่อ W คือ ปริมาณความชื้นของน้ำในดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$W_{0.03}$ คือ ปริมาณความชื้นของน้ำในดินที่ระดับ -0.03 MPa

T คือ อุณหภูมิดิน มีหน่วยเป็น °C

ค่า F_{it} ในสมการ (27) สามารถมีค่ามากกว่า 1.0 ในกรณีที่ $T >$ 25 °C แต่ค่า F_{im} ไม่สามารถมีค่ามากกว่า 1.0 ได้ในกรณีที่ $W > W_{0.03}$

Cox *et al.* (1981) ได้อธิบายการลดลงอย่างช้าๆ ของสารสกัดฟอสฟอรัสในปุ๋ยด้วยฟังก์ชันเลขชี้กำลังของค่าคงที่ในแต่ละดิน แบบจำลองนี้เลียนแบบการดูดซับ inorganic P (P_i) อย่างช้าๆ โดยสมมุติว่า P_{ia} สมดุลกันอย่างช้าๆ กับ P_{is} ณ ที่จุดสมดุล สมมุติให้ P_{is} เป็น 4 เท่าของ P_{ia} ถ้าไม่อยู่ในภาวะสมดุล อัตราการเคลื่อนย้ายของฟอสฟอรัสระหว่างรูป P_{ia} และ P_{is} เป็นดังสมการ [28]

$$R_{as} = K_{as}(4P_{ia} - P_{is}) \tag{28}$$

เมื่อ R_{as} คือ อัตราการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสจากรูป P_{ia} เป็น P_{is} มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1}

K_{as} คือ ค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสจากรูป P_{ia} เป็น P_{is} มีหน่วยเป็น d^{-1}

P_{is} คือ ปริมาณ stable inorganic P มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

ค่า K_{as} มีความหลากหลายในแต่ละดิน จากการทดลองของ Cox *et al*. (1981) พบว่าถ้าดินด่าง K_{as} มีค่าอยู่ในช่วง 7.3x10^{-4}-7.9x10^{-4} d^{-1} ในแบบจำลองนี้กำหนดให้ K_{as} มีค่า 7.6x10^{-4} d^{-1} ในกรณีที่เป็นดินด่าง ส่วนดินธรรมดา K_{as} มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสอย่างรวดเร็ว จากการศึกษาของ Yost *et al*. (1981) และ Russell (1973) พบว่าในดินธรรมดาสามารถคำนวณหาค่า K_{as} ได้ดังสมการ (29)

$$K_{as} = \exp(-1.77F_l - 7.05) \tag{29}$$

Organic P ในดิน (P_o) และการเปลี่ยนรูปของ P_o ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ น้ำในดิน และความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน (Dalal, 1977; Anderson, 1980) ในแบบจำลองนี้กระบวนการ immobilization ของ labile P โดยการย่อยสลายเศษซากพืช และกระบวนการ mineralization ของ organic P ในเศษซากพืชและอินทรียวัตถุที่คงทน ประมาณการว่าคล้ายกับกระบวนการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

mineralization - immobilization ไนโตรเจนของ PAPRAN (Seligman and van Keulen, 1981) ด้วยการยอมให้ความเป็นประโยชน์ของ inorganic N และ P_i มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนรูปของ organic N P_o และเศษซากพืช ในทางตรงข้าม PAPRAN แบ่งอินทรียวัตถุที่คงทน (O_s) ออกเป็นส่วน mineralizable และ ส่วนที่ไม่ใช่ mineralizable

อัตราการเกิดกระบวนการ immobilization ของฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับอัตราการย่อยสลายเศษวัสดุในชั้นดิน อัตรา immobilization ของฟอสฟอรัสจากการเน่าเปื่อยของ O_r และความเป็นประโยชน์ได้ของ P_{il} สำหรับอัตราการย่อยสลายเศษซากพืชนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ [30]

$$R_{or} = K_{or} O_r \sqrt{F_{ot} F_{om}} \min(F_{cn}, F_{cp}) \tag{30}$$

เมื่อ R_{or} คือ อัตราการย่อยสลายของอินทรียวัตถุหรือเศษซากพืช มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1}

K_{or} คือ ค่าคงที่สำหรับการย่อยสลายอินทรียวัตถุหรือเศษซากพืช มีหน่วยเป็น d^{-1}

O_r คือ อินทรียวัตถุที่เป็นเศษซากพืชและจุลินทรีย์ มีหน่วยเป็น kg OM ha^{-1}

F_{ot} คือ ฟังก์ชันของอุณหภูมิสำหรับการเปลี่ยนรูปอินทรียวัตถุในดิน ไม่มีหน่วย

F_{om} คือ ฟังก์ชันของความชื้นสำหรับการเปลี่ยนรูปอินทรียวัตถุในดิน ไม่มีหน่วย

F_{cn} คือ ฟังก์ชันของ C/N ratio สำหรับการเปลี่ยนรูปอินทรียวัตถุในดิน ไม่มีหน่วย

F_{cp} คือ ฟังก์ชันของ C/P ratio สำหรับการเปลี่ยนรูปอินทรียวัตถุในดิน ไม่มีหน่วย

ต่อมา Seligman and van Keulen (1981) พบว่าค่า K_{or} ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ O_r / O_{rx} ดังสมการ (31)-(33) เมื่อ O_{rx} คืออินทรียวัตถุตอนแรกเริ่ม มีหน่วยเป็น kg OM ha^{-1}

$$K_{or} = 0.8, \quad when \quad O_r / O_{rx} > 0.8 \tag{31}$$

$$K_{or} = 0.05, \quad when \quad 0.1 < O_r / O_{rx} < 0.8 \tag{32}$$

$$K_{or} = 0.0095, \quad when \quad O_r / O_{rx} < 0.1 \tag{33}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฟังก์ชันของอุณหภูมิ (F_{ot}), ความชื้น (F_{om}), C/N ratio (F_{cn}) และ C/P ratio (F_{cp}) สามารถคำนวณได้จากสมการ (34), (35), (36) และ (37) ตามลำดับ

$$F_{ot} = 0.9T/[T + \exp(7.63 - 0.312T)] + 0.1 \quad (34)$$

$$F_{om} = F_{im} = W/W_{0.03} \quad (35)$$

$$F_{cn} = \exp\{-0.693[C_r/(N_i + N_{or}) - 25]/25 \quad (36)$$

$$F_{cp} = \exp\{-0.693[C_r/(P_{or} + P_{il}) - 200]/200 \quad (37)$$

$$C_r = 0.4O_r \quad (38)$$

เมื่อ C_r คือ ปริมาณคาร์บอนใน O_r มีหน่วยเป็น kg C ha^{-1}

N_i คือ inorganic N (NO_3^- + NH_4^+) มีหน่วยเป็น kg N ha^{-1}

N_{or} คือ เศษซากพืชที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ มีหน่วย kg ha^{-1}

P_{or} คือ organic P ในเศษซากพืชและจุลินทรีย์ มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

ส่วนอัตรา immobilization ของฟอสฟอรัสจากการเน่าเปื่อยของ O_r สามารถได้จากสมการ (39)

$$R_{upr} = 0.16R_{or}P_m/O_m \quad (39)$$

เมื่อ R_{upr} คือ อัตรา immobilization ของฟอสฟอรัสจากการเน่าเปื่อยของ O_r มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1}

P_m คือ ปริมาณฟอสฟอรัสในมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

O_m คือ ปริมาณอินทรียวัตถุในมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ มีหน่วยเป็น kg OM ha^{-1}

ค่าของ P_m/O_m อยู่ในช่วง 0.01-0.02 ซึ่งค่าจะเป็นเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของ P_{il} ถ้า $P_{il} > 10$ แล้ว P_m/O_m มีค่าเป็น 0.02 แต่ถ้า $P_{il} < 10$ แล้ว P_m/O_m จะมีค่าเป็นดังสมการ (40)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$P_m / O_m = 0.01 + 0.001 P_{il} \quad (40)$$

อัตรา mineralization ของฟอสฟอรัสจากการเน่าเปื่อยของ O_r สามารถคำนวณได้ดังสมการ (41)

$$R_{pr} = K_{or} P_{or} \sqrt{F_{ot} F_{om}} \min(F_{cn}, F_{cp}) \quad (41)$$

เมื่อ R_{pr} คือ อัตรา mineralization ของฟอสฟอรัสจากการเน่าเปื่อยของ O_r มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1} ส่วนอัตรา mineralization ของฟอสฟอรัสจากอินทรียวัตถุที่คงทนสามารถคำนวณได้จากสมการ (42)

$$R_{pos} = K_{os} P_{os} \min(F_{om}, F_{ot}) \quad (42)$$

เมื่อ R_{pos} คือ อัตรา mineralization ของฟอสฟอรัสจากอินทรียวัตถุที่คงทน มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1}

K_{os} คือ ค่าคงที่สำหรับการย่อยสลาย stable organic matter (O_s) มีหน่วยเป็น d^{-1}

P_{os} คือ ปริมาณ organic P ในอินทรียวัตถุที่คงทน มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

ผลรวมของอัตรา mineralization หรือ immobilization ฟอสฟอรัสจากแหล่งต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (43)

$$R_p = 0.8 R_{pr} + R_{pos} - R_{upr} \quad (42)$$

เมื่อ R_p คือ ผลรวมของอัตรา mineralization หรือ immobilization ของฟอสฟอรัสจากแหล่งต่างๆ มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1}

การ uptake ฟอสฟอรัสของพืชถูกควบคุมโดยปริมาณความต้องการของพืชหรือความสามารถของพืชในการ uptake ฟอสฟอรัสขึ้นมาจากดิน ความต้องการฟอสฟอรัสของพืชจะแตกต่างกันไปตามความพึงพอใจและน้ำหนักมวลชีวภาพของพืชเมื่อฟอสฟอรัสมีความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาณฟอสฟอรัสที่เหมาะสมเป็นฟังก์ชันของ plant growth stage (Jones, 1983) ใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้าวโพดระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้จากสมการ (43) และ (44) (Hanway, 1963)

$$P_{po} / O_p = 0.00684 - 0.00108GS \quad (GS \le 4.0) \tag{43}$$

$$P_{po} / O_p = 0.00238 - 0.000056GS \quad (GS > 4.0) \tag{44}$$

เมื่อ P_{po} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เหมาะสม มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

O_p คือ ปริมาณอินทรียวัตถุ มีหน่วยเป็น kg OM ha^{-1}

GS คือ plant growth stage ไม่มีหน่วย

อัตราการ uptake ฟอสฟอรัสของพืชในรูป labile P จากชั้นหน้าตัดดินนั้นสมมุติให้เป็นฟังก์ชันเส้นตรงของ labile P ที่ระดับวิกฤติ ในข้าวโพดระดับวิกฤติของ labile P มักอยู่ที่ 20 μg g^{-1} จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระดับวิกฤติของ labile P มีค่าหลากหลายตามแต่ชนิดของดินและพืช ทั้งนี้อัตราการ uptake ฟอสฟอรัสยังขึ้นอยู่กับฟังก์ชันความชื้นและระบบรากในชั้นดินด้วย จากการศึกษา (Andrews and Newman, 1970; De Jager, 1979; Jungk and Barber; 1974, 1975) บอกเป็นนัยว่ารากพืชที่ขาดฟอสฟอรัสสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้มากกว่ารากพืชปกติ ศักยภาพอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสจากชั้นดินสมมุติให้เป็น 1.5 เท่าของระดับฟอสฟอรัสที่เหมาะสมแต่ต้องไม่มีข้อจำกัดเรื่องความชื้นและปริมาณ labile P ดังสมการ (45)

$$R_{pu} = 1.5P_{po} / O_p R_{pdm} \min(F_r, F_{om}, F_{il}) \tag{45}$$

เมื่อ R_{pu} คือ อัตราการ uptake ฟอสฟอรัสของพืช มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1}

R_{pdm} คือ อัตราการเพิ่มน้ำหนักแห้งของพืช มีหน่วยเป็น kg ha^{-1} d^{-1}

F_r คือ ฟังก์ชันของรากในชั้นดิน ไม่มีหน่วย

F_{il} คือ ฟังก์ชันของ labile P สำหรับการ uptake ในพืช ไม่มีหน่วย

Jones (1983) แสดงให้เห็นว่าในข้าวโพดและเมล็ดข้างฟ่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสต่ำสุดจะประมาณครึ่งหนึ่งของระดับที่เหมาะสม ดังนั้นความเข้มข้นฟอสฟอรัสในส่วนเหนือดินที่พืชยอมรับได้จะอยู่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระหว่างระดับเหมาะสมถึงครึ่งหนึ่งของระดับเหมาะสม เมื่อการ uptake ฟอสฟอรัสไม่เพียงพอกับความต้องการ ฟังก์ชันของ scaling จะมีค่า 0.0-1.0 สามารถคำนวณจากสมการ [46]

$$F_{ps} = 2.0(1.0 - P_p / P_{po}) \quad (46)$$

เมื่อ F_{ps} คือ ปัจจัยเกี่ยวกับ P scaling ของพืช

P_p คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชพึงพอใจ มีหน่วยเป็น kg P ha^{-1}

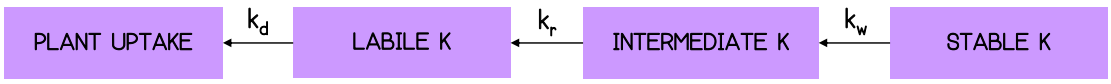
ดังนั้น $F_{ps} = 0.0$ เมื่อ $P_p = P_{po}$ และ $F_{ps} = 1.0$ เมื่อ $P_p = 0.5\,P_{po}$ ส่วนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับ P stress ในพืชสามารถคำนวณได้จาก F_{ps} ดังสมการ (47)

$$F_{pp} = 1 - F_{ps} / [F_{ps} + \exp(3.38 - 10.9 F_{ps})] \quad (47)$$

เมื่อ F_{pp} คือ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับ P stress ของพืช ไม่มีหน่วย มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-1.0 ถ้า F_{ps} = 0.0 แล้ว F_{pp} = 1.0 แต่ถ้า F_{ps} = 1.0 แล้ว F_{ps} = 0.0 F_{pp} ถูกใช้เป็นตัวเชื่อมกับปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับ stress ในพืชเพราะมีผลต่อการเจริญของพืชในแต่ละวันของแบบจำลอง EPIC (Williams *et al.*, 1983, 1984) ในฤดูการเก็บเกี่ยวฟอสฟอรัสในพืชจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนเหนือดิน (P_{ps}), ราก (P_{pr}) และเมล็ด (P_{pg}) ฟอสฟอรัสในส่วนเหนือดินและรากจะถูกส่งให้ไปอยู่ในส่วนของ fresh organic P (ภาพที่ 8)

5.3 แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับโพแทสเซียม

Nguyen (2003) ศึกษาแบบจำลองเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายของโพแทสเซียมในดินและการ uptake ของพืช (ข้าว) มีรูปแบบคล้ายกับของ Selim *et al.* (1976) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ลักษณะการเคลื่อนย้ายโพแทสเซียมในดิน

ที่มา: Nguyen (2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แหล่งของโพแทสเซียมในแบบจำลองประกอบด้วย labile K (LK), intermediate K (IK) และ stable K (SK) คำนวณหาได้ดังสมการ (48), (49) และ (50)

$$LK = K(NH_4OAc) \tag{48}$$

$$IK = K(NaTPB) - K(NH_4OAc) \tag{49}$$

$$SK = TotalK - K(NaTPB) \tag{50}$$

เมื่อ LK คือ ปริมาณโพแทสเซียม มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

IK คือ ปริมาณโพแทสเซียม มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

SK คือ ปริมาณโพแทสเซียม มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

$K(NH_4OAc)$ คือ โพแทสเซียมที่สกัดได้จาก 1 M NH_4OAc pH 7 หน่วยเป็น mmol kg^{-1}

$K(NaTPB)$ คือ โพแทสเซียมที่สกัดได้จาก 0.2 M NaTPB มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

$TotalK$ คือ ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

อัตราการเปลี่ยนแปลง SK สามารถคำนวณได้ดังสมการ (51)

$$dSK/dt = -k_w SK \tag{51}$$

เมื่ออินทริกรัลสมการ [51] จะได้

$$SK_e = SK_b \exp(-k_w t) \tag{52}$$

$$k_w = (1/t)\ln(SK_b / SK_e) \tag{53}$$

เมื่อ dSK/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง SK มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1} day^{-1}

k_w คือ สัมประสิทธิ์การผุพังสลายตัวของ SK อันเนื่องมาจากสภาพภูมิอากาศ มีหน่วยเป็น day^{-1}

SK_b คือ ปริมาณ SK ก่อนทดลอง มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

SK_e คือ ปริมาณ SK หลังทดลอง มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

อัตราการเปลี่ยนแปลง IK สามารถคำนวณได้ดังสมการ (54)

$$dIK/dt = -k_w SK - k_r IK \tag{54}$$

เมื่ออินทริกรัลสมการ (54) จะได้

$$IK_t = \left[IK_b + \frac{k_w SK_b}{(k_w - k_r)} \right] \exp(-k_r t) - \left[\frac{k_w SK_b}{(k_w - k_r)} \right] \exp(-k_w t) \tag{55}$$

เมื่อ dIK/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง SK มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1} day^{-1}

k_r คือ สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยของ IK ไปเป็น LK มีหน่วยเป็น day^{-1}

IK_t คือ ปริมาณ IK ณ เวลา t มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

IK_b คือ ปริมาณ IK ก่อนการทดลอง มีเหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

อัตราการเปลี่ยนแปลง LK สามารถคำนวณได้ดังสมการ (56)

$$dLK/dt = k_r IK - k_d LK \tag{56}$$

เมื่ออินทริกรัลสมการ (56) จะได้

$$\begin{aligned} LK_t = & \left[IK_b + \frac{k_w k_r SK_b}{(k_w - k_r)(k_w - k_d)} + \frac{k_r}{(k_r - k_d)} \left[K_b + \frac{k_w SK_b}{(k_w - k_r)} \right] \right] \exp(-k_d t) \\ & - \frac{k_r}{k_r - k_d} \left[IK_b + \frac{k_w SK_b}{(k_w - k_r)} \right] \exp(-k_r t) - \left[\frac{k_w k_r SK_b}{(k_w - k_d)(k_w - k_r)} \right] \exp(-k_w t) \end{aligned} \tag{57}$$

เมื่อ dLK/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง LK มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1} day^{-1}

k_d คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับ LK ไปใช้ของพืช มีหน่วยเป็น day^{-1}

IK_t คือ ปริมาณ LK ณ เวลา t มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

IK_b คือ ปริมาณ LK ก่อนการทดลอง มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริมาณการ uptake โพแทสเซียมของพืชสามารถคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่าง LK ก่อนทดลองกับ LK หลังทดลอง ดังสมการ (58)

$$U = LK_b - LK_e \tag{58}$$

เมื่อ U คือ ปริมาณโพแทสเซียมที่พืช uptake มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1} สำหรับการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมนั้น สมมุติให้ละลายปุ๋ยได้อย่างรวดเร็วแล้วโพแทสเซียมจะถูกดูดซับไว้ที่ labile และถูกตรึงไว้ใน intermediate ทันที โดยมีสัดส่วนเป็น 75:25 ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณ LK และ IK หลังการใส่ปุ๋ยสามารถคำนวณได้จากสมการ (59) และ (60) ตามลำดับ

$$LK_{bf} = LK_b + 0.75F \tag{59}$$

$$IK_{bf} = IK_b + 0.25F \tag{60}$$

เมื่อ LK_{bf} คือ ปริมาณ LK หลังจากใส่ปุ๋ย มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

IK_{bf} คือ ปริมาณ IK หลังการใส่ปุ๋ย มีหน่วยเป็น mmol kg^{-1}

F คือ ปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียม

6. ฝนกรด

ฝนกรด (Acid rain) หมายถึง น้ำฝนที่มี pH ต่ำกว่า 5.6 ซึ่งสภาพกรดเกิดจากการละลายก๊าซในบรรยากาศ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ได้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนทริก (HNO_3) และตกลงมาเกิดเป็นฝนกรด โดยทั่วไปประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของฝนกรดเป็นกรดซัลฟิวริก และ 30 เปอร์เซ็นต์ เป็นกรดไนทริก แต่ถึงอย่างไรกระบวนการเกิดฝนกรดยังสามารถเกิดได้จากก๊าซที่เป็นมลพิษตัวอื่นๆ ได้อีก เช่น CO หรือก๊าซโอโซน (O_3) เป็นต้น (ฐนันดร์ศักดิ์, 2534; Environmental Resources Limited, 1983; Simachaya, 1993)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.1 ผลกระทบของฝนกรดต่อดิน

ฝนกรดจะส่งผลต่อความเป็นกรดในดิน เช่น ดินในพื้นที่ป่าไม้ของกลุ่มประเทศสมาชิกประชาคมยุโรป (European union, EU) เป็นดินที่มีความเป็นกรดซึ่งเกิดจากการได้รับอิทธิพลของฝนกรด และอาจทำให้เกิดการชะไนเทรตและธาตุอาหารที่สำคัญ เช่น เหล็ก อะลูมินัม แมงกานีส โบรอน ทองแดง สังกะสี จากดินลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของพืชลดลง ความต้านทานโรคและ แมลงลดลงได้ นอกจากนี้ฝนกรดยังชะล้างแคตไอออน เช่น K^{+}, Mg^{2+}และ Ca^{2+} ออกจากใบไม้ของพืชยืนต้น เช่น เมเปิ้ล สน และ สนเข็มไปสะสมอยู่ที่ฐานของต้นพืชร่วมกับธาตุอาหารอื่นๆ และทำให้กระบวนการย่อยสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในดินลดลง (ฐนันดร์ศักดิ์, 2534; Bade and Probert, 1993; Environmental Resources Ltd., 1983; Wark and Warner, 1981; Wellburn, 1990)

6.2 ผลกระทบของฝนกรดต่อจุลินทรีย์ดิน

Kytoviita *et al*. (1990) ศึกษาผลของฝนกรดสังเคราะห์ต่อจำนวนจุลินทรีย์ในดินทางตอนเหนือของฟินแลนด์ โดยพื้นที่เปรียบเทียบ (control) ได้รับน้ำ pH 6 ส่วนพื้นที่ได้รับฝนกรดจะได้รับกรดซัลฟิวริกผสมกับกรดไนทริก ปรับ pH ให้เป็น 3.0 หลังจากพื้นที่ทดลองได้รับน้ำฝนต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ฤดูกาลเพาะปลูก พบว่าในดินที่ได้รับฝนกรดพบจำนวนแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ประโยชน์จากแป้ง โปรตีน เพคติน ไซลิน และเซลลูโลส น้อยกว่าในดินที่ไม่ได้รับฝนกรดประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์

Greszta *et al*. (1992) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในดินที่ได้รับฝนกรดสังเคราะห์ pH 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.8 เป็นเวลา 2 ฤดูกาลเพาะปลูก พบว่าในดินที่ได้รับฝนกรดขบวนการ nitrification การย่อยสลายเซลลูโลส และการหายใจในดินถูกยับยั้ง ในขณะที่ขบวนการ ammonification ถูกกระตุ้น

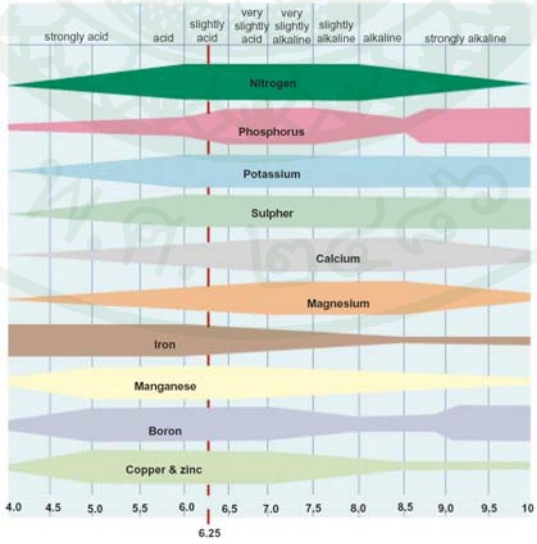
Miller *et al*. (1991) ศึกษาจำนวนจุลินทรีย์ในดินพบว่า nitrite oxidizing bacteria มีจำนวนลดลงในตัวอย่างที่ได้รับฝนกรด pH 4.2 และ 3.0 ในพื้นที่ปลูกข้าวโพด และตัวอย่างที่ได้รับฝนกรด pH 3.0 ในพื้นที่ปลูกถั่วเหลือง ส่วนพื้นที่ปลูกข้าวโพดที่ได้รับฝนกรด pH 3.0 จำนวน thiosulphate oxidizing bacteria สูงขึ้น แต่ heterotrophic bacteria ทั่วไปต่ำลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุธารัตน์ (2538) ศึกษาผลกระทบของฝนกรดต่อจุลินทรีย์ในดิน พบว่าดินที่ได้รับน้ำฝนปริมาณ 20 มิลลิลิตรต่อวัน ที่ระดับ pH 5.0, 4.0 และ 3.0 ไม่ส่งผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ทั่วไป ส่วนดินที่ได้รับน้ำฝนปริมาณ 70 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่าน้ำฝน pH 4.0 และ 3.0 ส่งผลต่อปริมาณแบคทีเรีย แอคติโนมัยซิส และแอมโมนิฟายอิ้งแบคทีเรีย

6.3 ผลกระทบของฝนกรดทางอ้อมอื่นๆ

อาจกล่าวได้ว่าการเกิดฝนกรดจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ pH ภายในชั้นหน้าตัดดิน ซึ่งจะเกี่ยวโยงไปถึงระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชที่อยู่ในดิน เช่น สารประกอบของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี จะละลายได้น้อยลง เมื่อ pH ของดินเพิ่มจาก 5.0 เป็น 7.5 หรือ 8.0 ขณะเดียวกันโมลิบดินัมจะละลายออกมาให้พืชใช้ได้ดีขึ้นในดินที่มี pH สูงๆ ซึ่งในสภาพดังกล่าวมักมีไบคาร์บอเนตสะสมอยู่มาก และถ้าไบคาร์บอเนตมีมากเกินไปอาจยับยั้งการดูดธาตุอาหารและน้ำของพืชได้ หากดินเป็นกรดหรือ pH ต่ำกว่า 5.0 อะลูมินัม เหล็ก และแมงกานีสมักจะละลายออกมามากจนอาจเป็นพิษต่อพืช ส่วนฟอสฟอรัสที่ระดับ pH 6.0-7.0 จะละลายออกมาได้มากที่สุด หากต่ำกว่า 5.0 ลงมาหรือสูงกว่า 7.0 ขึ้นไป ฟอสฟอรัสจะเหลืออยู่ในสารละลายดินน้อยมาก เพราะถูกตรึงด้วยเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีสเมื่อดินเป็นกรด และถูกตรึงด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียมเมื่อดินเป็นด่าง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงอิทธิพลระหว่างระดับ pH ของดินต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช

ที่มา: คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์

2. โปรแกรม Microsoft Office Excel 2003

3. ข้อมูลสมบัติทางเคมีบางประการของชุดดินบางกอก จากงานทดลองการศึกษาอิทธิพลของฝนจำลองที่มีองค์ประกอบของอนุมูลซัลเฟตต่อสมบัติเคมีและธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน (จิตตานันท์, 2549)

วิธีการ

1. แบบจำลองไนโตรเจนในดิน

สร้างแบบจำลองไนโตรเจนโดยใช้กฎสมดุลมวลของไนโตรเจน (N-mass conservation) ในรูปสมการแอมไพริเกิ้ล (empirical model) โดยพัฒนามาจากกระบวนการการได้มา การเปลี่ยนรูปและการสูญเสียมวลของ NH_4^+ และ NO_3^- ในสารละลายดินและอินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N) ในดิน อ้างอิงสมการตามแบบของ Mehran and Tanji (1974) และ Richter (1987) แบบจำลองไนโตรเจนที่ใช้จึงเขียนได้ดังสมการ (61)

$$\frac{\partial}{\partial t}N_{Total} = K_1\frac{\partial}{\partial t}N_{NH^+_{4(S)}} + K_2\frac{\partial}{\partial t}N_{NO^-_{3(S)}} + K_3\frac{\partial}{\partial t}N_{Org.N} + K_4 \qquad (61)$$

เมื่อ $\frac{\partial}{\partial t}N_{Total}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล N ทั้งหมด มีหน่วยเป็นมวลไนโตรเจนต่อเวลา (g-N day^{-1})

$\frac{\partial}{\partial t}N_{NH^+_{4(S)}}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล N ของ NH_4^+ ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น g-N day^{-1} ตัวห้อย (S) ระบุว่าอยู่ในสารละลายดิน

$\frac{\partial}{\partial t}N_{NO^-_{3(S)}}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล N ของ NO_3^- ในสารละลายดิน มีหน่วยเป็น g-N day^{-1} ตัวห้อย (S) ระบุว่าอยู่ในสารละลายดิน

$\frac{\partial}{\partial t}N_{Org.N}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลอินทรีย์ไนโตรเจนในดินทั้งหมด มีหน่วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เป็น g-N day^{-1}

K_1, K_2, K_3 คือ ค่าคงที่กำหนดขนาดอิทธิพลของปริมาณมวล NH_4^+, NO_3^-, Org-N ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ตามลำดับ ไม่มีหน่วย

K_4 คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนรูปอื่นๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนทั้งหมดในดิน เช่น สารประกอบเชิงซ้อนที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น กำหนดให้เป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็น g-N day^{-1}

ค่าอนุพันธ์ของมวลไนโตรเจนทั้งหมดในดิน เขียนในรูปผลต่างของมวล 2 เวลาได้ในรูป

$$N_{Total}^{t} = N_{Total}^{t-1} + \frac{\partial}{\partial t} N_{Total}(\Delta t) \tag{62}$$

เมื่อ N_{Total}^{t} คือ ปริมาณมวล N ทั้งหมดในดินที่เวลา t มีหน่วยเป็น g-N

N_{Total}^{t-1} คือ ปริมาณมวล N ทั้งหมดในดินที่เวลาก่อนหน้า t-1 มีหน่วยเป็น g-N และ

Δt คือ ผลต่างของเวลา t และ t-1

พจน์ $\frac{\partial}{\partial t} N_{NH_{4(S)}^+}$ ในสมการ (61) กำหนดให้เป็นฟังก์ชันของปริมาณแอมโมเนียมในสารละลายดิน ($N_{NH_{4(S)}^+}$) ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ความหนาแน่นดินรวม (ρ_b) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) และพืชที่ปลูก (plant) ซึ่งใช้มวลพืชส่วนเหนือดิน ที่เวลา t-1 ซึ่งสามารถเขียนสมการสำหรับพจน์นี้ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} N_{NH_{4(S)}^+} = f(pH, \rho_b, OM, plant, N_{NH_{4(S)}^+}^{t-1}) \tag{63}$$

เมื่อ

$$f(pH, \rho_b, OM, plant, N_{NH_{4(S)}^+}^{t-1}) = (K_5[pH^{t-1}] + K_6[\rho_b^{t-1}] + K_7[OM^{t-1}] + K_8[plant^{t-1}])N_{NH_{4(S)}^+}^{t-1} \tag{64}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พจน์ K_5, K_6, K_7, K_8 คือค่าคงที่กำหนดขนาดของอิทธิพลปัจจัยดินและพืชต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NH_{4(S)}^+}$ ในสารละลายดิน K_5 มีหน่วยเป็น day^{-1} K_6 มีหน่วยเป็น $(Mg\ m^{-3}\ day)^{-1}$ K_7 มีหน่วยเป็น $(\%\ day)^{-1}$ K_8 มีหน่วยเป็น $(g\ day)^{-1}$ ส่วน pH ไม่มีหน่วย ρ_b มีหน่วยเป็น $Mg\ m^{-3}$ OM มีหน่วยเป็น %, และ plant มีหน่วยเป็น g

ค่าอนุพันธ์ของมวลไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมในสารละลายดิน เขียนในรูปผลต่างของมวล 2 เวลาได้ในรูป

$$N^{t}_{NH_{4(S)}^+} = N^{t-1}_{NH_{4(S)}^+} + \frac{\partial}{\partial t} N_{NH_{4(S)}^+} (\Delta t) \tag{65}$$

เมื่อ $N^{t}_{NH_{4(S)}^+}$ คือ ปริมาณมวล N ของ NH_4^+ ในสารละลายดินที่เวลา t มีหน่วยเป็น g-N

$N^{t-1}_{NH_{4(S)}^+}$ คือ ปริมาณมวล N ของ NH_4^+ ในสารละลายดินที่เวลาก่อนหน้า มีหน่วยเป็น g-N

Δt คือ ผลต่างของเวลา t และ t-1

พจน์ของ $\frac{\partial}{\partial t} N_{NO_{3(S)}^-}$ ในสมการ [61] กำหนดให้เป็นฟังก์ชันของปริมาณไนเตรตในสารละลายดิน ($N_{NO_{3(S)}^-}$) ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ความชื้นดินโดยมวล (θ_m) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) และพืชที่ปลูก (plant) ซึ่งใช้มวลของพืชส่วนเหนือดิน (plant) ที่เวลา t-1 ซึ่งสามารถเขียนสมการสำหรับพจน์นี้ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} N_{NO_{3(S)}^-} = f(pH, \theta_m, OM, plant, N^{t-1}_{NO_{3(S)}^-}) \tag{66}$$

เมื่อ

$$f(pH, \theta_m, OM, plant, N^{t-1}_{NO_{3(S)}^-}) = (K_9[pH^{t-1}] + K_{10}[\theta_m^{t-1}] + K_{11}[OM^{t-1}] + K_{12}[plant^{t-1}])N^{t-1}_{NO_{3(S)}^-} \tag{65}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พจน์ $K_9, K_{10}, K_{11}, K_{12}$ คือค่าคงที่กำหนดขนาดของอิทธิพลปัจจัยดินและพืชต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของ $N_{NO_{3(S)}^-}$ ในสารละลายดิน K_9, K_{10} มีหน่วยเป็น day^{-1} K_{11} มีหน่วยเป็น (% day)$^{-1}$ K_{12} มีหน่วยเป็น (g day)$^{-1}$ และพืชที่ปลูก (plant) θ_m ไม่มีหน่วย ส่วนหน่วยของ pH, OM และ plant กำหนดไว้แล้วก่อนหน้า

ค่าอนุพันธ์ของมวลไนโตรเจนในรูปไนเตรตในสารละลายดิน เขียนในรูปผลต่างของมวล 2 เวลาได้ในรูป

$$N^{t}_{NO_{3(S)}^-} = N^{t-1}_{NO_{3(S)}^-} + \frac{\partial}{\partial t} N_{NO_{3(S)}^-} (\Delta t) \tag{68}$$

เมื่อ $N^{t}_{NO_{3(S)}^-}$ คือ ปริมาณมวล N ของ NO_3^- ในสารละลายดินที่เวลา t มีหน่วยเป็น g-N

$N^{t-1}_{NO_{3(S)}^-}$ คือ ปริมาณมวล N ของ NO_3^- ในสารละลายดินที่เวลาก่อนหน้า มีหน่วยเป็น g-N

Δt คือ ผลต่างของเวลา t และ t-1

พจน์ของ $\frac{\partial}{\partial t} N_{Org.N}$ ในสมการ (61) กำหนดให้เป็นฟังก์ชันของปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ($N_{Org.N}$) ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ความชื้นดินโดยมวล (θ_m) และความหนาแน่นดินรวม (ρ_b) ที่เวลา t-1 ซึ่งสามารถเขียนสมการสำหรับพจน์นี้ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} N_{Org.N} = f(pH, \theta_m, \rho_b, N^{t-1}_{Org.N}) \tag{69}$$

เมื่อ

$$f(pH, \theta_m, \rho_b, N^{t-1}_{Org.N}) = (K_{13}[pH^{t-1}] + K_{14}[\theta_m^{t-1}] + K_{15}[\rho_b^{t-1}] + K_{16}) N^{t-1}_{Org.N} \tag{70}$$

พจน์ K_{13}, K_{14}, K_{15} คือค่าคงที่กำหนดขนาดของอิทธิพลปัจจัยดินต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ($N_{Org.N}$) K_{16} คือค่าคงที่กำหนดขนาดของอิทธิพลปัจจัยทางดินอื่นๆ เช่นอุณหภูมิดิน เป็นต้น ส่วน K_{13}, K_{14}, K_{16} มีหน่วยเป็น day^{-1} และ K_{15} มีหน่วยเป็น (Mg m^{-3} day)$^{-1}$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าอนุพันธ์ของมวลไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน เขียนในรูปผลต่างของมวล 2 เวลาได้ในรูป

$$N_{Org.N}^{t} = N_{Org.N}^{t-1} + \frac{\partial}{\partial t} N_{Org.N}(\Delta t) \qquad (71])$$

เมื่อ $N_{Org.N}^{t}$ คือ ปริมาณมวล N ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดินที่เวลา t มีหน่วยเป็น g-N

$N_{Org.N}^{t-1}$ คือ ปริมาณมวล N ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดินที่เวลาก่อนหน้า มีหน่วยเป็น g-N

Δt คือ ผลต่างของเวลา t และ t-1

2. แบบจำลองฟอสฟอรัสในดิน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน กำหนดให้เป็นฟังก์ชันของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (P_{Avai}) ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ความชื้นดินโดยมวล (θ_m) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) และพืชที่ปลูกโดยใช้มวลของพืชส่วนเหนือดิน (plant) ที่เวลา t-1 ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} P_{Avai} = f(pH, \theta_m, OM, plant, P_{Avai}^{t-1}) \qquad (72)$$

เมื่อ

$$f(pH, \theta_m, OM, plant, P_{Avai}^{t-1}) = (K_{17}[pH^{t-1}] + K_{18}[\theta_m^{t-1}] + K_{19}[OM^{t-1}] + K_{20}[plant^{t-1}])P_{Avai}^{t-1} \qquad (73)$$

เมื่อ $\frac{\partial}{\partial t} P_{Avai}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ มีหน่วยเป็นมวลฟอสฟอรัสต่อเวลา (g-P day^{-1})

P_{Avai}^{t-1} คือ ปริมาณมวลฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่เวลาก่อนหน้า (t-1) มีหน่วยเป็นมวลฟอสฟอรัส (g-P)

$K_{17}, K_{18}, K_{19}, K_{20}$ คือ ค่าคงที่กำหนดขนาดของอิทธิพลปัจจัยดินและพืชต่อการเปลี่ยน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แปลง P_{Avai} ในดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}, day^{-1}, $(\%\ day)^{-1}$, $(g\ day)^{-1}$ ตามลำดับ

ค่าอนุพันธ์ของมวลฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ในดิน เขียนในรูปผลต่างของมวล 2 เวลาได้ในรูป

$$P_{Avai}^{t} = P_{Avai}^{t-1} + \frac{\partial}{\partial t} P_{Avai}(\Delta t) \tag{74}$$

เมื่อ P_{Avai}^{t} คือ ปริมาณมวล P ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ในดินที่เวลา t มีหน่วยเป็น g-P

P_{Avai}^{t-1} คือ ปริมาณมวล P ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ในดินที่เวลาก่อนหน้า มีหน่วยเป็น g-P

Δt คือ ผลต่างของเวลา t และ t-1

3. แบบจำลองโพแทสเซียมในดิน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน กำหนดให้เป็นฟังก์ชันของปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ความชื้นดินโดยมวล (θ_m) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) และพืชที่ปลูกโดยใช้มวลของพืชส่วนเหนือดิน (plant) ที่เวลา t-1 ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} K_{Exch} = f(pH, \theta_m, OM, plant, K_{Exch}^{t-1}) \tag{75}$$

เมื่อ

$$f(pH, \theta_m, OM, plant, K_{Exch}^{t-1}) = (K_{21}[pH^{t-1}] + K_{22}[\theta_m^{t-1}] + K_{23}[OM^{t-1}] + K_{24}[plant^{t-1}])K_{Exch}^{t-1} \tag{76}$$

เมื่อ $\frac{\partial}{\partial t} K_{Exch}$ คือ อัตราการการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีหน่วยเป็นมวลโพแทสเซียมต่อเวลา ($g\text{-}K\ day^{-1}$)

K_{Exch}^{t-1} คือ ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ที่เวลาก่อนหน้า มีหน่วยเป็นมวลโพแทสเซียม (g-K)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$K_{21}, K_{22}, K_{23}, K_{24}$ คือ ค่าคงที่กำหนดขนาดของอิทธิพลปัจจัยดินและพืชต่อการเปลี่ยนแปลง K_{Exch} ในดิน มีหน่วยเป็น day^{-1}, day^{-1}, $(\%\ day)^{-1}$, $(g\ day)^{-1}$ ตามลำดับ

ค่าอนุพันธ์ของมวลโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน เขียนในรูปผลต่างของมวล 2 เวลา ได้ในรูป

$$K_{Exch}^{t} = K_{Exch}^{t-1} + \frac{\partial}{\partial t} K_{Exch}(\Delta t) \qquad (77)$$

เมื่อ K_{Exch}^{t} คือ ปริมาณมวล K ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่เวลา t มีหน่วยเป็น g-K

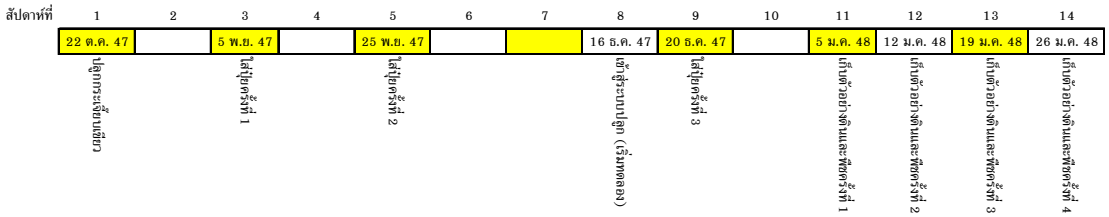
K_{Exch}^{t-1} คือ ปริมาณมวล K ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่เวลาก่อนหน้า มีหน่วยเป็น g-K

Δt คือ ผลต่างของเวลา t และ t-1

4. การหาค่าคงที่

ใช้ข้อมูลจากวิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของฝนจำลองที่มีอนุมูลซัลเฟตและออก-ไซด์ของไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบต่อสมบัติเคมีและธาตุอาหารในดิน (จิตตานันท์, 2549) เฉพาะข้อมูลของชุดดินอยุธยา (Ay) ที่ปลูกกระเจี๊ยบเขียวและได้รับฝนจำลองที่ปรับค่าด้วยอนุมูลซัลเฟตให้มี pH ของฝนระดับต่างกัน 4 ขนาด ได้แก่ pH 6.7 (น้ำเปล่า), 5.0, 4.0 และ 3.0 เริ่มให้ฝนกรดจำลองเมื่อกระเจี๊ยบเขียวมีอายุ 55 วัน (เริ่มทดลอง) เก็บตัวอย่างดินและพืชในวันที่ 0, 22, 29, 36 และ 43 วันหลังการทดลอง (ภาพที่ 11) ข้อมูลที่ใช้เป็นดังตารางที่ 3, 4 และ 5 และตั้งแต่เริ่มปลูกกระเจี๊ยบเขียวจนสิ้นสุดการทดลองให้ฝนกรดจำลองได้มีการใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 3 กรัมต่อต้น จำนวน 3 ครั้ง (ภาพที่ 11)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 11 ช่วงเวลาการปฏิบัติงานของการศึกษาอิทธิพลของฝนกรดจำลองที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟตในชุดดินอยุธยาที่ปลูกกระเจี๊ยบเขียวเป็นพืชทดสอบ

ที่มา: จิตตานันท์ (2549)

การหาค่าคงที่เริ่มโดยอาศัยระเบียบวิธีการของ Newton-Raphson เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าคงที่ที่ต้องการ แล้วนำค่าคงที่ที่ได้มาตรวจสอบว่าสามารถคาดการณ์สถานการณ์ได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยใช้ค่า standardized bias (R) เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน แอมโมเนียม ไนเทรต อินทรีย์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ณ เวลา 22, 29, 36 และ 43 ที่ใช้ค่าคงที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากข้อมูลจริง ถ้าค่า standardized bias (R) มีค่าน้อยกว่า $|0.10|$ หมายความว่าค่าคงที่ที่ได้สามารถนำมาใช้ได้ (Graf *et al*.,1991)

ค่าคงที่ที่ผ่านการตรวจสอบแล้วในแต่ละระดับ pH ของฝนกรดจำลอง จะเป็นตัวกำหนดอิทธิพลของปัจจัยนั้นต่อการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน โดยค่าคงที่ K_1, K_2, K_3, K_4 จะเป็นตัวกำหนดขนาดของอิทธิพลของปริมาณแอมโมเนียม ไนเทรต อินทรีย์ไนโตรเจน และไนโตรเจนรูปอื่นๆ ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลไนโตรเจนทั้งหมดในดินตามลำดับ ค่าคงที่ K_5, K_6, K_7, K_8 จะเป็นตัวกำหนดขนาดของอิทธิพลของ pH ดิน ความหนาแน่นดิน ปริมาณอินทรียวัตถุ และพืชที่ปลูกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมในสารละลายดินตามลำดับ ค่าคงที่ $K_9, K_{10}, K_{11}, K_{12}$ เป็นตัวกำหนดขนาดของอิทธิพลของ pH ดิน ความชื้นในดิน ปริมาณอินทรียวัตถุ และพืชที่ปลูกต่อการเปลี่ยนแปลงไนเตรตในสารละลายดิน ตามลำดับ

ค่าคงที่ $K_{13}, K_{14}, K_{15}, K_{16}$ เป็นตัวกำหนดขนาดของอิทธิพลของ pH ดิน ความหนาแน่นดิน ความชื้นในดิน และพืชที่ปลูกต่อการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน ตามลำดับ ค่าคงที่ $K_{17}, K_{18}, K_{19}, K_{20}$ เป็นตัวกำหนดขนาดของอิทธิพลของ pH ดิน ความชื้นในดิน ปริมาณ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อินทรียวัตถุ และพืชที่ปลูกต่อการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และค่าคงที่ $K_{21}, K_{22}, K_{23}, K_{24}$ เป็นตัวกำหนดขนาดของอิทธิพลของ pH ดิน ความชื้นในดิน ปริมาณอินทรียวัตถุ และพืชที่ปลูกต่อการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ตามลำดับ

การหาค่าคงที่อาศัยระเบียบวิธีการของ Newton-Raphson (Jorg, 1990) ซึ่งเป็นการทำซ้ำๆ เมื่อปรับปรุงค่าคำตอบทำได้โดยให้ $\vec{K}$ คือเซตของค่าคงที่ที่ต้องการหาคำตอบ เช่น $\vec{K} = \{K_1, K_2, ..., K_{16}\}$ สำหรับการหาค่าคงที่แบบจำลองไนโตรเจน และให้ ^{i} เป็นดัชนีทำซ้ำ ค่า $\vec{K}^{i+1}$ ที่เป็นคำตอบต้องทำให้ $\left|\vec{K}^{i} - \vec{K}^{i+1}\right| < 1.0\text{x}10^{-7}$

$$\vec{K}^{i+1} = \vec{K}^{i} - \frac{f(\vec{K}^{i})}{f'(\vec{K}^{i})} \quad \text{เมื่อ} \quad f'(\vec{K}^{i}) \approx \frac{f(\vec{K}^{i} + \Delta K) - f(\vec{K}^{i})}{\Delta K} \tag{78}$$

ในงานวิจัยนี้ใช้ ΔK มีขนาดเท่ากับ $1.0\text{x}10^{-5}$ และการหาคำตอบค่าคงที่แบบนี้ จะขึ้นอย่างมากกับค่าเริ่มต้น $\vec{K}^{i}$ ถ้ามีค่าไม่เหมาะสม วิธีการจะไม่สามารถให้คำตอบ จึงหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวด้วยการแบ่งแบบจำลองไนโตรเจนเป็น 4 ส่วน และจัดรูปสมการ เป็น (79), (80), (81) และ (82)

$$f(\vec{K}) = f(K_1,..,K_4) = K_1 \frac{\partial}{\partial t} N_{NH_{4(S)}^{+}} + K_2 \frac{\partial}{\partial t} N_{NO_{3(S)}^{-}} + K_3 \frac{\partial}{\partial t} N_{Org.N} + K_4 - \frac{\partial}{\partial t} N_{Total} = 0 \tag{79}$$

$$f(\vec{K}) = f(K_5,...,K_8) = (K_5[pH^{t-1}] + K_6[\rho_b^{t-1}] + K_7[OM^{t-1}] + K_8[plant^{t-1}])N_{NH_{4(S)}^{+}}^{t-1} - \frac{\partial}{\partial t} N_{NH_{4(S)}^{+}} = 0 \tag{80}$$

$$f(\vec{K}) = f(K_9,...,K_{12}) = (K_9[pH^{t-1}] + K_{10}[\theta_m^{t-1}] + K_{11}[OM^{t-1}] + K_{12}[plant^{t-1}])N_{NH_{4(S)}^{+}}^{t-1} - \frac{\partial}{\partial t} N_{NO_{3(S)}^{-}} = 0 \tag{81}$$

$$f(\vec{K}) = f(K_{13},...,K_{16}) = (K_{13}[pH^{t-1}] + K_{14}[\rho_b^{t-1}] + K_{15}[\theta_m^{t-1}] + K_{16})N_{Org.N}^{t-1} - \frac{\partial}{\partial t} N_{Org.N} = 0 \tag{82}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การหาค่าคงที่ในแต่ละส่วนจะใช้สมการ (78) ในการหาคำตอบของค่าคงที่ โดยเริ่มหาค่าคงที่ของ $\vec{K}_i = \{K_1,...,K_4\}$ ก่อนแล้วจึงหาค่าคงที่ $\vec{K}_i = \{K_5,...,K_8\}$, $\vec{K}_i = \{K_9,...,K_{12}\}$, และ $\vec{K}_i = \{K_{13},...,K_{16}\}$ ตามลำดับ

การหาค่าคงที่ K_1, K_2, K_3, K_4 เริ่มโดยใช้ค่า Total N, NH_4^+, NO_3^-, และ Org-N ณ เวลา 0, 22, 29, 36 และ 43 วัน (ตารางที่ 3, pH 6.7) หา $\frac{\partial}{\partial t}N_{Total}$, $\frac{\partial}{\partial t}N_{NH_{4(S)}^+}$, $\frac{\partial}{\partial t}N_{NO_{3(S)}^-}$, และ $\frac{\partial}{\partial t}N_{Org.N}$ โดยใช้สมการ (62), (65), (68), และ (71) ตามลำดับ ในช่วงเวลา 0-22, 22-29, 29-36 และ 36-43 วัน ซึ่ง Δt ที่ใช้เป็น 22, 7, 7 และ 7 วัน ตามลำดับ แล้วแทนค่าลงในสมการ (79) จากนั้นสมมุติค่าชั่วคราวของ K_1, K_2, K_3, K_4 แทนลงในสมการ (79) เพื่อคำนวณค่า $f(\vec{K}^i)$ ที่ค่าชั่วคราวของ K_1, K_2, K_3, K_4 จะได้ $f(\vec{K}^i)$ 4 ฟังก์ชัน คือที่เวลา 0-22, 22-29, 29-36 และ 36-43 วัน เขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ขนาด 4x1 แทนค่าลงในสมการ (78) แล้วคำนวณ partial derivative ของทุกฟังก์ชันเทียบกับ K_1, K_2, K_3, K_4 หรือ $f'(\vec{K}^i)$ เขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ขนาด 4x4 แทนค่าลงในสมการ (78) จะได้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{0-22}}{\partial K_1} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{0-22}}{\partial K_2} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{0-22}}{\partial K_3} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{0-22}}{\partial K_4} \\ \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{22-29}}{\partial K_1} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{22-29}}{\partial K_2} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{22-29}}{\partial K_3} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{22-29}}{\partial K_4} \\ \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{29-36}}{\partial K_1} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{29-36}}{\partial K_2} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{29-36}}{\partial K_3} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{29-36}}{\partial K_4} \\ \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{36-43}}{\partial K_1} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{36-43}}{\partial K_2} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{36-43}}{\partial K_3} & \frac{\partial f(\vec{K}^i)_{36-43}}{\partial K_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1^i - K_1^{i+1} \\ K_2^i - K_2^{i+1} \\ K_3^i - K_3^{i+1} \\ K_4^i - K_4^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\vec{K}^i)_{0-22} \\ f(\vec{K}^i)_{22-29} \\ f(\vec{K}^i)_{29-36} \\ f(\vec{K}^i)_{36-43} \end{bmatrix} \quad (83)$$

แก้สมการ (83) เพื่อหาค่า $\vec{K}^i - \vec{K}^{i+1}$ ต่อไป ค่า $\vec{K}^{i+1}$ ที่เป็นคำตอบของค่า K_1, K_2, K_3, K_4 นั้นคือ $\left|\vec{K}^i - \vec{K}^{i+1}\right| < 1.0\text{x}10^{-7}$ เมื่อได้คำตอบของค่า K_1, K_2, K_3, K_4 แล้วจึงหาเซตค่าคงที่ $K_5,..., K_8$ โดยใช้ค่า NH_4^+ และสมบัติดินที่เป็นฟังก์ชันของเวลา (ตารางที่ 3, pH 6.7) $K_9,..., K_{12}$ ใช้ค่า NO_3^- และสมบัติดินที่เป็นฟังก์ชันของเวลา (ตารางที่ 3, pH 6.7) และ $K_{13},..., K_{16}$ ใช้ค่า Org-N และสมบัติดินที่เป็นฟังก์ชันของเวลา (ตารางที่ 3, pH 6.7) หาค่าคงที่ในลักษณะเดียวกับการหาค่า $K_1,..., K_4$ สำหรับการหาค่าคงของระดับ pH ฝน 5.0, 4.0 และ 3.0 ก็ทำได้ในทำนองเดียวกันกับการหาค่าคงที่ของระดับ pH ฝนเท่ากับ 6.7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อได้ค่าคำตอบ $\vec{K}_i$ ทั้ง 16 ตัวของแบบจำลองไนโตรเจนในแต่ละระดับ pH ฝนแล้ว นำค่าคงที่ที่ได้เป็นตัวเริ่มต้นในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียม ไนเทรต อินทรีย์ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมดในดินของแบบจำลองไนโตรเจน โดยใช้ผลต่างของเวลาเป็น 1 วัน ผลของการคาดการณ์ของแบบจำลองจะมีความแม่นยำเพียงใดนั้น จะใช้ค่า standardized bias (R) ที่เสนอโดย Graf *et al*. (1991) เป็นดัชนีบ่งชี้ ค่า R สามารถคำนวณได้ในรูป

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{n}(O_i)} \tag{84}$$

เมื่อ S คือค่าคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง O คือค่าที่ได้จากข้อมูลจริง ตัวห้อย i หมายถึงตัวข้อมูลที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบผล ในที่นี้ i จะหมายถึงค่าของ Total N, NH_4^+, NO_3^- และ Org-N ในแต่ละช่วงเวลาที่มีข้อมูล คือ ณ เวลาที่ 22, 29, 36 และ 43 (ตารางที่ 3) ทำให้มีค่าที่ใช้ตรวจสอบทั้งหมด 4 ค่าหรือ n=4 ตามปกติค่า R ที่คำนวณได้อาจมีทั้งบวกและลบ ค่าบวกหมายถึงค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากข้อมูลจริง (overestimate) ค่าลบหมายถึงค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากข้อมูลจริง (underestimate) โดยทั่วไปค่า $R < |0.10|$ จึงจะทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำในการคาดการณ์

การหาค่าคงที่ของแบบจำลองฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมทำได้เช่นเดียวกับการหาค่า $K_1,...,K_4$ ในแบบจำลองไนโตรเจน โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 4 และ 5 จัดรูปแบบสมการเป็น

$$\begin{aligned} f(\vec{K}) = f(K_{17},...,K_{20}) = (K_{17}[pH^{t-1}] + K_{18}[\theta_m^{t-1}] + K_{19}[OM^{t-1}] \\ + K_{20}[plant^{t-1}])P_{Avai}^{t-1} - \frac{\partial}{\partial t}P_{Avai} = 0 \end{aligned} \tag{85}$$

$$\begin{aligned} f(\vec{K}) = f(K_{21},...,K_{24}) = (K_{21}[pH^{t-1}] + K_{22}[\theta_m^{t-1}] + K_{23}[OM^{t-1}] \\ + K_{24}[plant^{t-1}])K_{Exch}^{t-1} - \frac{\partial}{\partial t}K_{Exch} = 0 \end{aligned} \tag{86}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าคงที่ $K_1, K_2, \ldots, K_{16}$ ของแบบจำลองไนโตรเจนในแต่ละระดับ pH ฝนต่างๆ

สมบัติดิน		ค่าสมบัติดินที่เก็บข้อมูลหลังการทดลอง (วัน)									
		0	22	29	36	43	0	22	29	36	43
		ฝนกรดจำลอง pH 6.7					ฝนกรดจำลอง pH 5.0				
ρ_b	($Mg\ m^{-3}$)	1.54	1.62	1.62	1.62	1.62	1.54	1.58	1.58	1.58	1.58
θ_m		0.06	0.43	0.55	0.50	0.45	0.06	0.42	0.59	0.46	0.46
pH		7.397	6.973	6.778	6.402	7.093	7.40	7.12	7.15	6.46	7.03
OM	(%)	1.54	3.60	3.20	3.18	3.24	1.54	3.97	3.53	3.43	3.60
Total N	(g-N)	17.788	30.168	24.561	28.572	27.325	18.093	27.581	28.540	29.698	26.479
NH_4^+	(g-N)	0.721	0.685	0.126	0.215	0.148	0.734	1.134	0.151	0.235	0.143
NO_3^-	(g-N)	0.313	1.923	0.143	0.426	0.075	0.318	0.478	0.303	0.504	0.095
Org-N	(g-N)	10.243	25.156	22.362	22.211	22.612	10.419	27.547	24.512	23.830	24.972
Dry plant	(g)	8.155	9.102	9.878	11.187	12.425	16.350	17.410	17.240	17.450	17.490

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สมบัติดิน	ค่าสมบัติดินที่เก็บข้อมูลหลังการทดลอง (วัน)									
	0	22	29	36	43	0	22	29	36	43
	ฝนกรดจำลอง pH 4.0					ฝนกรดจำลอง pH 3.0				
ρ_b ($Mg\ m^{-3}$)	1.54	1.58	1.58	1.58	1.58	1.54	1.58	1.58	1.58	1.58
θ_m	0.06	0.36	0.40	0.45	0.38	0.06	0.33	0.37	0.50	0.35
pH	7.40	6.55	6.39	6.55	6.64	7.40	6.94	6.11	6.31	6.61
OM (%)	1.54	3.93	3.66	3.60	3.53	1.54	4.28	3.98	3.79	3.87
Total N (g-N)	18.440	30.730	29.719	28.628	28.320	15.317	28.148	27.897	26.748	23.904
NH_4^+ (g-N)	0.748	0.882	0.156	0.200	0.152	0.621	0.837	0.201	0.236	0.139
NO_3^- (g-N)	0.324	3.974	0.493	0.361	0.242	0.269	2.013	0.904	0.300	0.132
Org-N (g-N)	10.619	27.821	25.908	25.487	24.969	8.820	25.158	23.400	22.296	22.768
Dry plant (g)	14.953	16.091	16.025	15.822	16.588	16.036	17.044	17.251	16.897	18.318

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าคงที่ K_{17}, K_{18},..., K_{20} ของแบบจำลองฟอสฟอรัสในระดับ pH ฝนต่างๆ

สมบัติดิน		ค่าสมบัติดินที่เก็บข้อมูลหลังการทดลอง (วัน)									
		0	22	29	36	43	0	22	29	36	43
		ฝนกรดจำลอง pH 6.7					ฝนกรดจำลอง pH 5.0				
θ_m		0.06	0.43	0.55	0.50	0.45	0.06	0.42	0.59	0.46	0.46
pH		7.39	6.97	6.78	6.40	7.09	7.40	7.12	7.15	6.46	7.03
OM	(%)	1.54	3.60	3.20	3.18	3.24	1.54	3.97	3.53	3.43	3.60
Avai. P	(g-P)	0.724	1.486	1.903	1.316	1.513	0.736	1.018	1.811	1.436	1.336
Dry plant	(g)	8.155	9.102	9.878	11.187	12.425	16.350	17.410	17.240	17.450	17.490
		ฝนกรดจำลอง pH 4.0					ฝนกรดจำลอง pH 3.0				
θ_m		0.06	0.36	0.40	0.45	0.38	0.06	0.33	0.37	0.50	0.35
pH		7.40	6.55	6.39	6.55	6.64	7.40	6.94	6.11	6.31	6.61
OM	(%)	1.54	3.93	3.66	3.60	3.53	1.54	4.28	3.98	3.79	3.87
Avai. P	(g-P)	0.750	2.047	1.815	1.401	1.365	0.623	2.236	2.178	1.804	1.352
Dry plant	(g)	14.953	16.091	16.025	15.822	16.588	16.036	17.044	17.251	16.897	18.318

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าคงที่ K_{21}, K_{22},..., K_{24} ของแบบจำลองโพแทสเซียมในระดับ pH ฝนต่างๆ

สมบัติดิน		ค่าสมบัติดินที่เก็บข้อมูลหลังการทดลอง (วัน)									
		0	22	29	36	43	0	22	29	36	43
		ฝนกรดจำลอง pH 6.7					ฝนกรดจำลอง pH 5.0				
θ_m		0.06	0.43	0.55	0.50	0.45	0.06	0.42	0.59	0.46	0.46
pH		7.39	6.97	6.78	6.40	7.09	7.40	7.12	7.15	6.46	7.03
OM	(%)	1.54	3.60	3.20	3.18	3.24	1.54	3.97	3.53	3.43	3.60
Exch. K	(g-K)	0.514	2.110	2.274	2.409	2.275	0.523	1.521	1.862	1.747	1.785
Dry plant	(g)	8.155	9.102	9.878	11.187	12.425	16.350	17.410	17.240	17.450	17.490
		ฝนกรดจำลอง pH 4.0					ฝนกรดจำลอง pH 3.0				
θ_m		0.06	0.36	0.40	0.45	0.38	0.06	0.33	0.37	0.50	0.35
pH		7.40	6.55	6.39	6.55	6.64	7.40	6.94	6.11	6.31	6.61
OM	(%)	1.54	3.93	3.66	3.60	3.53	1.54	4.28	3.98	3.79	3.87
Exch. K	(g-K)	0.533	1.599	1.707	1.634	1.552	0.443	1.343	1.742	1.456	1.631
Dry plant	(g)	14.953	16.091	16.025	15.822	16.588	16.036	17.044	17.251	16.897	18.318

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

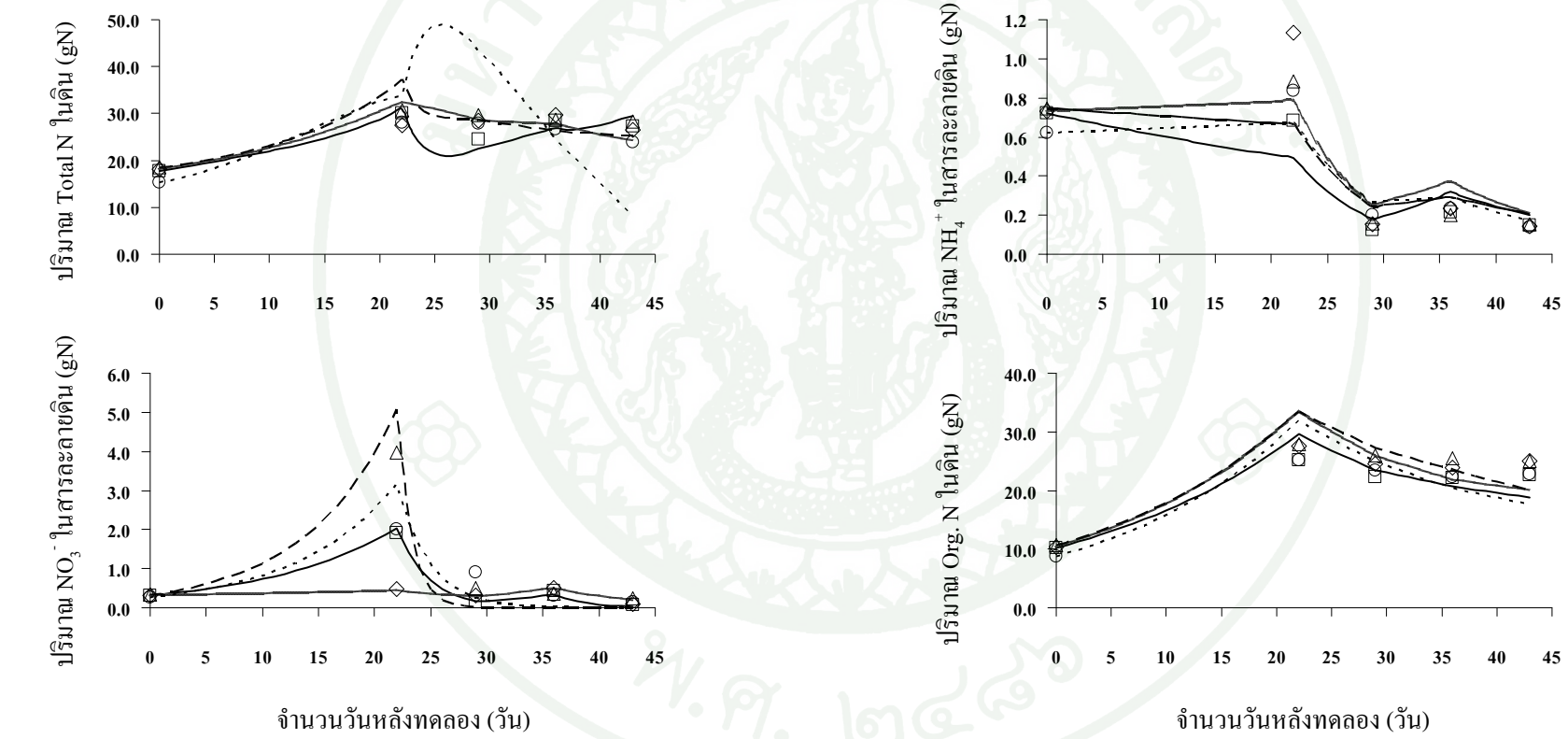
1. ค่าคงที่ของแบบจำลองไนโตรเจน

ค่าคงที่ของแบบจำลองไนโตรเจน ($K_1, K_2, ..., K_{16}$) มีความจำเพาะในแต่ละระดับ pH ของฝนกรดจำลอง (ตารางที่ 6) เนื่องจากค่า pH ของน้ำฝนที่ต่างกันส่งผลให้ค่า pH ดินลดลงตามค่า pH น้ำฝนที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น และ pH ดินมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่จะเปลี่ยนรูป NH_4^+, NO_3^- และ Org-N จึงส่งผลทำให้ค่าคงที่ของแบบจำลองมีความจำเพาะในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลอง

ตารางที่ 6 ค่าคงที่ในแบบจำลองไนโตรเจนที่ระดับ pH ของฝนกรดจำลองต่างๆ

ค่าคงที่	ค่าคงที่ของฝนกรดจำลอง			
	pH 6.7	pH 5.0	pH 4.0	pH 3.0
K_1	-20.868	-4.734	-8.822	6.278
K_2	12.550	10.304	1.804	-14.598
K_3	-1.032	0.588	0.451	3.480
K_4	0.310	-0.016	-0.039	-0.906
K_5	-3.328	-0.790	-0.506	-0.050
K_6	22.712	34.344	2.213	-2.453
K_7	-1.031	0.619	-0.289	-0.122
K_8	-1.087	-2.942	0.051	0.271
K_9	0.268	0.176	-0.063	0.042
K_{10}	2.930	0.594	-0.055	-0.143
K_{11}	-0.589	-0.066	-0.337	-0.131
K_{12}	-0.144	-0.075	0.075	0.001
K_{13}	-0.022	-0.032	-0.030	-0.003
K_{14}	0.092	0.072	0.072	0.072
K_{15}	-1.740	-3.477	-3.601	-3.201
K_{16}	2.892	5.651	5.828	5.020

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 เปรียบเทียบปริมาณ Total N และ Org-N ในดิน NH_4^+ และ NO_3^- ในสารละลายดินที่คำนวณได้กับปริมาณที่วัดได้จริง ณ เวลาต่าง ในการทดลองให้ฝนจำลองอนุมูลซัลเฟต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำค่าคงที่ (ตารางที่ 6) แทนค่าในแบบจำลองไนโตรเจนเพื่อคำนวณหาปริมาณ Total N ในดิน NH_4^+ และ NO_3^- ในสารละลายดิน และ Org-N ในดิน พบว่า ณ เวลาที่ 22, 29, 36 และ 43 วัน ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไนโตรเจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากข้อมูลจริง (ภาพที่ 12) และค่า standardized bias (R) มีค่าน้อยกว่า $|0.10|$ ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าคงที่ได้ (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 ค่า standardized bias (R) ในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลองของไนโตรเจนรูปต่างๆ

รูปของไนโตรเจน	standardized bias (R)			
	pH 6.7	pH 5.0	pH 4.0	pH 3.0
Total N	-0.008	0.011	0.000	0.028
NH_4^+	0.017	-0.024	0.016	-0.004
NO_3^-	-0.004	0.043	0.003	0.026
Org-N	0.004	0.007	0.003	0.013

2. ค่าคงที่ของแบบจำลองฟอสฟอรัส

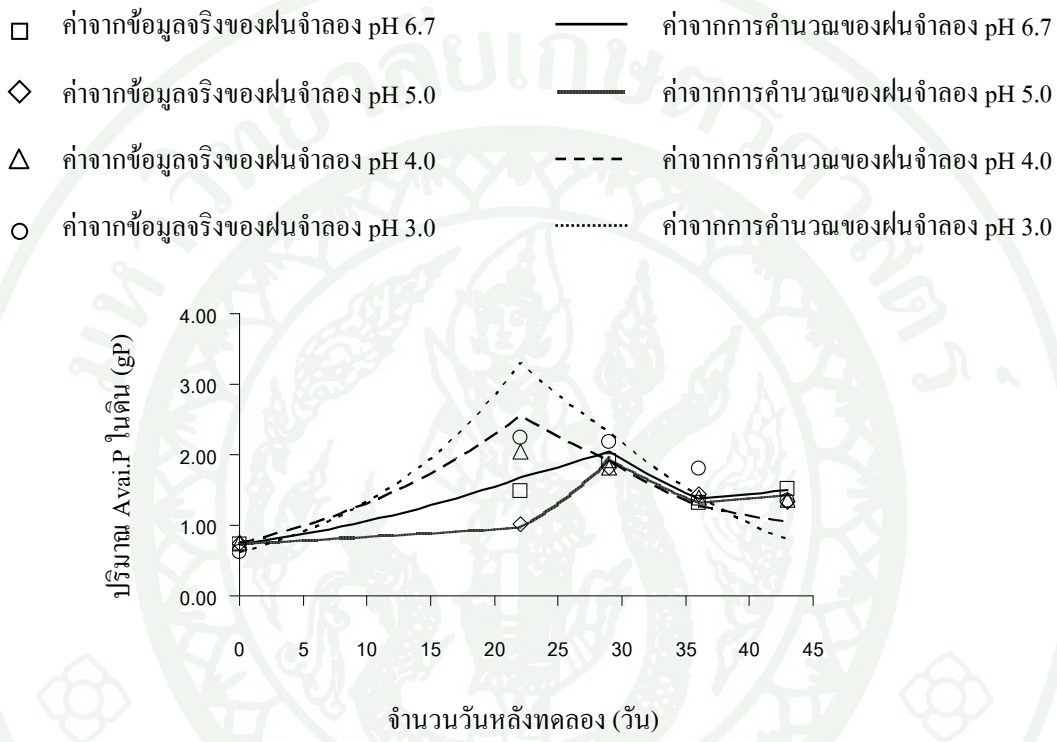
ค่าคงที่ของแบบจำลองฟอสฟอรัส $(K_{17}, K_{18}, ..., K_{20})$ มีความจำเพาะในแต่ละระดับ pH ของฝนกรดจำลอง (ตารางที่ 8) เนื่องจากค่า pH ของน้ำฝนที่ต่างกันส่งผลให้ค่า pH ของดินลดลงตามระดับความรุนแรงของฝนจำลองที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น และ pH ดินยังส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดิน กิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสและย่อยสลายอินทรียวัตถุ จึงส่งผลทำให้ค่าคงที่ของแบบจำลองมีความจำเพาะในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลอง

ตารางที่ 8 ค่าคงที่ในแบบจำลองฟอสฟอรัสที่ระดับ pH ของฝนกรดจำลองต่างๆ

ค่าคงที่	ฝนกรดค่าคงที่ของฝนกรดจำลอง			
	pH 6.7	pH 5.0	pH 4.0	pH 3.0
K_{17}	-0.032	0.044	0.106	0.025
K_{18}	-0.614	-0.524	0.050	-0.165
K_{19}	0.088	0.133	0.014	-0.025
K_{20}	0.022	-0.030	-0.050	-0.003

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำค่าคงที่ (ตารางที่ 8) แทนค่าในแบบจำลองฟอสฟอรัสเพื่อคำนวณหาปริมาณ Avai.P ในสารละลายดิน พบว่า ณ เวลาที่ 22, 29, 36 และ 43 วัน ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองฟอสฟอรัสมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากข้อมูลจริง (ภาพที่ 13) และค่า standardized bias (R) มีค่าน้อยกว่า |0.10| ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าคงที่ได้ (ตารางที่ 9)



ภาพที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณ Avai.P ในดินที่คำนวณได้กับปริมาณที่วัดได้จริง ณ เวลาต่างๆ ในการทดลองให้ฝนจำลองอนุมูลซัลเฟต

ตารางที่ 9 ค่า standardized bias (R) ในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลองของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

รูปของฟอสฟอรัส	standardized bias (R)			
	pH 6.7	pH 5.0	pH 4.0	pH 3.0
Avai.P	0.061	0.008	0.025	0.037

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ค่าคงที่ของแบบจำลองโพแทสเซียม

ค่าคงที่ของแบบจำลองโพแทสเซียม ($K_{21}, K_{22}, ..., K_{24}$) มีความจำเพาะในแต่ละระดับ pH ของฝนกรดจำลอง (ตารางที่ 10) เนื่องจากค่า pH ของน้ำฝนที่ต่างกันส่งผลให้ค่า pH ของดินลดลงตามระดับความรุนแรงของฝนจำลองที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น และค่า pH ดินมีผลต่อการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดิน กิจกรรมของจุลินทรีย์ที่จะเปลี่ยนรูปของโพแทสเซียม และการย่อยสลายอินทรียวัตถุที่มีผลต่อการปลดปล่อยและดูดซับโพแทสเซียม จึงส่งผลทำให้ค่าคงที่ของแบบจำลองมีความจำเพาะในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลอง

เมื่อนำค่าคงที่ (ตารางที่ 10) แทนค่าในแบบจำลองโพแทสเซียมเพื่อคำนวณหาปริมาณ Exch. K ในดิน พบว่า ณ เวลาที่ 22, 29, 36 และ 43 วัน ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองโพแทสเซียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากข้อมูลจริง (ภาพที่ 14) และค่า standardized bias (R) มีค่าน้อยกว่า $|0.10|$ ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าคงที่ได้ (ตารางที่ 11)

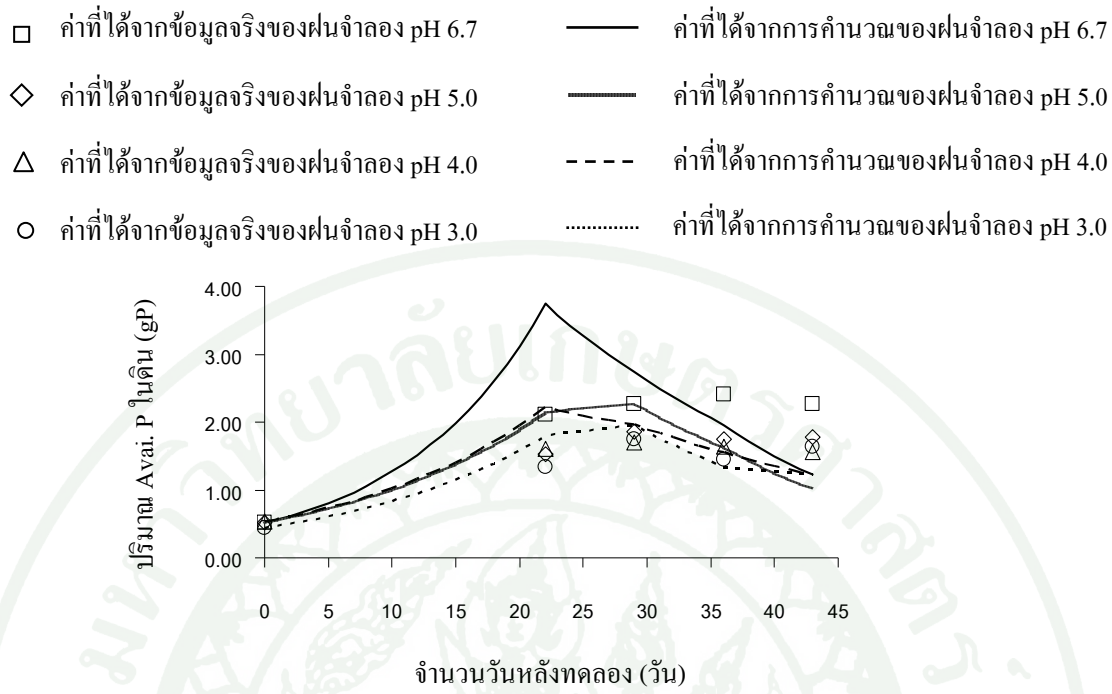
ตารางที่ 10 ค่าคงที่ในแบบจำลองโพแทสเซียมที่ระดับ pH ของฝนกรดจำลองต่างๆ

ค่าคงที่	ค่าคงที่ของฝนกรดจำลอง			
	pH 6.7	pH 5.0	pH 4.0	pH 3.0
K_{21}	0.031	0.020	0.040	0.076
K_{22}	-0.071	-0.215	-0.187	0.099
K_{23}	-0.044	0.012	0.010	-0.005
K_{24}	-0.008	-0.005	-0.015	-0.031

ตารางที่ 11 ค่า standardized bias (R) ในแต่ละระดับ pH ฝนกรดจำลองของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

รูปของโพแทสเซียม	standardized bias (R)			
	pH 6.7	pH 5.0	pH 4.0	pH 3.0
Exch. K	0.066	0.023	0.071	0.024

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 เปรียบเทียบปริมาณ Exch. K ในดินที่คำนวณได้กับปริมาณที่วัดได้จริง ณ เวลาต่างๆ ในการทดลองให้ฝนจำลองอนุมูลซัลเฟต

4. อิทธิพลของสมบัติดินและรูปไนโตรเจนต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจน

4.1 อิทธิพลของรูปไนโตรเจนต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจนในดิน

ค่าคงที่ $K_1, K_2, ..., K_4$ เปลี่ยนตามระดับ pH น้ำฝน (ภาพที่ 15) และมีทั้งเครื่องหมายบวกและลบ เครื่องหมายบวกแสดงถึงการปลดปล่อยไนโตรเจนจากรูปนั้นๆ ให้เป็นส่วนประกอบของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (Total N) ส่วนเครื่องหมายลบเป็นไปในทิศทางตรงข้าม คือ ไนโตรเจนรูปนั้นสูญหายออกไปจากดิน

ค่าคงที่ K_1 ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 3.6 ส่งเสริมให้ NH_4^+ คงอยู่และเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน แต่ถ้าระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 3.6 ส่งเสริมให้เกิดการสูญเสีย NH_4^+ ออกไปจากดิน ซึ่งอาจเกิดจากการที่พืชนำไปใช้ (plant uptake) หรือเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนรูป NH_4^+ ไปเป็น NO_3^- (nitrification) หรือระเหยขึ้นไปเป็นก๊าซ NH_3 ที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรียกว่ากระบวนการ volatilization ดั้งนั้นอิทธิพลความรุนแรงของฝนกรดส่งเสริมให้ NH_4^+ เป็นประโยชน์มากขึ้นและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

ค่าคงที่ K_2 ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 4.2 ส่งเสริมให้เกิดการสูญเสีย NO_3^- ออกไปจากดิน คาดว่าเกิดจากการที่พืชนำไปใช้ (plant up take) หรือเกิดจากกระบวนการ denitrification เป็นการเปลี่ยนรูป NO_3^- ไปเป็น N_2 หรือถูกชะละลายออกไป (leaching) แต่ถ้าระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 4.2 ส่งเสริมให้ NO_3^- เพิ่มขึ้นและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน สังเกตว่าที่ระดับ pH ฝนมีค่ามากขึ้นจะส่งเสริมให้เกิดการสูญเสีย NH_4^+ ในขณะที่ระดับ pH ฝนมีค่ามากขึ้นจะส่งเสริมให้ NO_3^- เพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 15) การสูญเสียของ NH_4^+ และการเพิ่มขึ้นของ NO_3^- นี้ สันฐานว่าน่าจะเกิดจากการเปลี่ยนรูปของ NH_4^+ ไปเป็น NO_3^- หรือเกิดจากกระบวนการ nitrification นั้นเอง ดังนั้นอิทธิพลความรุนแรงของฝนกรดส่งเสริมให้เกิดการสูญเสีย NO_3^- ออกไปจากดินเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการลดความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- นั้นเอง

ค่าคงที่ K_3 ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 5.5 ส่งเสริมให้ Org-N เพิ่มขึ้นและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน แต่ถ้าระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 5.5 ส่งเสริมให้เกิดการสูญเสีย Org-N ออกไปจากดิน คาดว่าเกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นสารอนินทรีย์ที่เรียกว่ากระบวนการ mineralization และการที่ Org-N เพิ่มขึ้นที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 5.5 นั้นน่าจะเกิดจากกระบวนการ immobilization ซึ่งเป็นกระบวนการผันกลับของ mineralization ที่เปลี่ยนอนินทรีย์สารให้เป็นอินทรีย์สาร ดั้งนั้นอิทธิพลความรุนแรงของฝนกรดส่งเสริมให้ Org-N เป็นประโยชน์มากขึ้นและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

ค่าคงที่ K_4 ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 5.2 ส่งเสริมให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนรูปอื่นๆ ออกไปจากดิน คาดว่าน่าจะเกิดกระบวนการ immobilization เปลี่ยนไนโตรเจนรูปอื่นๆ ที่เป็นอนินทรีย์สารไปเป็น Org-N ซึ่งเป็นอินทรีย์สาร สังเกตได้จากที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 5.0 ส่งเสริมให้ Org-N เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 15) แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 5.0 ส่งเสริมให้ Org-N ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการที่ไนโตรเจนรูปอื่นๆ เพิ่มขึ้น หรืออาจจะเป็นไปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนรูปอื่นๆ ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 5.2 นั้น เกิดจากกระบวนการ nitrogen fixation เป็นการตรึงก๊าซ N_2 ในบรรยากาศของจุลินทรีย์ ดังนั้นอิทธิพลความรุนแรงของฝนกรดส่งเสริมให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เกิดการสูญเสียไนโตรเจนรูปอื่นๆ ออกไปจากดินเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการลดความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนรูปอื่นๆ นั้นเอง

4.2 อิทธิพลของสมบัติดินต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+)

ค่าคงที่ $K_5, K_6, ..., K_8$ จะบอกถึงอิทธิพลของ pH ดิน, ρ_b, OM และพืชที่ปลูกที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ ในสารละลายดิน ตามลำดับ ค่าคงที่ทั้ง 4 เปลี่ยนตามระดับ pH น้ำฝน (ภาพที่ 16) มีทั้งเครื่องหมายบวกและลบ เครื่องหมายบวกหมายถึงปัจจัยนั้นส่งเสริมการได้มาของมวล NH_4^+ ในสารละลายดิน เครื่องหมายลบจะตรงข้าม ปัจจัยนั้นส่งเสริมการสูญเสียมวล NH_4^+ ในสารละลายดิน

ค่าคงที่ K_5 ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 3.4 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินทำให้ได้มาซึ่งของมวล NH_4^+ ในสารละลายดิน แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 3.4 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินทำให้สูญเสียมวล NH_4^+ ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการ nitrification เนื่องจากการเกิดฝนกรดจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับ pH ในดินทำให้จุลินทรีย์ nitrifying bacteria ซึ่งค่อนข้างไวต่อสภาพกรดด่าง เช่น ถ้าค่า pH ดินต่ำกว่า 4.5 กระบวนการ nitrification จะหยุดชงักทันที ค่า pH ดินที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มนี้อยู่ระหว่าง 6.5-7.5 (Eldor and Francis, 1996) จะสังเกตได้ว่าปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินจะทำให้ความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ ในสารละลายดินเพิ่มขึ้น

ค่าคงที่ K_6 ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากขึ้น ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ ρ_b ทำให้ได้มาซึ่งมวลของ NH_4^+ ในสารละลายดิน เนื่องจากความเป็นกรดของน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ดินแน่นขึ้น (Robert *et al*., 2001) เมื่อดินแน่นขึ้นการถ่ายเทอากาศจึงไม่ดี ปริมาณออกซิเจนลดลง กระบวนการ ammonification ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการออกซิเจนจึงเกิดขึ้นได้ช้าลง (Kadlec and Knight, 1996) ทำให้ปริมาณ NH_4^+ ลดลงตามไปด้วย จะสังเกตได้ว่าปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ ρ_b ของดินลดความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ ในสารละลายดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าคงที่ K_7 ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 3.6 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินทำให้ได้มาซึ่งมวลของ NH_4^+ ในสารละลายดิน แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 3.6 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินทำให้เกิดสูญเสียมวลของ NH_4^+ ในสารละลายดินเนื่องจากกระบวนการ immobilization เปลี่ยน NH_4^+ กลับไปเป็นอินทรีย์สาร หรือถูกอินทรียวัตถุดูดซับไว้ที่ผิวของอนุภาค เนื่องจากอนุภาคของอินทรียวัตถุส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบจึงสามารถดูดซับประจุบวกของ NH_4^+ ไว้ได้ สังเกตได้ว่าปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ ในสารละลายดิน

ค่าคงที่ K_8 ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ เนื่องจากพืชไม่สามารถนำ NH_4^+ ไปใช้ได้ การสูญเสียออกไปจากดินจึงลดลง เนื่องจากอิทธิพลของระดับฝนกรดจำลองที่เพิ่มขึ้นสร้างความเสียหายต่อคลอโรฟิลล์ในเนื้อเยื่อพืช และน่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อเยื่อพืชด้วย พืชจึงนำ NH_4^+ ไปใช้ไม่ได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของจิตตานันท์ (2549) ที่พืชแสดงอาการขาดธาตุไนโตรเจนเมื่อระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง และจะสังเกตได้ว่าปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชที่ปลูกเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ ในสารละลายดิน

4.3 อิทธิพลของสมบัติดินต่อความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในรูปของไนเทรต (NO_3^-)

ค่าคงที่ $K_9, K_{10}, ..., K_{12}$ จะบอกถึงอิทธิพลของค่า pH ดิน, θ_m, %OM และพืชที่ปลูกที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- ในสารละลายดิน ตามลำดับ ค่าคงที่ทั้ง 4 เปลี่ยนตามระดับ pH น้ำฝน (ภาพที่ 17) มีทั้งเครื่องหมายบวกและลบ เครื่องหมายบวกหมายถึงปัจจัยนั้นส่งเสริมการได้มาของมวล NO_3^- ในสารละลายดิน เครื่องหมายลบจะตรงข้าม ปัจจัยนั้นส่งเสริมการสูญเสียมวล NO_3^- ในสารละลายดิน

ค่าคงที่ K_9 ที่ระดับ pH น้ำฝนที่มีค่าน้อยกว่า 3.3 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินทำให้สูญเสียมวล NO_3^- ในสารละลายดิน ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการ denitrification แต่ถ้าระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 3.3 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินทำให้ได้มาซึ่งมวลของ NO_3^- ในสารละลายดิน คาดว่าได้มาจากการเปลี่ยนรูปของ NH_4^+ เป็น NO_3^- ในกระบวนการ nitrification เพราะสอดคล้องกับค่า K_5 (ภาพที่ 17) ที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 3.4 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินทำให้สูญเสียมวล NH_4^+ ในสารละลายดิน ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินลดความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- ในสารละลายดิน

ค่าคงที่ K_{10} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 3.7 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m ทำให้สูญเสียมวล NO_3^- ออกไปจากดิน ซึ่งอาจเกิดจากการชะละลาย (leaching) ไปกับน้ำ (Kenneth and Cecil, 1981) แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่ามากกว่า 3.7 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m ทำให้ NO_3^- ยังคงอยู่ในดิน ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m ในดินจะลดความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- ในสารละลายดิน

ค่าคงที่ K_{11} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินทำให้เกิดการสูญเสียมวล NO_3^- ออกไปจากดิน คาดว่าสูญเสียไปกับกระบวนการ immobilization หรือถูกดูดซับไว้ที่ผิวอนุภาค เนื่องจากอนุภาคของอินทรียวัตถุมีทั้งประจุลบและบวก จึงสามารถดูดซับประจุลบของ NO_3^- ได้ ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- ในสารละลายดิน

ค่าคงที่ K_{12} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชทำให้ความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- เพิ่มขึ้น เนื่องจากพืชไม่สามารถนำ NO_3^- ไปใช้ได้ การสูญเสีย จึงน้อยลง เนื่องจากอิทธิพลของฝนกรดที่เพิ่มขึ้นที่สร้างความเสียหายต่อคลอโรฟิลล์ในเนื้อเยื่อพืช และน่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อเยื่อพืชด้วย พืชจึงนำ NO_3^- ไปใช้ไม่ได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของจิตตานันท์ (2549) ที่พืชแสดงอาการขาดธาตุไนโตรเจนเมื่อระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 4.0 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชที่ปลูกทำให้ได้มาซึ่งของมวล NO_3^- ในสารละลายดิน คาดว่าได้มาจากการย่อยสะลายซากใบพืชที่ร่วงหล่น ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชที่ปลูกจะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- ในสารละลายดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.4 อิทธิพลของสมบัติดินต่อความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในรูปของอินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N)

ค่าคงที่ $K_{13}, K_{14}, ..., K_{16}$ จะบอกถึงผลของค่า pH ดิน, ρ_b, θ_m และปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน ตามลำดับ ค่าคงที่ทั้ง 4 เปลี่ยนตามระดับ pH น้ำฝน (ภาพที่ 18) มีทั้งเครื่องหมายบวกและลบ เครื่องหมายบวกหมายถึงปัจจัยนั้นส่งเสริมการได้มาของมวลอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน เครื่องหมายลบจะตรงข้าม ปัจจัยนั้นส่งเสริมการสูญเสียมวลอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน

ค่าคงที่ K_{13} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ส่งเสริมให้ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินให้เกิดการสูญเสียอินทรีย์ไนโตรเจนในดินลดน้อยลง คาดว่าอิทธิพลของฝนกรดที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อกิจกรรมการเปลี่ยนรูปของอินทรีย์ไนโตรเจน ทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เปลี่ยนรูปลดลง อินทรีย์ไนโตรเจนจึงคงอยู่ในดินมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า K_3 (ภาพที่ 15) ที่เมื่อระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ส่งเสริมให้อินทรีย์ไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้นและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินเพิ่มความเป็นประโยชน์ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน

ค่าคงที่ K_{14} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ส่งเสริมให้ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ ρ_b ได้มาซึ่งอินทรีย์ไนโตรเจนในดินลดน้อยลง เนื่องจากความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ดินแน่นขึ้น (Robert *et al.*, 2001) เมื่อดินแน่นขึ้นการถ่ายเทอากาศไม่ดี กระบวนการ ammonification เกิดขึ้นช้าลง (Kadlec and Knight, 1996) ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนที่จะเปลี่ยนเป็น NH_4^+ จึงลดน้อยลง ทำให้คงเหลืออินทรีย์ไนโตรเจนในดินมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า K_6 (ภาพที่ 18) ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ส่งเสริมให้ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ ρ_b ลดปริมาณการได้มาของมวล NH_4^+ ในสารละลายดิน และดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ ρ_b ลดความเป็นประโยชน์ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน

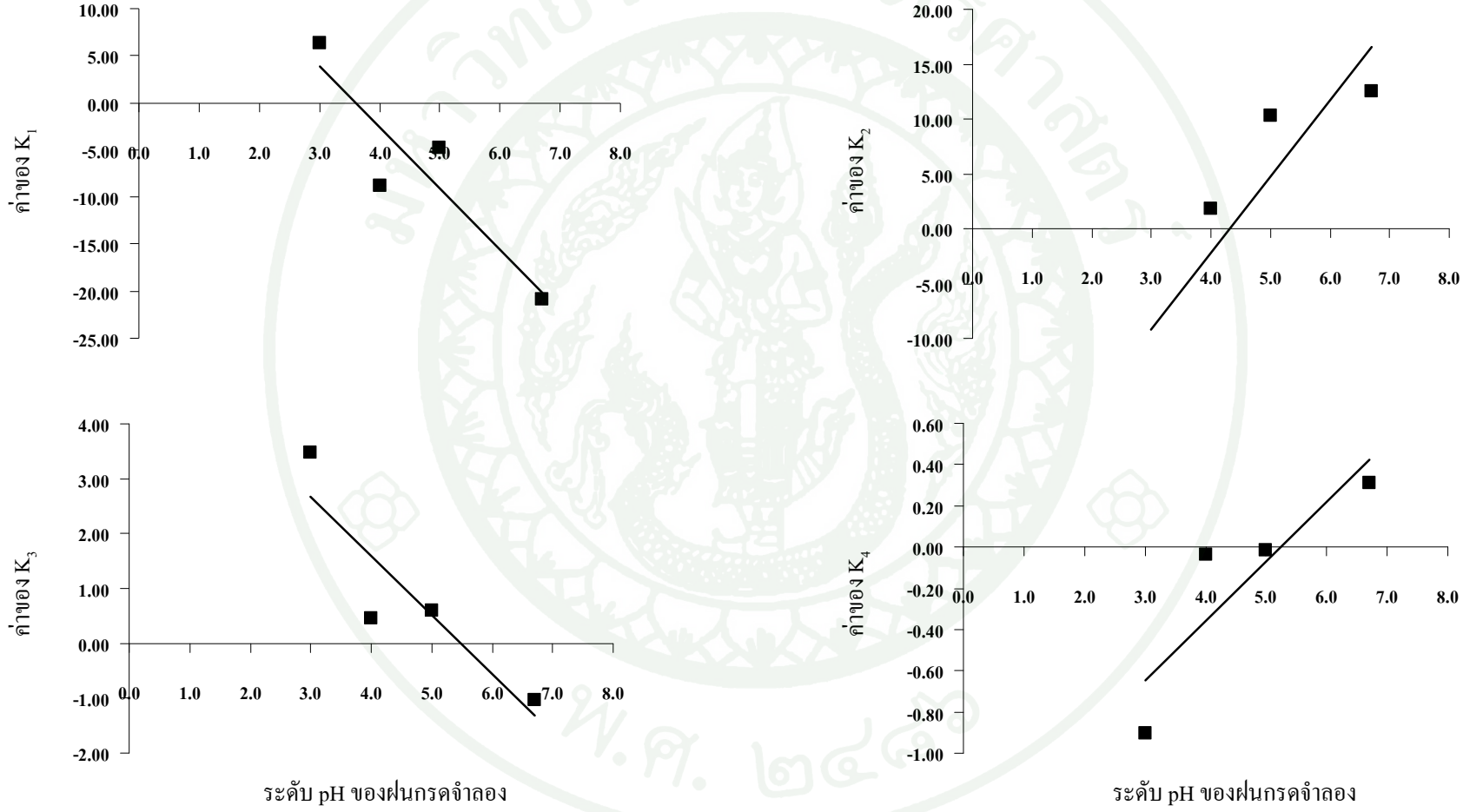
ค่าคงที่ K_{15} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ส่งเสริมให้ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m เกิดการสูญเสียอินทรีย์ไนโตรเจนออกไปจากดินมากขึ้น เนื่องจากความชื้นมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกระบวนการ mineralization ความชื้นที่เหมาะสม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

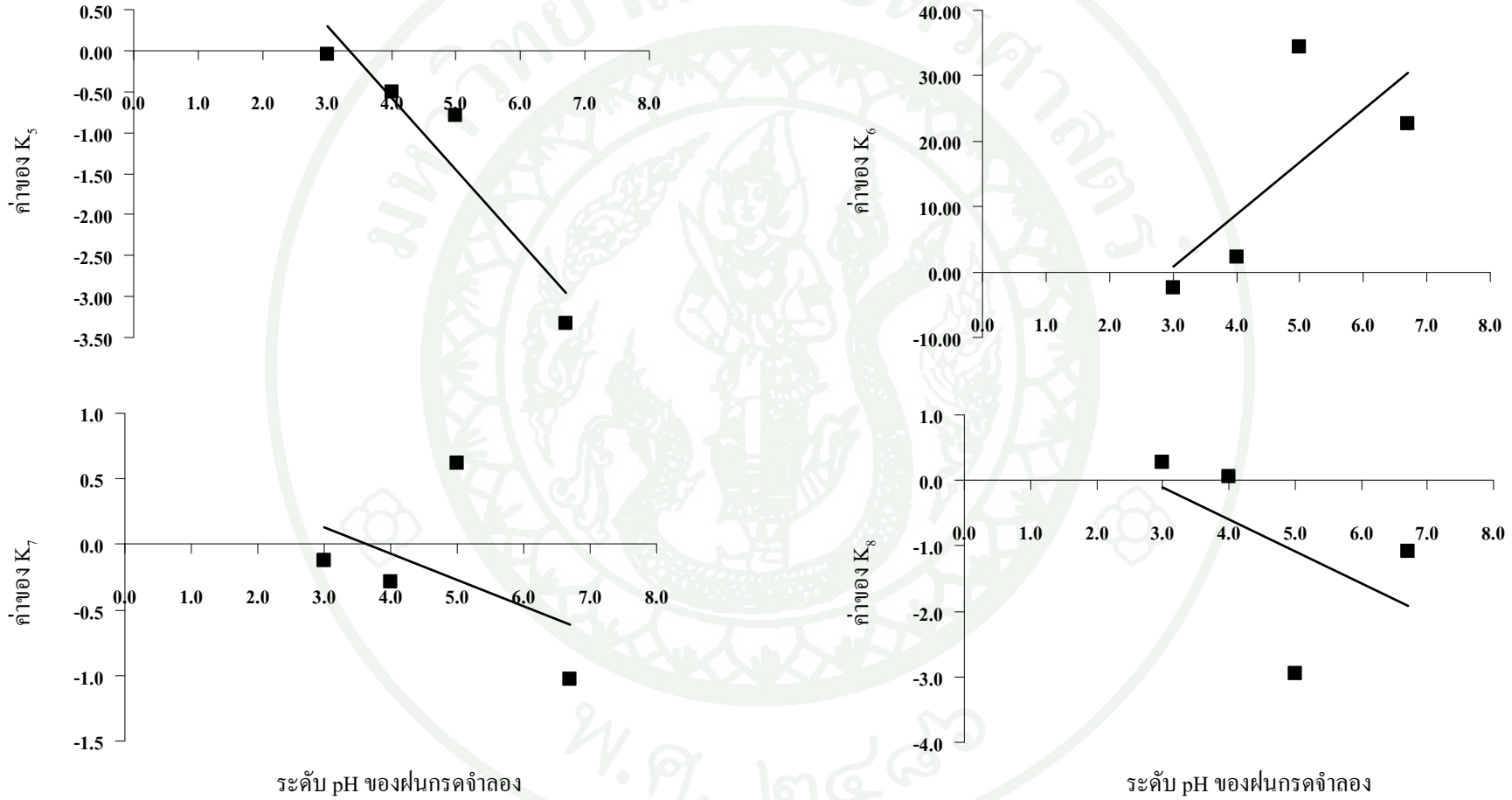
จะส่งเสริมการเกิดกระบวนการ จึงทำให้อินทรีย์ไนโตรเจนถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนรูปอื่นๆ (NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-) จึงสูญเสียอินทรีย์ไนโตรเจนไปจากระบบ ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m จะลดความเป็นประโยชน์ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน

ค่าคงที่ K_{16} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ส่งเสริมอิทธิพลของปัจจัยทางดินด้านอื่นๆ ให้เกิดการได้มาของอินทรีย์ไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้น ดังนั้นระดับความรุนแรงของฝนกรดส่งเสริมให้อิทธิพลของปัจจัยทางดินด้านอื่นๆ เพิ่มความเป็นประโยชน์ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

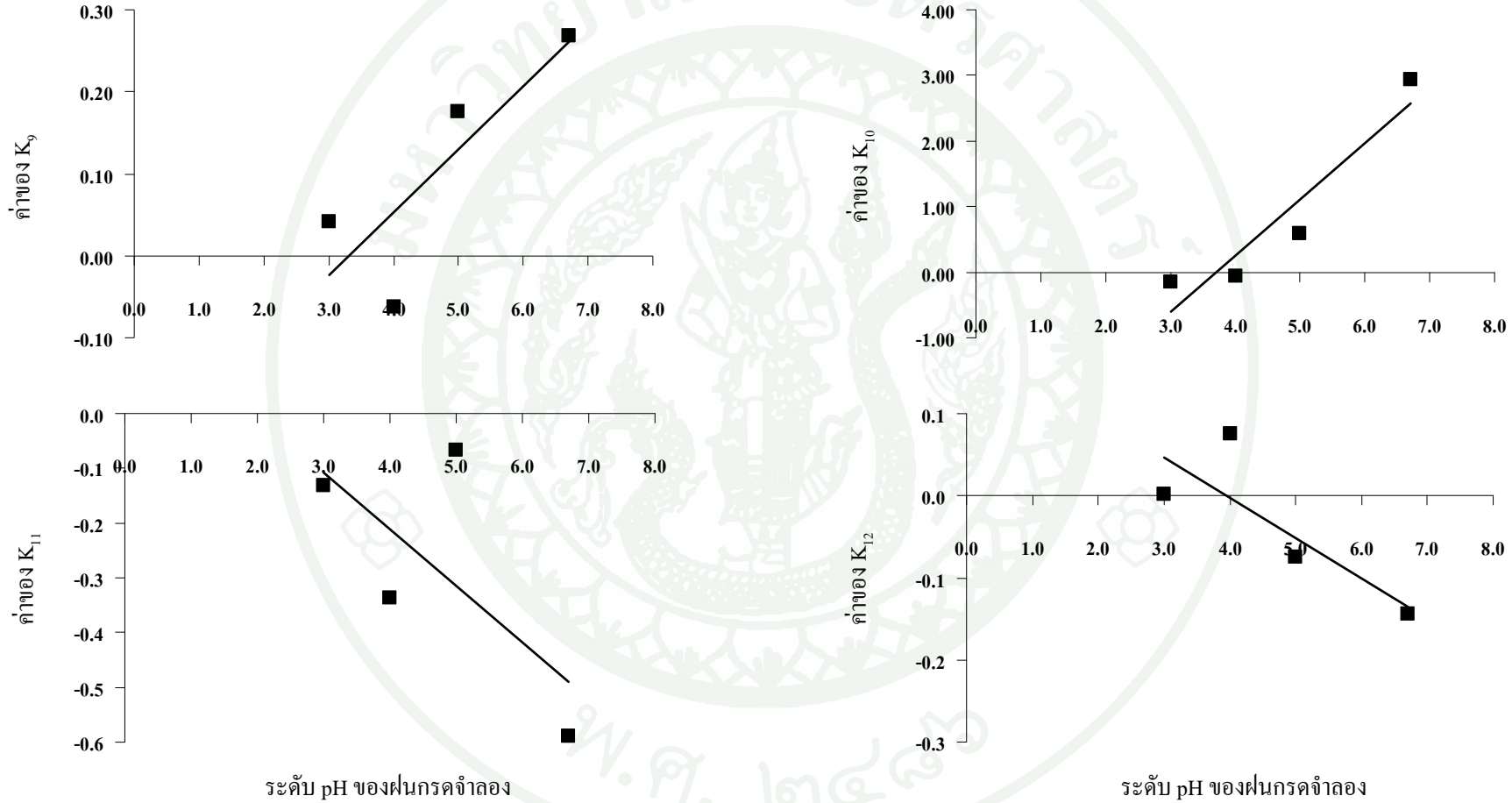


ภาพที่ 15 ค่าของ K_1, K_2, K_3 และ K_4 ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต



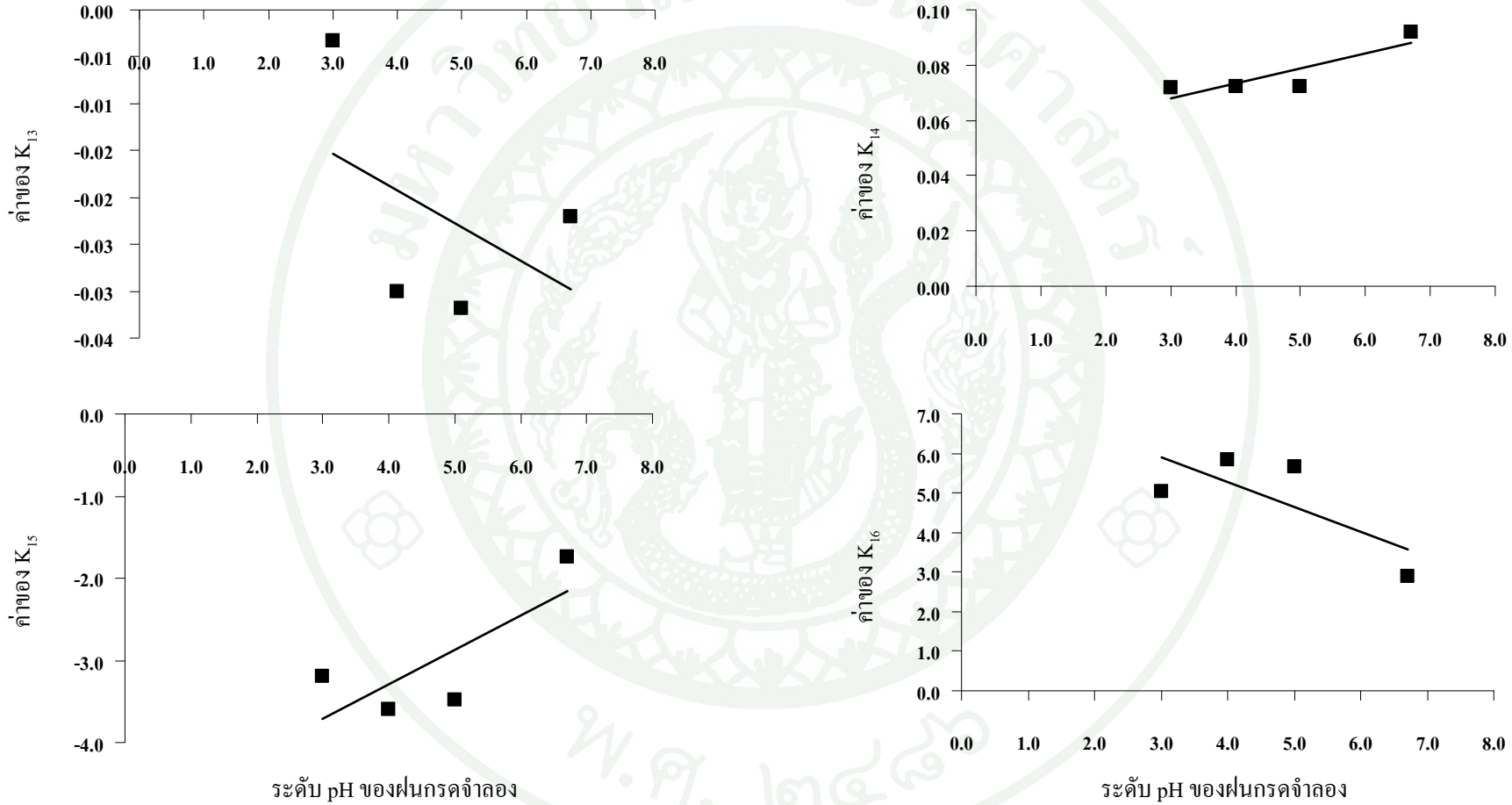
ภาพที่ 16 ค่าของ K_5, K_6, K_7 และ K_8 ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 ค่าของ K_9, K_{10}, K_{11} และ K_{12} ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 ค่าของ K_{13}, K_{14}, K_{15} และ K_{16} ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. อิทธิพลของสมบัติดินต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส

ค่าคงที่ $K_{17}, K_{18}, ..., K_{20}$ จะบอกถึงอิทธิพลของค่า pH ดิน, θ_m, อินทรียวัตถุ และพืชที่ปลูก ที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของ Avai.P ในสารละลายดิน ตามลำดับ ค่าคงที่ทั้ง 4 เปลี่ยนตามระดับ pH น้ำฝน (ภาพที่ 19) มีทั้งเครื่องหมายบวกและลบ เครื่องหมายบวกหมายถึงปัจจัยนั้นส่งเสริมการได้มาของมวล Avai.P ในสารละลายดิน เครื่องหมายลบจะตรงข้าม ปัจจัยนั้นส่งเสริมการสูญเสียมวล Avai.P ในสารละลายดิน

ค่าคงที่ K_{17} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าสูงกว่า 6.3 ส่งเสริมปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินให้เกิดการสูญเสีย Avai.P ออกไปจากดินแต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 6.3 ส่งเสริมปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินต่อการได้มาของ Avai.P เนื่องจากไอออนฟอสเฟตละลายออกมาในสารละลายดินได้มากขึ้น เพราะฝนกรดจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับ pH ในดิน ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินจะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

ค่าคงที่ K_{18} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m ให้เกิดการสูญเสีย Avai.P ลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณความชื้นมีผลต่อการชะล้าง Avai.P ออกจากชั้นหน้าตัดดิน ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m ในดินจะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

ค่าคงที่ K_{19} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าสูงกว่า 3.2 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินทำให้ได้มาซึ่งมวลของ Avai.P ในดิน แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 3.2 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินทำให้เกิดการสูญเสีย Avai.P ออกไปจากดิน เนื่องจากการปลดปล่อยไอออนฟอสเฟตที่เกิดจากการย่อยสลายอินทรีย์ฟอสเฟตในอินทรียวัตถุลดลง เพราะฝนกรดมีผลต่อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอินทรีย์ฟอสเฟตให้เป็นไอออนฟอสเฟต ยิ่งน้ำฝนมีความเป็นกรดสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการย่อยสลายลดลงตามไปด้วย (David and Bela, 2000) ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินลดความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าคงที่ K_{20} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าสูงกว่า 6.2 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชที่ปลูกทำให้ได้มาซึ่งมวลของ Avai.P ในดิน แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 6.2 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินทำให้เกิดการสูญเสีย Avai.P ออกไปจากดิน เนื่องจากในดินมีไอออนฟอสเฟตละลายออกมามาก ตามค่า K_{17} ที่ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินทำให้มีการได้มาซึ่งมวลของ Avai.P (ภาพที่ 19) ทำให้พืชดูด Avai.P ขึ้นไป แล้วเก็บสะสมไว้ในเนื้อเยื่อพืชจึงทำให้เกิดการสูญเสีย Avai.P ออกไปจากดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของจิตตานันท์ (2549) ที่ว่าถ้าในดินมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่สูง ฝักกระเจี๊ยบเขียวก็จะมีการสะสมฟอสฟอรัสในฝักสูงตามไปด้วย และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในเนื้อเยื่อก็มีปริมาณสูงกว่ามาตรฐาน (Grubber and Denton, 2004) ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชที่ปลูกลดความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

6. อิทธิพลของสมบัติดินต่อความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียม

ค่าคงที่ $K_{21}, K_{22}, ..., K_{24}$ จะบอกถึงอิทธิพลของค่า pH ดิน, θ_m, อินทรียวัตถุ และพืชที่ปลูกที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของ Exch. K ในสารละลายดิน ตามลำดับ ค่าคงที่ทั้ง 4 เปลี่ยนตามระดับ pH น้ำฝน (ภาพที่ 20) มีทั้งเครื่องหมายบวกและลบ เครื่องหมายบวกหมายถึงปัจจัยนั้นส่งเสริมการได้มาของมวล Exch. K ในสารละลายดิน เครื่องหมายลบจะตรงข้าม ปัจจัยนั้นส่งเสริมการสูญเสียมวล Exch. K ในสารละลายดิน

ค่าคงที่ K_{21} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินทำให้ได้มาซึ่งมวลของ Exch. K ในดิน เนื่องจาก H^+ ในดินที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากระดับความรุนแรงของฝนกรดที่สูงขึ้น สามารถไล่ที่ K^+ ที่ถูกตรึงไว้โดยอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ ให้หลุดออกมาทำให้มีปริมาณ Exch. K ในดินเพิ่มสูงขึ้น (Vijay, 1995; Chris, 1987) ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดินจะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน

ค่าคงที่ K_{22} ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m ให้เกิดการสูญเสีย Exch. K เนื่องจากปริมาณความชื้นมีผลต่อการชะล้างโพแทสเซียมออกจากชั้นหน้าตัดดิน (Donald, 2004) และที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กรดจำลองและ θ_m ให้เกิดการสูญเสียโพแทสเซียมออกจากระบบลดน้อยลง คาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ θ_m มีอิทธิพลต่อการดูดกินโพแทสเซียมของพืช ยิ่งที่ระดับ pH ฝนมีค่าน้อยโพแทสเซียมปลดปล่อยออกมามาก พืชก็จะดูดกินโพแทสเซียมขึ้นไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า K_{24} (ภาพที่ 20) ที่ว่าระดับ pH ฝนมีค่าน้อยลง ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชที่ปลูกทำให้เกิดการสูญเสียโพแทสเซียมออกจากระบบมากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ θ_m จะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน

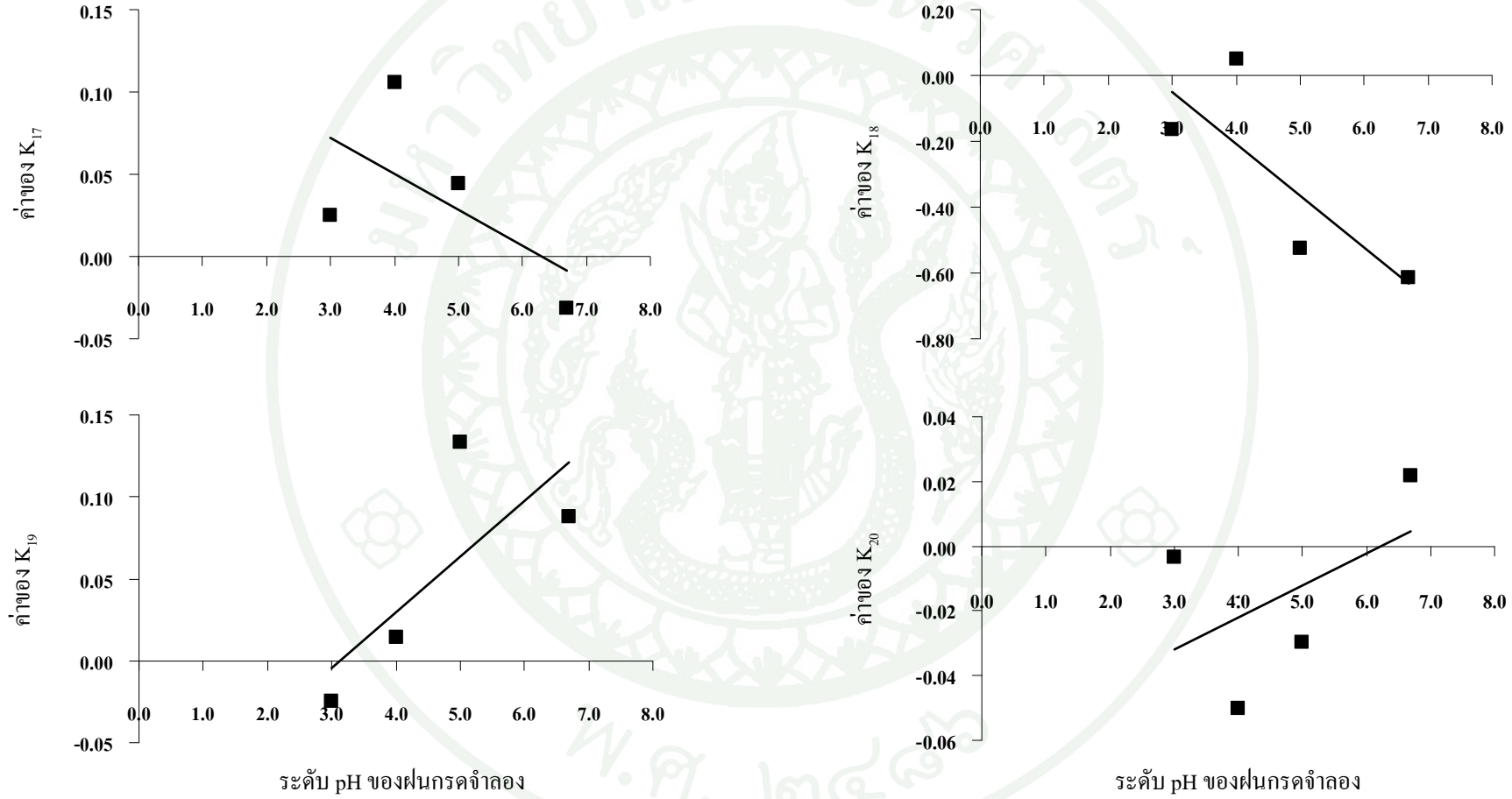
ค่าคงที่ K_{23} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยกว่า 4.0 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินทำให้ได้มาซึ่งมวลของ Exch. K ในดิน เนื่องจากมีการปลดปล่อยโพแทสเซียมที่อินทรียวัตถุดูดซับไว้ออกมา เพราะ H^+ ไปไล่ที่ K^+ (Vijay, 1995; Chris, 1987) แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าสูงกว่า 4.0 ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินทำให้เกิดการสูญเสีย Exch. K เนื่องจากโพแทสเซียมถูกอินทรียวัตถุดูดซับไว้ ถึงแม้จะมีการปลดปล่อยออกมาบ้างแต่เมื่อเทียบกับการดูดซับแล้วถือได้ว่ามีมากกว่า ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและอินทรียวัตถุในดินจะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน

ค่าคงที่ K_{24} ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อยลง ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชที่ปลูกทำให้เกิดการสูญเสีย Exch. K ในดินออกจากระบบ เนื่องจากมีปริมาณ Exch. K ในดินเพิ่มสูงขึ้น ตามค่า K_{21} ที่ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ส่งเสริมการได้มาซึ่งมวลของ Exch. K (ภาพที่ 20) ทำให้พืชดูดโพแทสเซียมขึ้นไปใช้ แล้วเก็บสะสมไว้ในเนื้อเยื่อพืชจึงทำให้เกิดการสูญเสีย Exch. K ออกไปจากดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของจิตตานันท์ (2549) ที่พบว่ากระเจี๊ยบเขียวมีการดูดกินโพแทสเซียมค่อนข้างสูง จะเห็นได้จากค่าสัดส่วนการนำโพแทสเซียมไปใช้ในกระเจี๊ยบเขียวมีค่าที่สูงกว่าของฟอสฟอรัสและไนโตรเจน จึงทำให้มีการสะสมโพแทสเซียมในกระเจี๊ยบเขียวสูงกว่าฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ซึ่งโดยปกติแล้วพืชมักดูดโพแทสเซียมเข้าไปในปริมาณที่มากกว่าธาตุอื่น (ยงยุทธ, 2546) ดังนั้นปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและพืชที่ปลูกจะลดความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

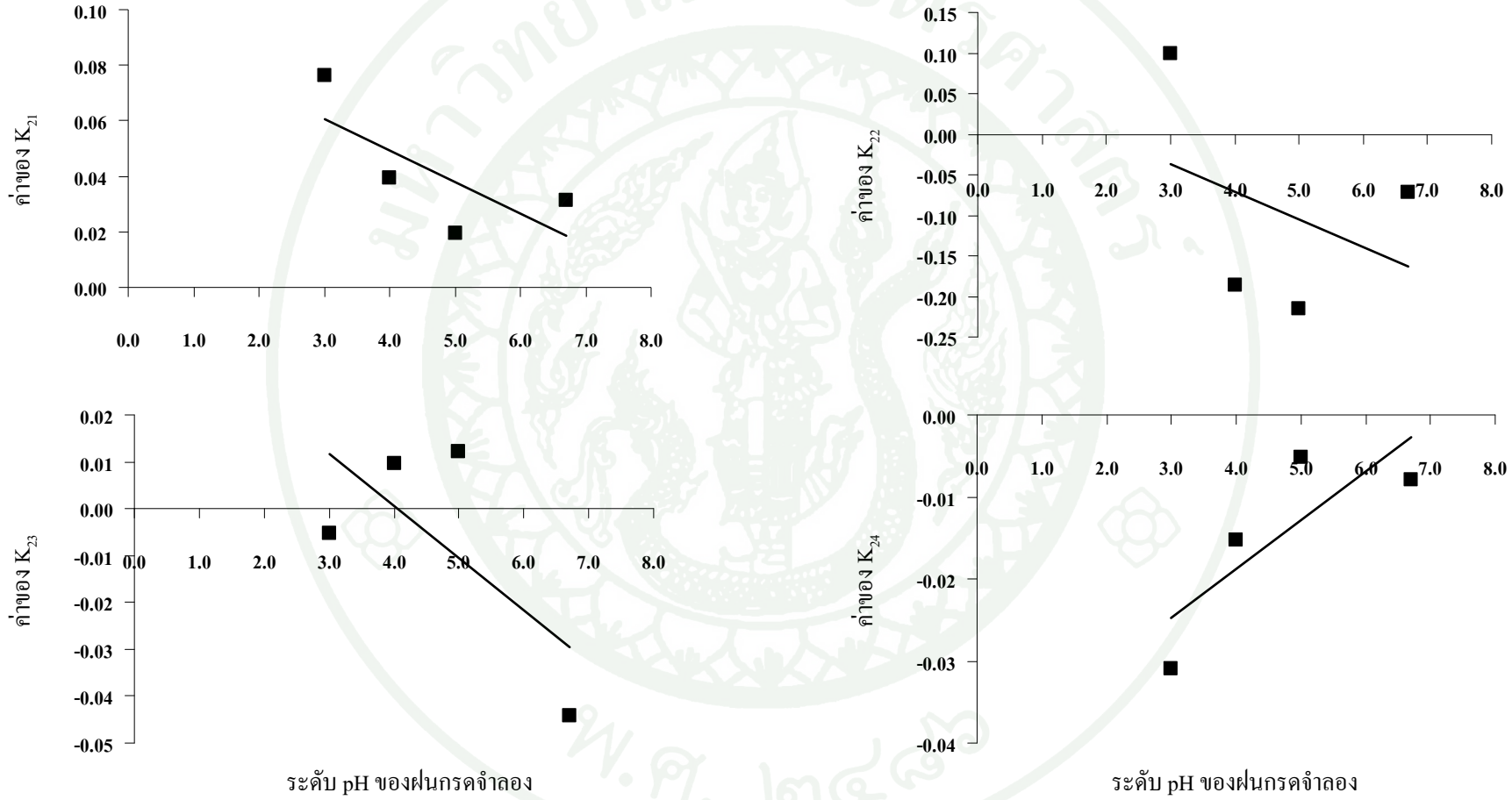
ดังนั้นในภาพรวมแล้วปฏิกิริยาสัมพัทธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและ pH ดิน จะทำให้ความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในรูป NH_4^+ และ Org-N สูงขึ้น แต่จะลดความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของความรุนแรงฝนกรดและ ρ_b จะลดความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ และ Org-Nส่วนปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดและ θ_m จะลดความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- และ Org-N ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดและปริมาณอินทรียวัตถุและพืชที่ปลกจะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ และ NO_3^- สำหรับผลต่อฟอสฟอรัสพบว่าปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของความรุนแรงฝนกรดและ pH หรือ θ_m จะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดกับอินทรียวัตถุหรือพืชที่ปลูกจะลดความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน ส่วนผลต่อโพแทสเซียม พบว่าปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดและ pH หรือ θ_m หรืออินทรียวัตถุจะเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียม แต่ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของฝนกรดและพืชที่ปลูกจะลดความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 ค่าของ K_{17}, K_{18}, K_{19} และ K_{20} ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 20 ค่าของ K_{21}, K_{22}, K_{23} และ K_{24} ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม pH ของฝนกรดจำลองอนุมูลซัลเฟต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

ค่าคงที่ของแบบจำลองไนโตรเจนที่หาได้แต่ละตัวสามารถทำให้ค่าคำนวณของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน แอมโมเนียม (NH_4^+) ไนเทรต (NO_3^-) ในสารละลายดิน และอินทรีย์ไนโตรเจนในดินมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากข้อมูลจริง ณ เวลาที่ 22, 29, 36 และ 43 วัน และให้ค่า standardized bias (R) น้อยกว่า |0.10| ในทุกระดับความรุนแรงของฝนกรด แสดงให้เห็นแบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลที่สร้างขึ้นสามารถใช้สมบัติดินมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในดินได้อย่างน่าพอใจ และระดับความรุนแรงของฝนกรดก็มีปฏิกิริยาสัมพันธ์กับสมบัติดินต่างๆ เหล่านั้นต่อความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในดิน เนื่องจากค่าคงที่ที่แสดงอิทธิพลของรูปของไนโตรเจนในดินและสมบัติดินนั้นๆ มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามระดับ pH น้ำฝน

ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของแบบจำลองที่ได้รับจากสถานการณ์ฝนกรดความรุนแรงระดับต่างๆ พบว่าที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่าน้อย Org-N และ NH_4^+ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน แต่ที่ระดับ pH น้ำฝนมีค่ามาก NO_3^- และไนโตรเจนรูปอื่นๆ จะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินแทน ปฏิกิริยาสัมพัทธ์ของความรุนแรงฝนกรดและ pH ดินเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ และ Org-N ในทางตรงข้ามจะลดความเป็นประโยชน์ของ NO_3^- ซึ่งเหมือนกับปฏิกิริยาสัมพันธ์ของ ρ_b และ θ_m ความรุนแรงฝนกรดส่งเสริมให้ลดความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+, Org-N และ NO_3^-, Org-N ตามลำดับ ส่วนปฏิกิริยาสัมพันธ์ของอินทรียวัตถุและพืชที่ปลูก ความรุนแรงของฝนส่งผลให้เพิ่มความเป็นประโยชน์ของ NH_4^+ และ NO_3^- ทั้งสองกรณี

ค่าคงที่ของแบบจำลองฟอสฟอรัสที่หาได้แต่ละตัวสามารถทำให้ค่าคำนวณของปริมาณ Avai.P ในสารละลายดินมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากข้อมูลจริง ณ เวลาที่ 22, 29, 36 และ 43 วัน และให้ค่า standardized bias (R) น้อยกว่า |0.10| ในทุกระดับความรุนแรงของฝนกรด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำสมบัติดินมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Avai.P ในสารละลายดินได้อย่างน่าพอใจ และระดับความรุนแรงของฝนกรดก็มีปฏิสัมพันธ์กับสมบัติดินต่างๆ เหล่านั้นต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน เนื่องจากค่าคงที่ที่แสดงอิทธิพลของสมบัติดินนั้นๆ มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามระดับ pH น้ำฝน

ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของแบบจำลองที่ได้รับจากสถานการณ์ฝนกรดความรุนแรงระดับต่างๆ พบว่าปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของฝนกรดจำลองและค่า pH ดิน ความชื้นดินจะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพิ่มความเป็นประโยชน์ให้แก่ฟอสฟอรัสในดิน แต่ส่งผลให้ปฏิกิริยาสัมพันธ์ของอินทรียวัตถุและพืชที่ปลูกลดความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

ค่าคงที่ของแบบจำลองโพแทสเซียมที่หาได้แต่ละตัวสามารถทำให้ค่าคำนวณของปริมาณ Exch. K ในสารละลายดินมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากข้อมูลจริง ณ เวลาที่ 22, 29, 36 และ 43 วัน และให้ค่า standardized bias (R) น้อยกว่า $|0.10|$ ในทุกระดับความรุนแรงของฝนกรด แสดงให้เห็นแบบจำลองเอ็มไพริเกิ้ลที่สร้างขึ้นสามารถนำสมบัติดินมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Exch. K ในสารละลายดินได้อย่างน่าพอใจ และระดับความรุนแรงของฝนกรดก็มีปฏิกิริยาสัมพันธ์กับสมบัติดินต่างๆ เหล่านั้นต่อความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน เนื่องจากค่าคงที่ที่แสดงอิทธิพลของสมบัติดินนั้นๆ มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามระดับ pH น้ำฝน

ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของแบบจำลองที่ได้รับจากสถานการณ์ฝนกรดความรุนแรงระดับต่างๆ พบว่าปฏิกิริยาสัมพันธ์ของความรุนแรงฝนกรดจำลองและค่า pH ดิน ความชื้นดิน และอินทรียวัตถุเพิ่มความเป็นประโยชน์ให้แก่โพแทสเซียมในดิน แต่ปฏิกิริยาสัมพันธ์ของพืชที่ปลูกจะลดความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน

แบบจำลองและค่าคงที่เอ็มไพริเกิ้ลที่สร้างขึ้นในรายงานนี้มีความเจาะจงอย่างมากกับสถาณการณ์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง ดังนั้นการนำค่าคงที่ของแบบจำลองที่หาได้ไปใช้จึงควรมีความเจาะจงในงานที่มีลักษณะที่คล้ายกับงานทดลอง แต่ถ้าเหตุการณ์มีความแตกต่างจากงานทดลองควรจะสอบเทียบหาค่าคงที่ของสมการเสียใหม่จึงจะมีความเหมาะสม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2548ก. **รายงานการจัดการทรัพยากรดินเพื่อการปลูกพืชเศรษฐกิจหลักตามกลุ่มชุดดิน เล่มที่ 1 ดินบนพื้นที่ราบต่ำ**. 576.

กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2548ข. **รายงานการจัดการทรัพยากรดินเพื่อการปลูกพืชเศรษฐกิจหลักตามกลุ่มชุดดิน เล่มที่ 2 ดินบนพื้นที่ดอน**. 645.

กุมุท สังขศิลา. 2549. **ระบบภูมิสารสนเทศเพื่อการเกษตรเบื้องต้น**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. นครปฐม.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 10. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จิตตานันท์ รังสิมันตุชาติ. 2549. **การศึกษาอิทธิพลของฝนจำลองที่มีอนุมูลซัลเฟตและออกไซด์ของไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบต่อสมบัติเคมีและธาตุอาหารในดิน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฐนันดร์ศักดิ์ (เวียงสารสิน) บวรนันทกุล. 2534. ฝนกรด, ตะกอนกรด Acid rain and precipitation. **วารสารวิทยาศาสตร์ ม.ก.** 9 (1-1): 71-90.

ธงชัย มาลา. 2546. **ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2546. **ธาตุอาหารพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุธารัตน์ วิทย์ชัยวุฒิวงศ์. 2538. **ผลกระทบของฝนกรดต่อการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ในดิน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Anderson, G. 1980. Assessing organic phosphorus in soils. p. 411-431. *In* F.E. Khasawneh, E.C. Sample, and E.J. Kamprath (ed.) **The role of phosphorus in sgriculture.** Am. Soc. of Agron., Madison, WI.

Andrews, R.E., and E.I. Newman. 1970. Root density and competition for nutrients. **Oecol. Plant.** 5: 319-334.

Bade, O. and S.D. Prober-t. 1993. Oxide of nitrogen in the earth's atmosphere: trends, sources, sinks and environmental impacts. **Applied Energy** 46 (1): 1-67.

Barrow, N.J. 1974. The slow reactions between soil and anions: I. Effects of time, temperature, and water content of a soil on the decrease in effectiveness of phosphate for plant growth. **Soil Sci.** 118: 380-386

Barrow, N.J., and T.C. Shaw. 1975a. The slow reaction between soil and anions. 2. Effect of time and temperature on the decrease in phosphate concentration in the soil solution. **Soil Sci.** 119: 167-177.

Barrow, N.J., and T.C. Shaw. 1975b. The slow reaction between soil and anions. 3. The effects of time and temperature on the decrease in isotopically exchangeable phosphate. **Soil Sci.** 119: 190-197.

Brady, N.C. and W. R. Ray. 2004. **Elements of the Nature and Properties of soils**. 13th ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey.

Chris, C.P.. 1987. **Acid rain : rhetoric and reality**. Methuen & Co. Ltd, London.

Cox, F.R., E.J. Kamprath, and R.E. McCollum. 1981. A descriptive model of soil test nutrient levels following fertilization. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45: 529-532.

Dalal, R.C. 1977. Soil organic phosphorus. **Adv. Agron.** 29: 83-117.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

David, H.F. and G.L. Bela. 2000. **Air pollution**. CRC Paess LLC, USA.

De Jager, A. 1979. Localized stimulation of root growth and phosphate uptake in *Zea mays* L. resulting from restricted phosphate supply. p. 391-403. *In* J.L. Harley and R.Scott Russell (ed.) **The soil-root interfacc.** Acadenic Press, New York.

Donald, L.S.. 2004. **Advances in Agronomy:Volume 81**. Academic Paess, New York.

Dutt, G. R., M. J. Shaffer, and W. J. Moore. 1972. **Computer simulation model of dynamic Bio-physicochemical processes in soils.** Tech. Bulletin 196. Arizona Agricultural Experiment Station. University of Arizona, Tucson, AZ.

Environmental Resources Ltd. 1983. **Acid Rain: A Review of The Phenomenon in The EEC and Europe**. Graham and Trotman for the Commission of the European for the Commission of the European communities, London.

Graf, B., M. Dingkuhn, F. Schnier, V. Coronel. And S. Akita. 1991. A Simulation Model for the Dynamics of Rice Growth and Development: III. Validation of Model with High-yielding Varieties. **Agricultural Systems**. 36: 329-349.

Greszta, J., A. Gruszka and T. Wachalewski. 1992. Humus degradation under the influence of simulated acid rain. **Water, Air and Soil Pollution** 63 (1-2): 51-66.

Grubber, G.J.H. and O.A. Denton. 2004. **Pant Resources of Tropical Africa 2 : Vegetables**. Backhuys, Netherlands.

Hanway, J.J. 1963. Growth stages of corn (*Zea mays* L.). **Agron. J.** 55: 487-492.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Jones, C.A. 1983. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. **Field Crops Res.** 6: 133-147

Jones, C.A., C.V. Cole, A.N. Sharpley, and J.R. Williams. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: I. Documentation. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 48: 800-805

Jungk, A., and S.A. Barber. 1974. Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. **Agron. J.** 66: 554-557.

Jungk, A., and S.A. Barber. 1975. Plant age and the phosphorus uptake characteristics of trimmed and untrimmed corn root systems. **Plant Soil** 42: 227-239.

Kytoviita M.M., H. Fritze and S. Neuvonen. 1990. The effects of acidic irrigation on soil microorganism at Kevo Northern Finland. **Environmental Pollution** 66 (1): 21-32.

Mehran, M., and K.K. Tanji. 1974. Computer modeling of nitrogen transformations in soils. **J.Environ**. Qual. 3: 391-395.

Metcalf and Eddy. 2003. **Wastewater Engineering:Treatment and Reuse**. 4th ed. McGraw-Hill, New York.

Miller, K.W., M.A. Cole and W.L. Banwart. 1991. Microbial population in a agronomically managed mollisol treated with simulated acid rain. **Journal of Environmental Quality** 20 (4): 845-849.

Nguyen, M.H. 2003. **Soil potassium dynamics under intensive rice cropping. Acase study in the Mekong Delta, Vietnam.** Ph.D Thesis, Wageningen University.

Rajan, S.S.S., and R.L. Fox. 1972. Phosphate adsorption by soils. I. Influence of time and ionic environment on phosphate adsorption. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** 3: 493-504.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Richter, J. 1987. **The Soil as a Reactor Modelling Processes in the Soil**, CATENA paperback.

_____. 1990. **Models for Processes in the Soil Programs and Exercise**, CATENA paperback

Russell, E.W. 1973. **Soil conditions and plant growth.** 10th ed. Longman, London.

Shaffer, M. J., R. W. Ribbens, and C.W. Huntly. 1977. **Production of mineral quality of irrigation return flow**, Vol. V, Detailed return flow salinity and nutrient simulation model. U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/2-77-179e, EPA.Ada, Okla.

Seligman, N.G., and H. van Keulen. 1981. PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitroger. p. 192-221. *In* M.J. Frissel and J.A. van Veen (ed.) **Simulation of nitrogen behavior of soil-plant systems.** Pudoc, Wageningen, The Netherlands.

Selim H.M., R.S. Mansell, and L.W. Zelazny. 1976. Modelling reactions and transport of potassium in soils. **Soil Sci.** 122: 77-84.

Simachaya, S. 1993. Acidic deposition in urban area of Thailand, pp. 268-274. *In* **International Conference on Environment and Climate Changes in East Asia, 30 November-3 December, 1993**. Bangkok, Thailand.

Vijay P.S. 1995. **Environmental Hydrology**. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Stephen, B. 2004. **Use of Acid/Base Distributions in pH Problems**. How about their use in pH calculations. Available Source: http://www.chem.usu.edu/~sbialkow/Classes/3600/alpha/alpha2.html, May 1, 2009.

Wark, K. and C.F. Warner. 1981. **Air Pollution: Its Origin and Control.** 2nd ed. Harper & Row, New York.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wellburn, A. 1990. **Air Pollution and Acid Rain**. Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., Singapore.

Williams, J.R., P.T. Dyke, and C.A. Jones. 1983. EPIC-a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. p. 553-572. *In* W.K. Lauenroth, G.V. Skogerboe, and M. Flug (ed.) **Analysis of ecological systems: State-of-the-art in ecological modeling.** Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam.

Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. **Trans. ASAE** 27: 129-144

Yost, R.S., E.J. Kamprath, G.C. Naderman, and E. Lobato. 1981. Residual effects of phosphorus applications on a high phosphorus adsorbing Oxisol of central Brazil. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45: 54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวณัฏฐยา เรือนแป้น
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 24 สิงหาคม 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดอ่างทอง
ประวัติการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์