

การผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียด จากปัจจัยที่ไม่มีชีวิต

Crop Production under Stress from Abiotic Factors



ชนากานต์ เทโบลต์ พรมอภัย
คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประวัติและผลงาน

รองศาสตราจารย์ ดร. ชนากานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย



ประวัติการศึกษาและการทำงาน

รองศาสตราจารย์ ดร. ชนากานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย จบการศึกษาระดับปริญญาเอก ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยแห่งชาติ จากสาขาวิชาพืชไร่ ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2547 หลังจากนั้น ได้รับทุนไปทำงานวิจัยหลังปริญญาเอกที่มหาวิทยาลัยควีนสแลนด์ รัฐควีนสแลนด์ ประเทศออสเตรเลีย และกลับมาทำงานในตำแหน่งอาจารย์ที่สาขาพืชไร่ ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ในปี พ.ศ. 2553 จนถึงปัจจุบัน

รางวัลที่เคยได้รับ

- รางวัลพระราชทานนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ จากมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปี พ.ศ. 2553
- รางวัลพระราชทานดุษฎีบัณฑิต คปก. ดีเด่น รุ่นที่ 1 สาขาวิทยาศาสตร์การเกษตรและเทคโนโลยี การเกษตร ปี พ.ศ. 2554
- รางวัลนักวิจัยรุ่นใหม่ดีเด่น สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ “ช้างทองคำ” ปี พ.ศ. 2558



การผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียด จากปัจจัยที่ไม่มีชีวิต

Crop Production under Stress from Abiotic Factors



ชนากานต์ เทโบลต์ พรมอภัย

สาขาวิชาพืชไร่ ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์
คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Crop Production under Stress from Abiotic Factors

การผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียดจากปัจจัยที่ไม่มีชีวิต

Crop Production under Stress from Abiotic Factors

บรรณาธิการ: เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม

ISBN (e-Book): 978-616-398-405-0

ผู้แต่ง: ชนากานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย

เจ้าของและผู้จัดพิมพ์: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำนักงานบริหารงานวิจัย สำนักงานมหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

โทรศัพท์: 0 5394 3603-4

โทรสาร: 0 5394 3600

<http://cmupress.cmu.ac.th>

E-mail: cmupress.th@gmail.com

พิมพ์ครั้งแรก: พฤษภาคม 2562

จัดรูปเล่ม: ตองสาม ดีไซน์

©สงวนลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ห้ามลอกเลียนแบบ ทำซ้ำ ดัดแปลง ส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้
รวมทั้งการจัดเก็บถ่ายทอไม่ว่ารูปแบบหรือวิธีการใด ๆ ด้วยกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์
การถ่ายภาพ การบันทึกหรือวิธีการอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต

คำนิยาม

สภาวะเครียด (Stress) ที่เกิดจากการมีสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม มีทรัพยากรไม่พอเพียง ร้อนเกินไป เย็นเกินไป มีน้ำมากเกินไป ดินขาดธาตุอาหาร หรือมีพิษจากการสะสมของเกลือหรือกรด เป็นสภาวะปกติของการเพาะปลูกทั่วโลก ความเข้าใจในกระบวนการทางสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งแนวคิดทฤษฎีที่ใช้อธิบายการตอบสนองของพืชต่อปัจจัยจำกัด มีความสำคัญยิ่งในการจัดการในระบบการเพาะปลูกและการลดสภาวะเครียด เพื่อให้ได้มาเพื่อผลผลิตและผลตอบแทนสูงสุด หนังสือเรื่องการผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียดจากปัจจัยที่ไม่มีชีวิต (Crop Production under Stress from Abiotic Factors) โดย รศ.ดร.ชนากานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย เล่มนี้ จึงมีความสำคัญต่อนักศึกษาและนักวิชาการ ในสาขาพืชศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกษตรกรรม ในการขยายขอบเขตแนวคิดและองค์ความรู้ออกไปจากสรีรวิทยาพื้นฐาน ให้ครอบคลุมไปถึงเงื่อนไข ข้อจำกัด และการตอบสนองของพืช อีกทั้งสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกษตรกรและนักวิชาการปฏิบัติงานในภาคสนามต้องประสบเป็นกิจวัตร และนักวิจัยในห้องปฏิบัติการที่มุ่งแก้ไขปัญหาเพื่อการพัฒนากระบวนการเพาะปลูก สมควรต้องได้เรียนรู้และคำนึงถึงอยู่เสมอ

ความก้าวหน้าทางสรีรวิทยา มีความเจาะจงเฉพาะทางเพิ่มมากขึ้น แต่ละสาขาวิชามีรายละเอียดลงลึกในเพียงปัจจัยเดียวที่มีผลกระทบต่อกระบวนการหนึ่ง ๆ ในต้นพืช ปัจจัยสภาวะเครียดที่หลากหลาย ตั้งแต่การเป็นพิษจากอนุมูลอิสระของออกซิเจนในระดับเซลล์และเนื้อเยื่อ การตอบสนองต่อแสงและอุณหภูมิ การเป็นพิษจากดินกรดและดินเค็ม และการขาดแคลนธาตุอาหารจำเป็น อีกทั้งสภาวะเครียดที่เกิดขึ้นจากสภาวะภูมิอากาศโลกเปลี่ยนแปลง ที่ครอบคลุมในหนังสือเล่มนี้ จึงให้ภาพรวมถึงสภาวะเครียดที่ประสบได้ทั่วในระบบการเพาะปลูกในประเทศไทย และเป็นการสร้างพื้นฐานเพื่อการศึกษาวิจัยลงลึกเฉพาะทางต่อไป

เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม

14 มกราคม 2562

คำนำ

การเขียนหนังสือเล่มนี้ใช้เวลาในการอ่านและเรียบเรียงทั้งหมดประมาณ 3 ปี ด้วยภาระงานของอาจารย์ทั้งสอน ทำงานวิจัย และการบริการวิชาการ ทำให้มีเวลาน้อยมากในการเรียบเรียงหนังสือ แต่อย่างไรก็ตาม ท้ายที่สุดก็ได้เรียบเรียงหนังสือเล่มนี้จนสำเร็จ โดยได้รับการช่วยเหลืออย่างดียิ่งในด้านข้อมูลการเขียนจาก ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม และเป็นแรงสำคัญในการผลักดัน รวมทั้งช่วยนำเสนอข้อมูลทางด้านทฤษฎีและข้อมูลงานวิจัยใหม่ ๆ ที่เกี่ยวข้อง ที่ช่วยอธิบายให้เห็นภาพการตอบสนองของพืชภายใต้สภาวะเครียดชนิดต่าง ๆ ให้ชัดเจนมากขึ้น จนสำเร็จออกมาเป็นหนังสือเรื่อง “การผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียดจากปัจจัยที่ไม่มีชีวิต” เพื่อให้มีความทันสมัยกับงานวิจัยในปัจจุบัน และที่สำคัญมีหนังสือตำราที่เป็นภาษาไทยที่เรียบเรียงเกี่ยวกับเรื่องนี้้น้อยมาก ส่วนมากเป็นตำราภาษาต่างประเทศที่มีเนื้อหากระจ่ายอยู่หลายเล่มไม่ได้อยู่ในเล่มเดียวกัน โดยความรู้ในตำราเล่มนี้จะเน้นสภาวะเครียดจากการผลิตพืชที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิตชนิดต่าง ๆ ประกอบไปด้วยสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะเครียดในการเจริญเติบโตและการสร้างผลผลิตของพืช กลไกในการเกิดและการปรับตัวของพืชให้สามารถอยู่รอดได้ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมนั้น ๆ ซึ่งประกอบด้วยสภาวะดินกรด ดินเค็ม แสงและอุณหภูมิ ธาตุอาหาร และสภาวะภูมิอากาศแปรปรวน อย่างไรก็ตามหนังสือเล่มนี้มิได้รวมเนื้อหาสาเหตุการเกิดสภาวะเครียดในพืชที่เกิดจากภัยแล้ง ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการตอบสนองมีความสลับซับซ้อนแตกต่างกันไปในพืชแต่ละชนิดซึ่งมีเนื้อหาค่อนข้างมากทั้งปฏิกิริยาที่เกิดในดินและพืช ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ช่วยตรวจแก้ไขหนังสือเล่มนี้อย่างละเอียดเข้มข้น จนมีเนื้อหาครบถ้วน มีความถูกต้องและความสมบูรณ์มากขึ้น

ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยประยุกต์ที่สอดแทรกผลการทดลองในหนังสือเล่มนี้ ทำให้เห็นการตอบสนองของพืชในสภาวะเครียดต่าง ๆ ได้เป็นรูปธรรมมากขึ้น และสามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาในการผลิตพืชได้เป็นอย่างดี

ชนากานต์ เทโบลต์ พรมอุทัย

สารบัญ

คำนิยาม	I
คำนำ	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	IX
สารบัญตาราง	XXIII

บทที่ 1 ความสำคัญของการผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียด	1
1.1 แนวคิดเรื่องการผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียด	2
1.2 นิยามของสภาวะเครียดทางสรีรวิทยาของพืช	3
1.3 มิติเวลาและมาตราส่วนของการปรับตัวต่อสภาวะเครียดของพืช	3
1.4 การตอบสนองทางสรีรวิทยาต่อสภาวะเครียดของพืช	9
1.5 การปรับตัวของพืชเมื่ออยู่ในสภาวะเครียด	19
1.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยสภาวะเครียดของพืชและมีผลไปจำกัดการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตในการปลูกพืช	21
1.7 การใช้ประโยชน์จากความรู้เรื่องการตอบสนองต่อสภาวะเครียดในพืช	22
บททวนท้ายบท	25
เอกสารอ้างอิง	26

บทที่ 2 การตอบสนองต่อสภาวะเครียดของพืชและสภาวะเครียดของพืชจากอนุมูลอิสระของออกซิเจน	27
2.1 การแบ่งเซลล์ การยืดขยายเซลล์ การเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์และการกำหนดควบคุมการแสดงออกของยีน	29
2.2 เยื่อหุ้มเซลล์ อวัยวะรับสัญญาณจากสภาวะเครียด	34
2.3 การเจริญเติบโตของพืชทั้งต้น	35

สารบัญ

2.4	การประเมินตอบสนองต่อสภาวะเครียด ในอาการที่ปรากฏเชิงปริมาณ	37
2.5	สมรรถภาพการใช้ปัจจัยเครียดกับความสามารถตอบสนองต่อการลดลง ของสภาวะเครียด	39
2.6	สภาวะเครียดจากอนุมูลอิสระของออกซิเจน	41
2.7	อนุมูลอิสระของออกซิเจน	42
2.8	สาเหตุการเกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนและผลกระทบต่อพืช	43
2.9	กลไกการป้องกัน ทนทาน หรือลดความเป็นพิษ	45
	บททวนท้ายบท	47
	เอกสารอ้างอิง	48

บทที่ 3 การเพาะปลูกพืชภายใต้สภาวะเครียดจากดินกรด 49

3.1	ปัจจัยจำกัดในดินกรด	51
3.2	ความสามารถยึดไอออนบวกของเม็ดดินและการเติมเต็มไอออนบวกด้วย ไอออนของธาตุที่มีคุณสมบัติเป็นต่าง	52
3.3	ความเป็นพิษของอะลูมินัม	57
3.4	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรากกับดิน	60
3.5	การปรับตัวต่อดินกรดในพืชต่างชนิด ต่างพันธุ์	63
3.6	ความเข้าใจกลไกการปรับตัวต่อดินกรด นำไปสู่การปรับปรุงพันธุ์และ ระบบการเพาะปลูกพืชในดิน	66
3.7	ความทนทานต่อดินกรดในพืชตระกูลถั่ว	67
3.8	กรณีพิเศษเกี่ยวกับข้าวนา	73
3.9	การแก้ไขปัญหาดินกรด	74
	บททวนท้ายบท	75
	เอกสารอ้างอิง	77

สารบัญ

บทที่ 4	การเพาะปลูกภายใต้สภาวะเครียดจากดินเค็ม	81
4.1	การแพร่กระจายและสาเหตุของการเกิดดินเค็ม	83
4.2	การจำแนกดินเค็ม	88
4.3	ปัญหาโบรอนเป็นพิษในดินเค็มและในน้ำชลประทาน	90
4.4	สภาวะเครียดจากการมีเกลือมากเกินไป	92
4.5	เกลือกับศักย์ภาพออสโมติก	92
4.6	การขาดน้ำและการขาดธาตุอาหาร	93
4.7	การเป็นพิษของเกลือ และสมดุลธาตุอาหาร	94
4.8	การสังเคราะห์ด้วยแสงกับการหายใจ	97
4.9	กลไกการปรับตัวต่อการมีเกลือมากเกินไป	97
4.10	พืชที่ทนเกลือไว้ภายนอก	98
4.11	พืชดูดเกลือ	98
4.12	การจัดการแก้ปัญหาดินเค็มเพื่อการเพาะปลูก	101
	บทวนท้ายบท	102
	เอกสารอ้างอิง	103
บทที่ 5	การเพาะปลูกภายใต้สภาวะเครียดจากอุณหภูมิและแสง	105
5.1	อุณหภูมิสูงไป/ต่ำไป แสงสว่างมากเกินไป	106
5.2	ความแปรปรวนในสภาวะเครียดกับการเปลี่ยนแปลงของความทนทานตามอายุขัยและระยะการเจริญเติบโตของพืช	108
5.3	การลดสภาวะเครียดจากอุณหภูมิสูงโดยการคายน้ำ	110
5.4	อุณหภูมิวิกฤติ	113

สารบัญ

5.5 การตอบสนองของพืชต่ออุณหภูมิในเชิงปริมาณ	114
5.6 กระบวนการทางชีวภาพภายใต้สภาวะเครียดจากอุณหภูมิสูง	120
5.7 เสถียรภาพของเยื่อหุ้มต่าง ๆ ในเซลล์	121
5.8 แสงสว่างมากเกินไป	126
บทวนท้ายบท	128
เอกสารอ้างอิง	129

บทที่ 6 การเพาะปลูกพืชภายใต้สภาวะเครียดจากการขาดธาตุอาหาร และธาตุอาหารเป็นพิษ 131

6.1 การหาธาตุอาหารของพืช	132
6.2 การอยู่แบบพึ่งพาอาศัยของพืชและจุลินทรีย์	143
6.3 ไมคอร์ไรซา	148
6.4 ธาตุอาหารเป็นพิษ	151
6.5 ผลกระทบจากการขาดธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต	157
6.6 แนวคิดเรื่องข้อจำกัดผลผลิตทางแหล่งสร้างอาหารหรือแหล่งเก็บสะสมอาหาร	159
6.7 ธาตุอาหารกับการสังเคราะห์ด้วยแสง	159
6.8 สังกะสีกับการสังเคราะห์โปรตีน	173
6.9 ธาตุอาหารกับผลผลิตทางเศรษฐกิจ	175
6.10 กระบวนการสะสมอาหาร (แป้ง น้ำตาล) จากการสังเคราะห์ด้วยแสง	179
6.11 ธาตุอาหารกับคุณภาพผลผลิต	180
6.12 ธาตุอาหารกับคุณค่าทางโภชนาการ (อาหารคน และอาหารสัตว์)	182
6.13 การวินิจฉัยการขาดธาตุอาหารและธาตุอาหารเป็นพิษในพืช	184

สารบัญ

6.14 การสังเกตอาการขาดธาตุอาหารของพืช	187
6.15 การวิเคราะห์พืช	190
6.16 หลักการวินิจฉัยการขาดธาตุอาหารพืชหรือธาตุอาหารเป็นพิษด้วยการวิเคราะห์พืช	190
6.17 ค่าอ้างอิง	192
6.18 ความแปรปรวนในค่าอ้างอิง	194
6.19 การวิเคราะห์ดิน	199
6.20 การทดลองการใส่ปุ๋ยเพื่อการยืนยันและในวินิจฉัยในระดับแปลง	200
6.21 การแปลผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	200
บทวนท้ายบท	203
เอกสารอ้างอิง	205

บทที่ 7 การเพาะปลูกพืชภายใต้สภาวะเครียดจากสภาพภูมิอากาศแปรปรวน 211

7.1 การเกิดสภาวะโลกร้อน	212
7.2 ภูมิอากาศประเทศไทยในสภาวะโลกร้อน	216
7.3 กระบวนการขับเคลื่อนภูมิอากาศในภูมิภาค	218
7.4 แนวโน้มผลผลิตพืชในโลก	220
7.5 ผลกระทบจากโลกร้อน และความสามารถในการปรับตัว	223
7.6 สถานภาพปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลง และการเจริญเติบโตของพืช	226
7.7 ความแปรปรวนผิผิวของผลผลิต	231
7.8 การเตรียมระบบการเพาะปลูกไทยเพื่อสู้โลกร้อน – กรณีตัวอย่างจากข้าว	233
7.9 ความทนทานต่ออุณหภูมิสูง	233

สารบัญ

7.10 ความทนทานต่อผลกระทบทางอ้อมของโลกร้อน	234
7.11 การทำนายด้วยแบบจำลอง	237
บททวนท้ายบท	240
เอกสารอ้างอิง	241
บทสรุป	245
ดัชนี	247

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1	แบบจำลองแสดงมิติของเวลาและมาตราส่วนในการตอบสนองต่อสภาวะแวดล้อมในสิ่งมีชีวิต	5
ภาพที่ 1.2	การตอบสนองของพืชชนิดต่าง ๆ โดยการปรับตัวเมื่อเกิดสภาวะเครียดเนื่องจากการเจริญเติบโตอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม	11
ภาพที่ 1.3	แปลงทดสอบการปรับตัวของพันธุ์ข้าวในสภาวะที่ดินขาดธาตุอาหาร และธาตุอาหารเป็นพิษ	12
ภาพที่ 1.4	แผนที่แสดงความถี่ในการเกิดเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทั้งกลางวันและกลางคืนที่ได้สำรวจและเก็บข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1983-2011	13
ภาพที่ 1.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่ำสุดหรืออุณหภูมิกกลางคืนกับ (ก) ผลผลิตของข้าว และ (ข) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกกลางคืนต่อปริมาณการติดเมล็ด	14
ภาพที่ 1.6	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นในแอฟริกาจากปัจจุบันในปี ค.ศ. 2015 จนถึงปี ค.ศ. 2070 ทำให้บางพื้นที่ของแอฟริกาไม่สามารถปลูกข้าวได้เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงเกินไป	15
ภาพที่ 1.7	ลักษณะของเมล็ดข้าวในระยะสุกแก่ (ก) เมล็ดที่มีการผสมและเมล็ดสมบูรณ์เต็มเมล็ด (ข) เมล็ดที่มีการผสมแต่เมล็ดไม่สมบูรณ์ และ (ค) เมล็ดที่ไม่มีการผสม	16
ภาพที่ 1.8	จุดวิกฤติในระยะการเจริญเติบโตของข้าวสาลีเมื่อได้รับอุณหภูมิต่ำในสภาพภูมิอากาศแบบเมดิเตอร์เรเนียน	18
ภาพที่ 1.9	ผลผลิตของข้าวเมื่อให้สภาพเครียดจากดินเค็มที่ระดับแตกต่างกัน (0-8) ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าว	19
ภาพที่ 1.10	การปรับตัวของพืชต่อสภาวะเครียดชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชในระดับแอคไคลเมชัน (acclimation) และอะแดปเทชัน (adaptation)	20
ภาพที่ 1.11	การไหลของน้ำจากรอยร้าวที่อยู่ต่ำสุดของถึงน้ำจากกฏปริมาณต่ำสุด	21
ภาพที่ 1.12	เปรียบเทียบน้ำและปุ๋ยไนโตรเจนที่เป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตของพืชจากกฏปริมาณต่ำสุดและทฤษฎีการทดแทน	22

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1	สภาวะเครียดกับการแบ่งเซลล์ราก (ก) ผลกระทบจากพิษอะลูมิเนียม (5 มิลลิกรัม/ลิตร) ต่อการแบ่งเซลล์ในรากถั่วพุ่ม หน่วยเป็นสัดส่วนเซลล์ในสภาพไม่มีอะลูมิเนียม สังเกตการฟื้นตัวจากสภาวะเครียด แม้ไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (ข) รากข้าวสาลีในสภาวะเครียดด้วยพิษอะลูมิเนียม	29
ภาพที่ 2.2	การปรับตัวต่อสภาพน้ำท่วมในข้าวด้วยการผลิตฮอร์โมนเอธิลีนเพื่อกระตุ้นการยืดเซลล์และปล้อง	30
ภาพที่ 2.3	ความแตกต่างระหว่างพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ ในตำแหน่งของเซลล์ที่ยืดขยายและสภาพน้ำของเซลล์	32
ภาพที่ 2.4	การเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์ให้พัฒนาเป็นเนื้อเยื่อใหม่ในข้าวโพดจากส่วนยอดไปเป็นช่อดอกตัวผู้และช่อดอกตัวเมีย	32
ภาพที่ 2.5	พัฒนาการดอกตัวผู้ในข้าวโพด จากส่วนยอด (ก) ที่ได้เปลี่ยนลักษณะมา มีทั้งดอกตัวผู้และตัวเมีย (ข-ค) จากการแสดงออกของยีนในการยับยั้งพัฒนาการต่อไปของเกสรตัวเมีย กลายเป็นดอกตัวผู้ที่มองเห็นได้แต่เพียงอับเรณู	33
ภาพที่ 2.6	ฝักอ่อนข้าวโพด (ดอกตัวเมีย) ที่ขาด (B0) และไม่ขาด (B20) ธาตุอาหารโบรอน (ก) การขาดธาตุโบรอนมองเห็นได้จากภายนอกเหมือนมีหลายฝัก (ข) เมื่อลอกกาบหุ้มออกเห็นเป็นกิ่งก้านเหมือนช่อดอกตัวผู้และมีไหม (stigma + style) เพียงจำนวนน้อย	33
ภาพที่ 2.7	แบบจำลองเยื่อหุ้มเซลล์ แสดงไขมันสองชั้นที่มีส่วนที่มีไอออนควบคุมการผ่านเข้าออกได้ และส่วนโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นประตูเปิดปิดในการลำเลียงสารอาหารและสารประกอบจำเป็นอื่น ๆ ผ่านเข้าออกและรับรู้ส่วนของสัญญาณจากสภาวะเครียดภายนอก	34
ภาพที่ 2.8	แบบจำลองแสดงลักษณะการตอบสนองต่อปัจจัยจำเป็นในเชิงปริมาณแสดงจุดอ้างอิง 3 จุด ได้แก่ จุดต่ำสุด (Minimum) หมายถึงระดับต่ำสุดของปัจจัยที่กระบวนการนั้นดำเนินไปได้ จุดสูงสุด (Maximum) หมายถึงระดับ สูงสุดของปัจจัยที่กระบวนการนั้นสามารถดำเนินไปได้ และ จุดเหมาะสม (Optimum) หมายถึงช่วงระดับปัจจัยที่กระบวนการดำเนินไปในอัตราสูงสุด	37

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.9	การตอบสนองต่อระดับไนโตรเจนในข้าว	38
ภาพที่ 2.10	ผลของการระบาดของข้าววัชพืชต่อผลผลิตข้าว พันธุ์สุพรรณบุรี 1 และ ชัยนาท 1 ที่จังหวัดกาญจนบุรี	38
ภาพที่ 2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับธาตุอาหารโบรอนในอับเรณูกับการติดเมล็ด (ความสมบูรณ์ของละอองเรณู)	39
ภาพที่ 2.12	ลักษณะความทนทานที่พืชแสดงออกและการตอบสนองต่อการลดลงของ สภาวะเครียดทั้ง 6 แบบ	41
ภาพที่ 2.13	อนุมูลอิสระของออกซิเจน แสดงรูปโมเลกุลพร้อมด้วยอิเล็กตรอนที่มีคู่ และ ไม่มีคู่	42
ภาพที่ 2.14	คลอโรพลาสต์ (ก) แหล่งรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนพลังงานแสง (โฟตอน) เป็นพลังงานเคมี (อิเล็กตรอน, ATP) ที่นำไปใช้ในการสังเคราะห์ ด้วยแสง (เปลี่ยน คาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นพลังงานชีวภาพคาร์โบไฮเดรต) (ข) ภาพจำลองเยื่อหุ้มไทลาคอยด์แสดงตำแหน่งกิจกรรม PSI, PSII	43
ภาพที่ 2.15	จำลองห่วงโซ่การลำเลียงอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosystem I, II) และการสังเคราะห์โมเลกุล ATP จาก ADP (photophosphorylation) ที่เยื่อหุ้มไทลาคอยด์ ในวงกลมคืออนุมูลอิสระ ของออกซิเจนในรูปต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ใน PSI และ PSII	44
ภาพที่ 2.16	ทางเลือกสองเส้นทางของห่วงโซ่อิเล็กตรอนในระบบการสังเคราะห์ด้วยแสง ❶ พลังงานที่ถูกนำไปใช้ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์ ด้วยแสง ❷ พลังงานที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่ถูกลดพิษลง เป็น H_2O_2 โดยเอนไซม์ SOD (superoxide dismutase) ที่มีทองแดงและ สังกะสี (Cu, Zn) เป็นตัวกระตุ้น และพิษของ H_2O_2 ถูกลดลงโดย GR (glutathione reductase) กับ APO (ascorbate peroxidase) ให้กลายเป็นน้ำกับออกซิเจน	44

สารบัญภาพ

ภาพที่ 3.1	จำลองการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในเม็ดดิน (ดินเหนียว-ฮิวมัส) (ก) ที่มีไอออนลบบนผิวสามารถยึดไอออนบวกที่มีคุณสมบัติเป็นต่าง (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) บนตำแหน่งแลกเปลี่ยนไอออนในดินเป็นกลาง-ต่าง และ (ข) ไอออนบวกที่มีคุณสมบัติเป็นกรด (Al^{3+}) บนตำแหน่งแลกเปลี่ยนไอออนในดินกรด	52
ภาพที่ 3.2	การละลายของอะลูมินัมออกมาเพิ่มขึ้นตามความเป็นกรด-ต่างที่ลดลงจนถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเป็นกรดระดับ 4.7 โดยอะลูมินัมมีคุณสมบัติทางเคมีเป็นกรด (เหมือนไฮโดรเจน) เกลืออะลูมินัม เช่น อะลูมินัมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) หรือ อะลูมินัมคลอไรด์ (AlCl_3) เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายที่มีความเป็นกรดที่ระดับ 3-4	53
ภาพที่ 3.3	ระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารตามระดับความเป็นกรดต่างของดิน (เปรียบเทียบตามความหนาของแถบถึงหนามาก = มีความเป็นประโยชน์สูง)	55
ภาพที่ 3.4	ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารที่ระดับกรดต่างในดินต่างกัน	56
ภาพที่ 3.5	การตอบสนองต่อโมลิบดีนัม (Mo) และความเป็นกรดของดินในถั่วเหลือง ($\text{Mo} \times \text{pH}$ significant $P < 0.01$) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละกรรมวิธีการทดลองโดยใช้ค่าความแตกต่างที่มีค่าน้อยที่สุด (Least Significant Difference; LSD) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	57
ภาพที่ 3.6	ผลกระทบของอะลูมินัมต่อการเจริญของปลายราก (ก a) รากปกติ และ (ก b) รากที่ถูกพิษของอะลูมินัมต่อการเจริญในบริเวณ 2-3 มิลลิเมตร ของปลายราก (ข) โดยจำกัดการเจริญของหัวมกราก เนื้อเยื่อเจริญ และบริเวณยึดขยายปลายราก	59
ภาพที่ 3.7	การลำเลียงไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมเข้าสู่เซลล์ลำเลียงน้ำ (ก) ผ่านทางผนังเซลล์ และ (ข) ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์โดยอาศัยโปรตีนขนส่ง	59

สารบัญภาพ

ภาพที่ 3.8	การขับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกจากรากทานตะวัน (ก) ที่ใช้ในเตรต (NO_3^-) เมื่อมีธาตุเหล็กพอเพียง (ข) ที่ใช้แอมโมเนียม (NH_4^+) เมื่อมีธาตุเหล็กพอเพียงและ (ค) ใช้ในเตรต (NO_3^-) เมื่อขาดธาตุเหล็ก บริเวณที่เป็นสีขาวคือการเปลี่ยนสีของโบรมโครโซลบลู (Bromocresol blue) ที่มีความไวต่อการเป็นกรด	62
ภาพที่ 3.9	การปลดปล่อยฟอสเฟตจากฟอสเฟตของเหล็กและอะลูมิเนียม (Al/Fe phosphage) โดยกรดอินทรีย์ที่ยึดอะตอมเหล็กหรืออะลูมิเนียมไว้ไม่ให้เป็นพิษ	63
ภาพที่ 3.10	ลำดับความทนทานต่อแมงกานีส (Mn) และอะลูมิเนียม (Al) ในพืชต่างชนิด (วัดด้วยผลผลิตน้ำหนักรากแห้งในสภาพที่อะลูมิเนียมหรือแมงกานีสเป็นพิษในสัดส่วนของเมื่อไม่มีพิษ)	64
ภาพที่ 3.11	ปฏิกิริยาสี้อมฮิมาโตซิลินกับอะลูมิเนียมในสายพันธุ์ไม่ทนทานอะลูมิเนียม และ ไม่เกิดสีในสายพันธุ์ทนทาน	67
ภาพที่ 3.12	ความแตกต่างในการเกิดปมในลำพุ่มหญ้า <i>Trifolium subterraneum</i> โดยแบบที่เรียกว่าปม 12 สายพันธุ์ ที่ปลูกในดินที่มีความเป็นกรดระดับ 4.1	68
ภาพที่ 3.13	การตอบสนองต่อโมลิบดีนัมในลำ <i>Desmodium intortum</i> ในดินที่มีความเป็นกรดระดับ 4.7	70
ภาพที่ 3.14	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดของดินกับความเข้มข้นโมลิบดีนัม 0 (Mo-0) และ 5 (Mo-5) มิลลิกรัม/กระถางต่อการสะสมน้ำหนักรากแห้งในลำเหนือ	71
ภาพที่ 3.15	ผลของการเพิ่มความเป็นกรด-ด่าง การเพิ่มฟอสฟอรัสและการปลูกเชื้อราเอเอ็มต่อการสะสมน้ำหนักรากแห้งในลำพุ่ม (<i>Vigna unguiculata</i>)	72
ภาพที่ 3.16	ผลของการเพิ่มความเป็นกรด-ด่างและการปลูกเชื้อราเอเอ็มต่อการสะสมน้ำหนักรากแห้งและไนโตรเจนในไมยราบ (<i>Mimosa invisa</i>)	72
ภาพที่ 3.17	การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของดินต่างชนิดหลังจากถูกน้ำขัง	73

สารบัญภาพ

ภาพที่ 4.1	ความแตกต่างในความทนทานต่อเกลือในพืชต่างชนิด เปรียบเทียบจากปริมาณเกลือ (วัดด้วยการนำไฟฟ้า – EC_e) สูงสุดที่ทนได้โดยไม่เกิดสภาวะเครียด ($dS\ m^{-1}$ = desi-siemen/m)	83
ภาพที่ 4.2	ช่วงห่างระหว่างพันธุ์พืชแต่ละชนิด ในความอ่อนแอ และทนทานต่อเกลือ (GY = ผลผลิตเมล็ด; DW = น้ำหนักแห้ง; S = จำนวนต้นที่รอดชีวิต)	85
ภาพที่ 4.3	อัตราการขยายพื้นที่เปิดป่าและอัตราการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ดินเกลือในประเทศออสเตรเลีย ในเวลาระหว่าง ค.ศ. 1950 - 1990	86
ภาพที่ 4.4	ผลการใส่ปุ๋ยขี้มูลในการลดความเป็นพิษของเกลือในมันฝรั่ง	95
ภาพที่ 4.5 ก	ผลของการเพิ่มสัดส่วนแคลเซียม/โซเดียมต่อการเจริญเติบโตในข้าว	96
ภาพที่ 4.5 ข	ผลของการเพิ่มสัดส่วนแคลเซียม/โซเดียม ต่อการลดการสะสมโซเดียมและลดการเป็นพิษของโซเดียมในต้นข้าว	96
ภาพที่ 4.6	การสะสมเกลือในใบและการกักเกลือจากดอก <i>Aster tipolium</i>	99
ภาพที่ 4.7 ก	ความแตกต่างในการทนทานต่อเกลือโซเดียมคลอไรด์แต่ละระดับ ความเข้มข้น (0, 25, 50, 100 มิลลิโมลาร์) ในพืช 3 ชนิด	100
ภาพที่ 4.7 ข	ความแตกต่างในการสะสมโซเดียม คลอไรด์ โพแทสเซียม และแคลเซียม ในพืช 3 ชนิด (ในภาพที่ 4.6 ก) ที่ปลูกในเกลือโซเดียมคลอไรด์ 4 ระดับ (0, 25, 50, 100 มิลลิโมลาร์)	100
ภาพที่ 5.1	ดัชนีเอ็นไอแสดงช่วงเอลนีโญ (El Niño) (อุณหภูมิสูงและฝนแล้ง) เมื่อ MEI เป็นบวก และช่วงลานีญา (La Niña) (อุณหภูมิต่ำและฝนชุก) เมื่อ MEI เป็นลบ	107
ภาพที่ 5.2	ระยะการเจริญเติบโตของข้าวสาลี (a) ตามเวลาในปฏิทินที่ปลูกในภูมิภาคแบบเมดิเตอร์เรเนียนในซีกโลกภาคใต้กับ (b) ความเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของอุณหภูมิต่ำสุด และ (c) ความแตกต่างในความทนทานต่อความหนาวเย็นของต้นข้าวสาลีในระยะการเจริญเติบโตตั้งแต่ตั้งออกรากจนถึงสุกแก่	109
ภาพที่ 5.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ผลผลิตข้าวสาลีในเขตร้อนกับความสามารถลดอุณหภูมิทรงพุ่ม (Canopy temperature depression, CTD) ในข้าวสาลี 23 พันธุ์ และ (ข) ในลูกผสมของข้าวสาลีพันธุ์ทร้อน (Seri 82) และไม่ทร้อน (Siete Cerros 66) จำนวน 40 ไหล่	112

สารบัญภาพ

ภาพที่ 5.4	ภาพจำลองโมเลกุลฮีโมโกลบิน (ก) แสดงการเชื่อมโยงระหว่างอะตอมคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ไนโตรเจน (N), ออกซิเจน (O) และเหล็ก (Fe) และ (ข) โครงสร้างสามมิติของการม้วนตัวขององค์ประกอบโมเลกุล	113
ภาพที่ 5.5	ความยาววัน (ช่วงแสง) ในข้าวโลกซีกเหนือตามตำแหน่งเส้นรุ้ง $0^{\circ} - 60^{\circ}\text{N}$ แสดงวันสั้นที่สุดในวันที่ 23 ธันวาคม ถึงวันยาวที่สุด วันที่ 23 มิถุนายน (ข้าวโลกซีกใต้) ในทุกที่ทุกแห่งทั่วโลกวันที่กลางวันและกลางคืนยาว 12 ชม. เท่ากัน คือ 23 มีนาคม และ 23 กันยายน	118
ภาพที่ 5.6	อัตราการเจริญเติบโตในกล้าข้าวพันธุ์ IR8 ถึงอายุ 0-5 สัปดาห์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของอัตราการเจริญเติบโตที่ 30 องศาเซลเซียส	119
ภาพที่ 5.7	ผลกระทบจากอุณหภูมิสูงใน <i>Artiplex sabulosa</i> (พืชเขตหนาวจากชายฝั่งแคลิฟอร์เนียตอนเหนือ) กับ <i>Tidestromia oblongifolia</i> (พืชเขตร้อนจากรัฐแคลิฟอร์เนีย) ต่อ (A) การสังเคราะห์ด้วยแสง (B) การหายใจในใบที่ติดอยู่บนต้น และ (C) การรั่วไหลของสารละลายออกจากใบที่ฉีกขาดในน้ำ	121
ภาพที่ 5.8	ภาพแสดงโครงสร้างสำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์	122
ภาพที่ 5.9	การตอบสนองต่อความเข้มแสงในพืชชอบแดด และพืชชอบร่ม แสดงความเข้มแสงที่จุดการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับการหายใจ (สังเคราะห์ด้วยแสง = หายใจ เรียกว่าไม่ตายแต่ไม่โต) ในพืชชอบร่มที่ต่ำกว่าในพืชชอบแดด และจุดอิมพัลส์ที่อาจเกิดสภาวะเครียดจากแสงมากเกินไปได้	126
ภาพที่ 5.10	คลอโรซิส (Chlorosis - การสูญเสียคลอโรฟิลล์) เนื่องจากสภาวะเครียด เพราะมีแสงมากเกินไป และขาดสังกะสีที่ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ที่ทำหน้าที่เก็บกวาดอนุมูลอิสระของออกซิเจน เห็นเป็นสีเหลือง (สีขาวในภาพขาวดำ) (a) ส่วนที่มีกระดากบังแสงไว้ (b) เมื่อเปิดออกจะเห็นแถบสีเขียวไม่มีอาการคลอโรซิส (สีดำในภาพขาวดำ) และ (c) สามารถเขียนเป็นตัวหนังสือลงบนใบโดยใช้กระดากบังแสงไว้ตามต้องการ	127

สารบัญภาพ

ภาพที่ 6.1	การหาอาหารของพืชจากดินโดย 3 ทาง	132
ภาพที่ 6.2	รากข้าวโพด (ด้วยภาพถ่ายกัมมันตภาพรังสีของ ^{32}P) แสดงการดูดธาตุฟอสฟอรัส บริเวณสีดำคือ ^{32}P ที่ถูกรากดูดไป	134
ภาพที่ 6.3	ความแตกต่างในความเข้มข้นของโพแทสเซียมในสารละลายดิน ตามระยะทางจากบริเวณผิวรากออกไปในเนื้อดิน	135
ภาพที่ 6.4	อัตราการดูดโพแทสเซียมในพืชที่มีขนรากในปริมาณที่มากมีอัตราการดูดแตกต่างกัน	136
ภาพที่ 6.5	การเพิ่มความสามารถดูดอาหารตามการเพิ่มความหนาแน่นราก	138
ภาพที่ 6.6	ความหนาแน่นรากและการกระจายความยาวราก ตามระดับความลึกของรากในดิน	138
ภาพที่ 6.7	การกระจายของรากข้าวบาร์เลย์ตามระดับที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ที่ความลึก (ก) 0 - 18 ซม. (ข) 18 - 36 ซม. และ (ค) 36 - 54 ซม.	139
ภาพที่ 6.8	ความเป็นกรดต่าง ในบริเวณรอบ ๆ รากที่ถูกเปลี่ยนเป็นกรดหรือต่างมากขึ้นโดยพืช รากถั่วลูกไก่ (<i>Cicer arietinum</i> ช่าย) และรากข้าวโพด (ขว) ย้อมด้วยสี โบรโมครีซอลบลู (bromocresol purple) ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นกรดต่าง (ที่เป็นสีเขารอบ ๆ รากคือสีของโบรโมครีซอลบลูที่เปลี่ยนไปจากกรดที่ถูกขับออกมาจากราก)	140
ภาพที่ 6.9	รากข้าวบาร์เลย์ที่สามารถเปลี่ยนความเป็นกรด-ต่างในดินรอบ ๆ รากให้เป็นกรดมากขึ้น และละลายธาตุเหล็กออกมาให้ดูดใช้ได้ ที่เป็นสีเขารอบ ๆ รากคือสีของโบรโมครีซอลบลูที่เปลี่ยนไปจากกรดที่ถูกขับออกมาจากราก บริเวณรากที่มีการขับกรดในรากที่ขาดเหล็ก (ภาพขาวสุด) มีการผลิตกรดออกมามากเป็นพิเศษ ถึง 28 ไมโครโมลไฮโดรเจนไอออน ($\mu\text{mole H}^+$) ต่อกรัมน้ำหนักสดต่อชั่วโมง	142

สารบัญภาพ

ภาพที่ 6.10	การสร้างปมของรากต้นถั่ว (A) รากถั่วพร้อมปม (B) การเกิดปมบนรากถั่วที่ควบคุมโดย “ปัจจัยพืช” – Plant factors และ “ปัจจัยปม” – Nod factors (C) พัฒนาการปม เกิดจากการแบ่งเซลล์ที่มีไรโซเบียมที่ทำหน้าที่ตรึงไนโตรเจนจากอากาศอยู่ภายใน การสูญเสียความสามารถแบ่งเซลล์และการเชื่อมต่อระหว่างรากกับปมถั่วในภาพตัดขวางผ่านปม-ราก ท่อลำเลียงน้ำและท่อลำเลียงอาหารในมัดท่อลำเลียง (vascular bundles) ที่สร้างขึ้นโดยพืชในระหว่างพัฒนาปมเพื่อเป็นเส้นทางลำเลียงแลกเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตจากการสังเคราะห์แสงที่ส่งลงมาในท่อลำเลียงอาหารในรูปน้ำตาลซูโครส และไนโตรเจนที่ตรึงได้ถูกสังเคราะห์เป็นกรดอะมิโน เอไมด์ หรือยูรีโอต์ ตามชนิดของถั่ว ที่ส่งกลับขึ้นไปทางท่อลำเลียงน้ำเพื่อใช้ในการสร้างต้นใบหรือผลผลิตเมล็ด	144
ภาพที่ 6.11	ปมแสดงเซลล์รากพืช (ก) ที่เปลี่ยนสภาพเป็นปมตัดตามขวาง และ (ข) ภาพภายในเซลล์แสดงแบคทีเรียไรโซบ์ (B) ล้อมรอบด้วยเยื่อฮีโมโกลบินบรรจุอยู่ในถุง	145
ภาพที่ 6.12	การทำงานของระบบเอนไซม์ไนโตรจีเนส ซึ่งประกอบด้วยโปรตีน 2 โมเลกุล (Fe Protein และ MoFe Protein) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการเปลี่ยนไนโตรเจนที่อยู่ในรูปก๊าซ (N_2) เป็นแอมโมเนีย (NH_3)	147
ภาพที่ 6.13	ผลกระทบจากไนโตรเจนจากดินและปุ๋ยต่อ (ก) ไนโตรเจนในพืช (ข) ไนโตรเจนที่ตรึงได้จากอากาศ (ค) ไนโตรเจนจากดินและปุ๋ย (NH_4^+ ; NO_3^-)	149
ภาพที่ 6.14	Arbuscular mycorrhizal (AM fungi – เชื้อราเอเอ็ม) แสดง A – arbuscule มีหน้าที่แลกเปลี่ยนน้ำและอาหารระหว่างพืชและเชื้อรา V – vesicle เป็นที่มาของเชื้อเดิม vesicular arbuscular mycorrhiza (VAM) แต่เมื่อมีการพบไมคอร์ไรซาหลายชนิดที่ไม่มี vesicle จึงเรียกว่า arbuscular mycorrhizal (AM) H – hypha เส้นใยที่ยื่นออกไปในดิน เพิ่มพื้นผิวดูดน้ำดูดอาหารให้พืชได้ถึง 5 - 6 เมตร	

สารบัญภาพ

ภาพที่ 6.15	ภาพแสดง (ก) คุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในเม็ดดิน (Cation Exchange Capacity, CEC) และ (ข) การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นแคลเซียม (Ca^{2+}) เมื่อดินเป็นด่างมากขึ้น หรือเป็นอะลูมิเนียม (Al^{3+}) เมื่อดินเป็นกรดมากขึ้น	154
ภาพที่ 6.16	เส้นทางลำเลียงน้ำและอาหารจากดินผ่านผนังเซลล์ (apoplast) และภายในเซลล์ (symplast) สู่ท่อไซเล็ม	156
ภาพที่ 6.17	ความแตกต่างของผลผลิตในความอ่อนแอ/ทนทานต่อดินกรดของมันสำปะหลัง มันเทศ บอนและมันแย้ม	157
ภาพที่ 6.18	ความเข้มข้นธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในต้นถั่วเหลืองที่ลดลงตามอายุ	158
ภาพที่ 6.19	การเกิดใบข้าวสาลีสองพันธุ์ (Bencubbin; Miling) ตามอุณหภูมิสะสมที่ 5 วันปลูก (D1-D5)	161
ภาพที่ 6.20	ผลของการลบสถานะเครียดต่อการเกิดใบข้าวสาลี ด้วยการใส่ไนโตรเจนในระยะเกิดลำต้นหลัก (MS+N) หน่อที่ 1 (T1+N) หน่อที่ 2 (T2+N) และหน่อที่ 3 (T3+N)	161
ภาพที่ 6.21	กำเนิดใบและหน่อใหม่ในข้าว ข้าวสาลี พันธุ์ข้าวที่แตกกอได้ดี (สร้างใบใหม่ไปได้เรื่อย ๆ จากหน่อใหม่) พันธุ์ข้าวที่แตกกอน้อยมีจำนวนใบจำกัดตามจำนวนหน่อ	162
ภาพที่ 6.22	ความสัมพันธ์แบบสมการถดถอยระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงกับดัชนีพื้นที่ใบ	164
ภาพที่ 6.23	ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ 0, 100 และ 200 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ต่อดัชนีพื้นที่ใบในข้าวโพดลูกผสมพันธุ์ Pioneer 309B หลังจากการปลูก	164
ภาพที่ 6.24	การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอนไซม์รูบิสโค (Rubisco) มีแมกนีเซียมเป็นโคแฟกเตอร์ช่วยในการทำงานของเอนไซม์	165
ภาพที่ 6.25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ที่แสดงระดับการสังเคราะห์ด้วยแสงกับไนโตรเจนในใบข้าวโพด ข้าวและถั่วเหลืองที่ได้รับแสงเต็มที่	166

สารบัญภาพ

ภาพที่ 6.26	โมเลกุลคลอโรฟิลล์มีอะตอมแมกนีเซียมอยู่ตรงกลางของวง	167
ภาพที่ 6.27	สองทางเลือกในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเมื่อพืชขาดแมกนีเซียม	169
ภาพที่ 6.28	ตัวอย่างการเชื่อมโยงของสังกะสีกับเอนไซม์และสังกะสีกับโปรตีน	170
ภาพที่ 6.29	การทำงานของเอนไซม์คาร์บอนิกแอนไฮเดรสที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ (ก) การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์คาร์บอนิกแอนไฮเดรส (CA) เป็นไฮโดรเจนคาร์บอเนต (HCO_3^-) (ข) ที่ถูกลำเลียงเข้าสู่คลอโรพลาสต์ได้มากเป็นสิบเท่าของการลำเลียงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (ไฮโดรเจนคาร์บอเนต เท่ากับ 41 ไมโครโมลาร์และ คาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 4 ไมโครโมลาร์) ในพืช C_4 (ค) ที่มีกิจกรรมการตรึงคาร์บอนจากไฮโดรเจนคาร์บอเนต พีอีพี คาร์บอกซิเลส (HCO_3^- PEP carboxylase) ในคลอโรพลาสต์ที่อยู่ในมีโซฟิลล์ของใบ	172
ภาพที่ 6.30	การตอบสนองต่อระดับสังกะสีในใบฝ่ายของการสังเคราะห์ด้วยแสง (แกนตั้งซ้าย) และความเข้มข้นของเอนไซม์คาร์บอนิกแอนไฮเดรสในใบ (แกนตั้งขวา) ทั้งสองอย่างจะถูกจำกัดที่สังกะสีต่ำ แต่เอนไซม์คาร์บอนิกแอนไฮเดรสในใบจะยังคงเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสีในใบ จนถึงเกือบ 50 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักใบสด แม้ในระดับสังกะสีที่ให้การสังเคราะห์ด้วยแสงในอัตราสูงสุดแล้วตั้งแต่เมื่อใบมีสังกะสีประมาณ 15 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักใบสด	173
ภาพที่ 6.31	การลดผลกระทบจากการขาดน้ำต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยโพแทสเซียม (จากความเข้มข้น 0.2 เป็น 2.0 และ 6.0 มิลลิโมลาร์)	175
ภาพที่ 6.32	ผลผลิตเมล็ดข้าวเปลือกที่สถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ ประเทศฟิลิปปินส์ แสดงความแตกต่างในการสนองต่อระดับปุ๋ยไนโตรเจน ระหว่างพันธุ์และฤดูปลูก (ก) ปลูกในฤดูแล้ง และ (ข) ฤดูฝน	176
ภาพที่ 6.33	เปรียบเทียบความเข้มแสงในแต่ละวันในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน (ก) ภายในประเทศฟิลิปปินส์ และ (ข) ระหว่างประเทศฟิลิปปินส์ ไทย และอินโดนีเซีย	177

สารบัญภาพ

ภาพที่ 6.34	การขาดโบรอนจำกัดการสร้างเมล็ด แต่ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งต้นและใบข้าวโพด	178
ภาพที่ 6.35	ราคาข้าวส่งออกวันที่ 9 มิ.ย. 2553 เมล็ดข้าวสารขนาดน้อยกว่า 3/4 ของความยาวเมล็ดปกตินับเป็นข้าวหัก ระหว่างข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ (ไม่มีเมล็ดหักเลย) กับข้าว 25 เปอร์เซ็นต์ (มีเมล็ดหัก 25 เปอร์เซ็นต์) ราคาลดลง 3 ดอลลาร์ต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดหักที่เพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์	181
ภาพที่ 6.36	ภาพแสดงเมล็ดข้าว (ก) ตัดตามขวาง (ข) ลูกศรชี้เมล็ดแบ่ง (สีขาว) และโปรตีน (สีดำด้วยการย้อมสี) (ค) การสะสมโปรตีนรอบผิวเมล็ดแสดงความแตกต่างระหว่างพันธุ์ (KDML105 และ CNT1) และระดับร้อยละความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ด	181
ภาพที่ 6.37	ความสัมพันธ์ที่แตกต่างระหว่างปริมาณโบรอนในใบข้าววัดที่เวลาต่างกัน (บนซ้าย 35 วัน ล่างซ้าย 42 วัน บนขวา 58 วัน ล่างขวา 70 วัน) กับผลผลิตเมล็ดเมื่อปลายฤดู	186
ภาพที่ 6.38	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นธาตุอาหารในใบหรือต้นพืช (ตัวอย่าง มิลลิกรัมของธาตุอาหาร/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) กับการเจริญเติบโต (เช่น น้ำหนักแห้ง) หรือผลผลิต ตารางข้างล่างแสดงตัวอย่างความเข้มข้นธาตุอาหาร ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมงกานีสในใบข้าวเหลืองในช่วงที่พืชมีธาตุอาหารพอเพียง (IV) ขาด (III) ขาดมาก (I, II) เริ่มสูงเกินพอ (V) และสูงจนเป็นพิษ (V)	193
ภาพที่ 6.39	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมงกานีสใบที่โตเต็มที่อายุน้อยที่สุด (YEB) และน้ำหนักแห้งของข้าวบาร์เลย์ (ก) ปลูกในตู้ควบคุม (growth chamber) และ (ข) ปลูกในแปลง	194
ภาพที่ 6.40	โบรอนในผนังเซลล์ของพืช 24 ชนิด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโบรอนในผนังเซลล์กับน้ำตาล 2-คีโต-3-ดีออกซี (2-keto-3-deoxy) ที่คาดว่าจะป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์พืช	198
ภาพที่ 6.41	การเกิดปฏิสัมพันธ์ร่วมในทางบวกในการทดลองไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	201
ภาพที่ 6.42	การไม่มีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่าง A and B	201

สารบัญภาพ

ภาพที่ 6.43	การมีปฏิสัมพันธ์ร่วมในทางลบ (ก) ไนโตรเจน x โมลิบดีนัม ในถั่วที่ตรึงไนโตรเจน (ข) ปูนขาว x ฟอสฟอรัส และ ความเป็นกรดต่าง x โมลิบดีนัม: ที่มาของก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งต่าง ๆ (กราฟวงกลมภาพบน) และที่มาของก๊าซเรือนกระจกตามชนิดของก๊าซ (กราฟวงกลมภาพล่าง)	202
ภาพที่ 7.1	(ก) ประวัติการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศโลกโดยการวัดจากบรรยากาศโดยตรงและการวัดคาร์บอนไดออกไซด์ในฟองอากาศที่ถูกกักเก็บไว้ในชั้นน้ำแข็งที่ทับถมกันมาย้อนไปได้ถึง 250 ปี (ค.ศ. 1750) และ (ข) การประเมินปริมาณของธาตุคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และมาสะสมอยู่ในบรรยากาศ	213
ภาพที่ 7.2	สถิติอุณหภูมิสูงสุด ($T_{\max}$) อุณหภูมิต่ำสุด ($T_{\min}$) และอุณหภูมิเฉลี่ย (T_{mean}) ของประเทศไทยตั้งแต่ พ.ศ. 2493-2543	215
ภาพที่ 7.3	การขยายตัวของพื้นที่โลกที่ประสบภาวะแล้ง (ก) เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่โลกที่มีปัญหาความแห้งแล้งใน 50 ปีที่ผ่านมา เส้นดำคือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง พื้นที่แรเงาคือการทำนายจากแบบจำลองภูมิอากาศ และ (ข) การขยายตัวของสภาวะแห้งแล้งต่อไปในศตวรรษที่ 21 จากการทำนายโดยแบบจำลอง	216
ภาพที่ 7.4	ความสูญเสีย (ล้านตัน มีหน่วยเป็นบวก) และการเพิ่มขึ้น (หน่วยเป็นลบ) ของผลผลิตข้าวสาลีในอินเดีย ด้วยผลกระทบจากการเพิ่มของอุณหภูมิและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (370 ppm คือความเข้มข้นปัจจุบัน) ประเมินด้วยแบบจำลองผลผลิตพืช (Crop Model) โดยไม่นับผลกระทบของโลกร้อนในทางอ้อม เช่น ปริมาณน้ำชลประทานหรือพื้นที่ปลูกที่อาจลดลง หรือความเสียหายจากโรคแมลงที่อาจเพิ่มความรุนแรงหรือเกิดขึ้นใหม่	217
ภาพที่ 7.5	ดัชนีเอ็นโซแสดงความรุนแรง ช่วงเวลา และความถี่ ของความแปรปรวนในภูมิอากาศ ดัชนีเอ็นโซเป็นบวกหมายถึงเอลนีโญ (El Niño) ดัชนีเอ็นโซเป็นลบหมายถึงเอนโซเย็น (La Niña)	218
ภาพที่ 7.6	ดัชนีลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (มรสุมเอเชียตะวันออก – East Asian Monsoon) ในช่วงระยะเวลา 150 ปี	219

สารบัญภาพ

ภาพที่ 7.8	ผลผลิตเฉลี่ยและอัตราการเจริญเติบโตของผลผลิตข้าวโลก (เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 53 กิโลกรัม/เฮกตาร์ หรือ 8.4 กิโลกรัม/ไร่/ปี) และอินเดีย (เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 42 กิโลกรัม/เฮกตาร์ หรือ 6.8 กิโลกรัม/ไร่/ปี)	221
ภาพที่ 7.9	การเปลี่ยนแปลง (ก) พื้นที่ปลูกข้าวโลก และ (ข) ผลผลิตโดยรวมที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอัตราเฉลี่ย 9.5 ล้านตัน/ปี	222
ภาพที่ 7.10	พื้นที่ปลูกข้าว (ก) และ พืชสำคัญ (ข) รายภาค เฉลี่ยรายปี (พ.ศ. 2558-2560)	230
ภาพที่ 7.11	การเปลี่ยนแปลงพื้นที่เพาะปลูกพืชในช่วงเวลา 20 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2528-2530 ถึง พ.ศ. 2548-2550	230
ภาพที่ 7.12	การเติบโตของการส่งออกและนำเข้าสินค้าเกษตรไทย (มูลค่าปรับตัวด้วยดัชนีผู้บริโภคแล้ว) ปี พ.ศ. 2520-2550	231
ภาพที่ 7.13	ผลผลิตพืชสำคัญของประเทศไทย (ก) ข้าว และ ข้าวโพด (ข) มันสำปะหลัง และอ้อย ระหว่าง พ.ศ. 2504 ถึง พ.ศ. 2550 พร้อมด้วยแนวโน้มการเจริญเติบโต ซึ่งแตกต่างกันในสองช่วง ในข้าวโพด (2504 - 2529; 2530 - 2550) และอ้อย (2504 - 2537; 2538 - 2550)	232
ภาพที่ 7.14	ความผิดพลาดจากแนวโน้มระยะยาว ของผลผลิตข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย ของประเทศไทย เปรียบเทียบกับช่วงเวลาของปรากฏการณ์เอนโซ	233

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	สาเหตุทางสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมทางกายภาพ เคมี และ ชีวภาพที่ทำให้พืชที่อยู่บริเวณนั้นอยู่ในสภาวะเครียด	4
ตารางที่ 2.1	การยับยั้งการยืดขยายใบพืชเนื่องจากการขาดไนโตรเจน	31
ตารางที่ 2.2	ผลกระทบจากสภาวะแล้งรุนแรงต่อผลผลิตเมล็ดข้าวโพด	36
ตารางที่ 2.3	ผลกระทบตอสภาวะแล้งในข้าว 6 พันธุ์	40
ตารางที่ 3.1	ผลกระทบต่อความเป็นกรดต่างในบริเวณรากและการเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสในบริเวณผิวรากตามอายุขัยของต้นผักกาดน้ำมัน (Rape) ปลูกในดินที่มีฟอสฟอรัสต่ำ	61
ตารางที่ 3.2	ระดับความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุดต่อพืชชนิดต่าง ๆ	64
ตารางที่ 3.3	ความทนทานต่อดินกรดของ <i>Rhizobium phaseoli</i> จำนวน 217 สายพันธุ์ และถั่ว <i>Phaseolus vulgaris</i> จำนวน 126 พันธุ์	68
ตารางที่ 3.4	ความต้องการโคบอลต์ในการสร้างปมถั่ว <i>Lupinus angustifolius</i>	69
ตารางที่ 4.1	ความแตกต่างในความอ่อนแอและทนทานต่อเกลือในพืชชนิดต่าง ๆ	84
ตารางที่ 4.2	เกลือชนิดต่าง ๆ ในดินเค็ม	88
ตารางที่ 4.3	การละลายน้ำของเกลือที่ 25 องศาเซลเซียส	89
ตารางที่ 4.4	ความแตกต่างระหว่างดินเค็มและดินโซดิก	89
ตารางที่ 4.5	ความแตกต่างในความอ่อนแอและทนทานต่อโบรอนเป็นพิษในพืช	90
ตารางที่ 4.6	ความทนทานต่อเกลือและต่อโบรอนเป็นพิษในพืชแต่ละชนิด	91
ตารางที่ 4.7	ตัวอย่างผลกระทบจากเกลือต่อการลำเลียงน้ำและธาตุอาหารในถั่วเหลือง	93
ตารางที่ 4.8	ผลกระทบของเกลือต่อปริมาณคลอโรฟิลล์และการสังเคราะห์ด้วยแสงใน <i>P. vulgaris</i>	95
ตารางที่ 4.9	ผลกระทบจากเกลือต่อพื้นที่ใบและสมดุลของคาร์บอนไดออกไซด์ในฝ้าย	97
ตารางที่ 5.1	อุณหภูมิวิกฤติในข้าวในระยะการเจริญเติบโตที่ต่างกัน	108
ตารางที่ 5.2	อุณหภูมิวิกฤติในพืชชนิดต่าง ๆ	111

สารบัญตาราง

ตารางที่ 5.3	อุณหภูมิตำวิฤติ (องศาเซลเซียส) และหน่วยความร้อนที่ต้องการเพื่อการงอก (องศา-วัน หรือ Degree-days) ในพืชเมืองร้อนและกึ่งร้อนชนิดต่าง ๆ เทียบกับข้าวและพืชเมืองหนาว	114
ตารางที่ 5.4	เปรียบเทียบอายุการเจริญเติบโตในถั่วเหลือง 4 พันธุ์ ที่ปลูกในเดือนกรกฎาคม (วันยาว/อุณหภูมิสูง) และเดือนมกราคม (วันสั้น/อุณหภูมิต่ำ)	118
ตารางที่ 5.5	อัตราการเจริญเติบโตในกล้าข้าว พันธุ์ IR8 ถึงอายุ 0-5 สัปดาห์	119
ตารางที่ 5.6	กรดไขมันจากเยื่อหุ้มไมโทคอนเดรียจากพืชทนความหนาวเย็นและไม่ทนหนาวเย็น	125
ตารางที่ 6.1	ความต้องการและการประเมินที่มาของธาตุอาหารในข้าวโพด	133
ตารางที่ 6.2	เปรียบเทียบความเข้มข้นของธาตุอาหาร 9 ชนิดในสารละลายดิน (Luvisol pH 7.7)	133
ตารางที่ 6.3	ค่าประเมินสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Diffusion Coefficients) ของธาตุอาหาร ในดิน D_e และในน้ำ D_1	135
ตารางที่ 6.4	ความสำคัญของขนรากต่อการดูดฟอสฟอรัสจากดิน จากความสัมพันธ์ระหว่าง SAH/SAC (surface area of root hairs ต่อหน่วย surface area of root cylinder) กับความต้องการฟอสฟอรัสในดินเพื่อให้ได้ร้อยละ 80 ของการเจริญเติบโตเต็มที่ในพืชแต่ละชนิด	137
ตารางที่ 6.5	ความแตกต่างลักษณะทางฟิสิกส์ของดิน ความยาวราก และการดูดไนโตรเจนและน้ำในข้าวโพด	142
ตารางที่ 6.6	ผลกระทบจากการเพิ่มฟอสฟอรัสในดินต่อการตอบสนองต่อไมคอร์ไรซา (NM = ไม่มีไมคอร์ไรซา; M = มีไมคอร์ไรซา) <i>Glomus fasciculatum</i> ในถั่วเหลือง	150
ตารางที่ 6.7	ความแตกต่างในผลของเชื้อราเอเอ็มต่างสปีชีส์ในจีนัส <i>Glomus</i> ต่อการติดเชื้อที่ราก น้ำหนักแห้ง และการสะสมธาตุฟอสฟอรัส ในข้าวฟ่าง อายุ 48 วัน	150
ตารางที่ 6.8	ผลกระทบจากสภาวะเครียดเนื่องจากอะลูมิเนียมต่อการสะสมธาตุอาหารไอออนบวก ใน Norway Spruce (<i>Picea abies</i>) อายุ 3 เดือน	155

สารบัญตาราง

ตารางที่ 6.9	ความต้องการธาตุอาหารในพืช	158
ตารางที่ 6.10	อิทธิพลไนโตรเจนต่อลักษณะของใบข้าว	160
ตารางที่ 6.11	ผลกระทบของการขาดฟอสฟอรัสและขาดแมกนีเซียมในถั่ว <i>Phaseolus vulgaris</i>	168
ตารางที่ 6.12	น้ำหนักแห้ง ต้น และองค์ประกอบ ของส่วนยอดของต้นถั่ว	174
ตารางที่ 6.13	เปรียบเทียบความเข้มข้นสังกะสีกับธาตุอาหารอื่น ในใบข้าวอ่อนกับใบโตเต็มที่	174
ตารางที่ 6.14	การเพิ่มการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยโพแทสเซียม	175
ตารางที่ 6.15	การมีไนโตรเจนมากเกินไปทำให้หัวมันฝรั่งชะงักการเจริญเติบโตและหัวไม่พัฒนา	180
ตารางที่ 6.16	บทบาทของโพแทสเซียมในการลำเลียงคาร์โบไฮเดรตในอ้อยโดยการติดตาม ^{14}C ที่ใส่ให้ใบในรูป $^{14}\text{CO}_2$	182
ตารางที่ 6.17	ผลกระทบของระดับไนโตรเจนต่อผลผลิตและคุณภาพหญ้าเลี้ยงสัตว์ (Ryegrass)	183
ตารางที่ 6.18	ความแตกต่างในปริมาณสังกะสีในเมล็ดข้าวเปลือก และข้าวกล้อง พันธุ์ชัยนาท 1 ปลุกที่ ตาคลี นครสวรรค์ และ มข. เชียงใหม่ โดยได้รับสังกะสีใน 3 กรรมวิธี	183
ตารางที่ 6.19	โพแทสเซียมในใบข้าวในระยะเริ่มสร้างรวง - การวินิจฉัยสถานภาพปัจจุบันของธาตุอาหารโพแทสเซียม	184
ตารางที่ 6.20	หลักการในการวินิจฉัยการขาดธาตุอาหารและการเป็นพิษจากธาตุ	188
ตารางที่ 6.21	เปรียบเทียบความเข้มข้นธาตุอาหารในต้นข้าวที่มีธาตุอาหารพอเพียง ที่อายุ 3 สัปดาห์ กับ 11 สัปดาห์หลังปักดำ (ออกรวง)	192
ตารางที่ 6.22	ค่าอ้างอิงแตกต่างกัน ที่อายุพืชต่างกัน ในแง่การทำนาย	195
ตารางที่ 6.23	ความเข้มข้นธาตุอาหารในใบ Norway spruce (<i>Picea abies</i> Karst)	196
ตารางที่ 6.24	ความแตกต่างในระดับธาตุอาหารที่พอเพียง (ในแง่ วินิจฉัย) ในพืชต่างชนิด	197

สารบัญตาราง

ตารางที่ 7.1	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของผลผลิตพืชสำคัญของโลกและค่าเบี่ยงเบนจากแนวโน้มการเติบโตของผลผลิต (yield anomaly) ในระหว่าง พ.ศ. 2504 ถึง พ.ศ. 2549	221
ตารางที่ 7.2	ความแปรปรวนของผลผลิตข้าวและข้าวโพดในพื้นที่ต่าง ๆ ของโลก พ.ศ. 2504 - 2549	222
ตารางที่ 7.3	การระบาดใหญ่ของโรคและแมลงศัตรูที่ทำความเสียหายต่อผลิตผลทางเกษตรในคริสต์ศตวรรษที่ 20	227
ตารางที่ 7.4	พื้นที่เพาะปลูกพืชหลักของประเทศไทย ข้อมูลเฉลี่ย พ.ศ. 2548 - 2550	228
ตารางที่ 7.5	ความแปรปรวนของผลผลิตพืชสำคัญของประเทศไทยเปรียบเทียบกับผลผลิตโลก	232