

การจำลองผลกระทบของสภาพบรรยากาศในอนาคตต่อการผลิตข้าว ^{1/}

Simulating the Impact of Future Changes of Climate on Rice Production Systems

อรรถชัย จินตะเวช ^{2/} คิม ซี เห่งยีน ^{3/}

บทคัดย่อ

ระบบเกษตรเป็นระบบหนึ่งที่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศ ถึงแม้ว่าแบบจำลองที่ใช้ในการคาดการณ์ขนาดของการเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศ ยังต้องได้รับการปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น แต่ด้วยความจำเป็นต่อการสร้างกลยุทธ์เพื่อการปรับปรุงและการปรับตัวให้เข้ากับสภาพการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้น การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการในพื้นที่จังหวัดขอนแก่นและจังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้แบบจำลองข้าว CERES-rice ซึ่งได้มีการทดสอบอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ และแบบจำลองภูมิอากาศ MK3 ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำฝนจากแบบจำลอง MK3 ในระหว่างปี 2549-68 ของจังหวัดขอนแก่นและจังหวัดเชียงใหม่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 และ 50 ตามลำดับ หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการจัดการใช้ที่ดิน แบบจำลองข้าว CERES-rice ประมาณการผลผลิตข้าวได้ในระดับใกล้เคียงกับผลผลิตข้าวที่ผ่านมา ที่จังหวัดขอนแก่นข้าวเหนียวสันป่าตองและ กข 7 ได้ผลผลิตอยู่ในช่วง 116-486 และ 135-642 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ จังหวัดเชียงใหม่ข้าวเหนียวสันป่าตองและ กข 7 ได้ผลผลิตอยู่ในช่วง 432-1287 และ 512-1634 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นอาจจะมีผลต่อสภาพน้ำท่วมขังและการระบาดของโรคและแมลงเพิ่มขึ้น

Abstract

Agricultural systems is one of the sensitive areas which would be influenced by the projected global warming and associated climate change. Despite uncertainties about the precise magnitude of climate change on regional scales, and assessment of the possible impacts of changes in key climatic elements on our agricultural resources is important for formulating response strategies. In this study, rice crop yields in North and Northeast Thailand under future climate scenarios from the MK3 model are examined. The MK3 model predicted that during 2006-2024 the annual rainfall amount of Khon Kaen and Chiang Mai should be increased around 20 and 50% as compare to the annual rainfall during 1975-2000. The CERES-Rice model predicted similar ranges of yield for both locations. In Khon Kaen, NSPT and RD7 rice varieties gave a yield range of 116-486 and 135-642 kg ha⁻¹, whereas Chiang Mai area yield a higher yield range, i.e., 432-1287 and 512-1634 kg ha⁻¹, respectively. However, one should bare in mind the predicted amount of rainfall and the relationship of more incidents of insect pests.

^{1/} เอกสารเสนอในการสัมมนาวิชาการระบบเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 2 เรื่อง “ระบบเกษตรเพื่อการจัดการทรัพยากรและพัฒนาชนบทเชิงบูรณาการ” ระหว่างวันที่ 26-27 สิงหาคม 2545 ณ โรงแรมโสมพะมิตร อ.เมือง จ.ขอนแก่น

^{2/} ภาควิชาปฐพีวิทยาและอนุรักษ์ศาสตร์ และศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

^{3/} CSIRO Atmospheric Research, PB1 Aspendale, Victoria 3195, Australia

คำนำ

สภาวะอากาศโลกมีการเปลี่ยนแปลงทั้งในระยะสั้นและยาว นักวิทยาศาสตร์มีความเห็นร่วมกันว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกหลักๆ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (NO₂) และก๊าซคลอโรฟลูโอโรคาร์บอน (CFCs) ซึ่งเป็นการกระทำของมนุษย์ (Houghton and Yihui, 2001) โดยเฉพาะหลังการเจริญเติบโตด้านอุตสาหกรรม มีการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงในด้านต่างๆ (Watson et al., 2001) และการลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต (Metz et al., 2001)

มีการศึกษาผลกระทบของสภาวะโลกร้อนที่มีต่อการผลิตข้าวอย่างกว้างขวางทั้งในระดับนานาชาติ (Olszyk et al, 1999) และระดับชาติ (Lal et al., 1998) การศึกษาของ Matthews et al (1995) ในภาคพื้นเอเชียโดยใช้แบบจำลองสองแบบจำลองสรุปว่าผลผลิตข้าวของประเทศไทยมีแนวโน้มลดลง รวมทั้งประเทศบังคลาเทศและประเทศอินเดียทางตะวันตก ภาพรวมผลการศึกษาพบว่าผลผลิตข้าวมีแนวโน้มลดลงจากระดับปัจจุบันร้อยละ 4 ในขณะที่ประชากรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตรา 1.5

การศึกษผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกที่มีต่อระบบเกษตรมีผู้เสนอแนะไว้อย่างน้อย 3 แนวทาง ได้แก่

แนวทางที่หนึ่ง เป็นการสมมุติสถานการณ์โดยการกำหนดให้อุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นจากระดับปัจจุบันเป็น +1°C หรือ +2°C หรือ +4°C พร้อมกับและเพิ่มขึ้น/ลดลงของปริมาณน้ำฝนร้อยละ 10 โดยการใช้แบบจำลองระบบการผลิตพืชแต่ละชนิดตามที่นักวิจัยต้องการศึกษา ซึ่งเป็นขั้นตอนพื้นฐาน แต่มีข้อจำกัดว่าอาจจะไม่ได้ประเมินประสิทธิภาพของ Radiative forcing และการเปลี่ยนแปลงกายภาพของบรรยากาศ เช่น การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

แนวทางที่สอง ใช้แบบจำลองสมุทรรดิน-บรรยากาศในการจำลองสภาพอากาศในอนาคต ซึ่งได้มีการพัฒนาหลายแบบจำลอง (ตารางที่ 1) รวมเรียกว่า General Circulation Models (GCMs) ซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาให้คำนวณการไหลเวียนของลมในระดับต่างๆ ของชั้นบรรยากาศโลก การคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพของบรรยากาศ และคำนวณปริมาณน้ำฝน รังสีดวงอาทิตย์ และปริมาณน้ำฝนเป็นตาราง (grid-based) แบบจำลองเหล่านี้มีพื้นฐานจากหลักวิทยาศาสตร์และกฎทางกายภาพบรรยากาศโลก

แนวทางที่สาม ใช้ข้อมูลอากาศสภาพอากาศในอดีตที่มีการเก็บไว้แล้ว และมีสภาพคล้ายคลึงกับสภาวะที่น่าจะเป็นในอนาคตใช้ประกอบการคำนวณของแบบจำลอง วิธีการนี้มีข้อจำกัดที่ว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในอนาคตเกิดขึ้นในอัตราที่สูงมากกว่าเดิม และอาจจะเกิดเป็นระยะเวลายาวนานหลายเดือนและอาจจะเป็นไปได้ นอกจากนี้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง โดยการเพิ่มขึ้นของเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่เกิดจากการรับรังสีดวงอาทิตย์ (solar insolation)

จุดประสงค์ของเอกสารนี้ เพื่อแสดงผลการศึกษา โดยใช้วิธีการที่หนึ่งและสอง ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่มีต่อระบบการผลิตข้าวของสองระบบนิเวศหลักของประเทศไทย ที่จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดเชียงใหม่ ในช่วง 20 ปีข้างหน้า ระหว่าง (พ.ศ. 2547-2568) ค.ศ. 2006-2025 และเสนอแนวคิดในการดำเนินการเพื่อการปรับตัวให้เข้ากับสภาพอากาศดังกล่าว

ตารางที่ 1 ลักษณะของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Models: GCMs)

ข้อเปรียบเทียบ	แบบจำลองการไหลเวียนอากาศโลก		
	GFDL	GISS	UKMO
แหล่งวิจัย	Geographical Fluid Dynamics Laboratory	Goddard Institute for Space Studies	United Kingdom Meteorological Office
อ้างอิง	Wetherald & Manabe (1988)	Hansen et al. (1988)	Wilson & Mitchell (1987)
ความละเอียดแนวนอน	4.44° x 7.5°	7.83° x 10.0°	5.00° x 7.5°
ความละเอียดแนวตั้ง	9	9	11
ความเข้มข้น CO ₂ มาตรฐาน	300	300	323
อุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น (°C)	+4.0	+4.2	+5.2
ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้น (%)	8	11	15

ที่มา : (Bachelet et al., 1995)

เครื่องมือศึกษา

ระบบการผลิตข้าวนาปี

ข้อมูลการผลิตข้าวและข้อมูลประชากรของทั้งประเทศของจังหวัดขอนแก่น (ตัวแทนบ้านหินลาด ต.บ้านค้อ อ.เมือง จ.ขอนแก่น) และจังหวัดเชียงใหม่ (ตัวแทน บ้านห้วยแก้ว ต.แม่แฝก อ.สันทราย จ.เชียงใหม่) ระหว่างปี 2517-2543 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2518-44; URL1) ข้อมูลการผลิตข้าวประกอบด้วยพื้นที่ปลูก พื้นที่เก็บเกี่ยว ผลผลิตข้าวรวม และผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่

ข้อมูลภูมิอากาศเกษตร WTH

ใช้ข้อมูลภูมิอากาศเกษตรรายวันระหว่างปี 2528-2542 ที่มีการเก็บในแปลงทดลองหมวดพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสถานีวิจัยเกษตรชลประทาน ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วยรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด และปริมาณน้ำฝน เพื่อประกอบการคำนวณของแบบจำลองระบบการผลิตข้าว ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลภูมิอากาศรายวันจัดเก็บในรูปแบบของ DSSAT3.5 (Tsuji et al., 1994)

แบบจำลองข้าว

แบบจำลองข้าว CERES-Rice ได้รับการพัฒนา โดยนักวิจัยในเครือข่าย IBSNAT (Alocilja and Ritchie, 1988; Jintrawet, 1995; Tsuji et al., 1994) สามารถจำลองพัฒนาการ (ตารางที่ 2) และการเจริญเติบโตของข้าวตามกระบวนการทางด้านสรีระของข้าว โดยแบ่งออกเป็นส่วนของราก ลำต้น ใบ เมล็ดข้าวและไนโตรเจนในเมล็ดข้าว รวมทั้งพลวัตของน้ำในพืชและในดิน (Ritchie, 1998) และพลวัตของไนโตรเจนในพืชและในดิน (Godwin and Singh, 1998) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการทดลองอย่างกว้างขวางทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย (Jintrawet, 1995; อรรถชัย และ คณะ, 2544)

ตารางที่ 2 พัฒนาการและการคำนวณส่วนต่างๆ ของข้าวตามแบบจำลองข้าว CERES-Rice

รหัส พัฒนาการ	ความหมาย	ส่วนของพืชที่แบบ จำลองคำนวณ
7	เมล็ดลงในดิน Sowing	
8	50% ของต้นมีรากงอก Germinate	
9	50% ของต้นมียอดโผล่พ้นผิวดิน Emergence	ราก
1	50% ของต้นสิ้นสุดระยะการเจริญทางต้น End Juvenile	ราก, ใบ
2	50% ของต้นระยะแทงช่อดอก Panicle Initiation	ราก, ใบ, ต้น
3	50% ของต้นถึงระยะสิ้นสุดการสร้างใบ End leaf growth	ราก, ใบ, ต้น
4	50% ของต้นระยะเริ่มต้นการสะสมน้ำหนักเมล็ด Begin Grain Filling	ราก, ใบ, ต้น, รวง
5	50% ของต้นระยะสุกแก่ทางสรีระ Maturity	ราก, ใบ, ต้น, รวง เมล็ด
6	50% ของต้นเก็บเกี่ยว Harvest	

ที่มา : Ritchie et al., 1998.

แบบจำลองภูมิอากาศ MK3

แบบจำลองสภาวะอากาศ MK3 (Gordon and O'Farrell, 1997) เป็นแบบจำลองกายภาพของบรรยากาศโลก มีความละเอียดของพื้นที่เล็กที่สุดขนาด 200 กิโลเมตร เป็นแบบจำลองสภาวะอากาศชนิด spectral atmospheric GCM และเชื่อมโยงกับแบบจำลองสมุทรศาสตร์ GFDL (Watherald and Manabe, 1988; และ URL2) แบบจำลอง MK3 ใช้หลักการของการเคลื่อนที่ของเมฆฝนแบบ cumulus แบบมวลเคลื่อนที่ที่พลวัตสูง ตามหลักการ convection และจำลองการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิดินและความชื้นโดยแบ่งดินออกเป็น 6 ชั้น

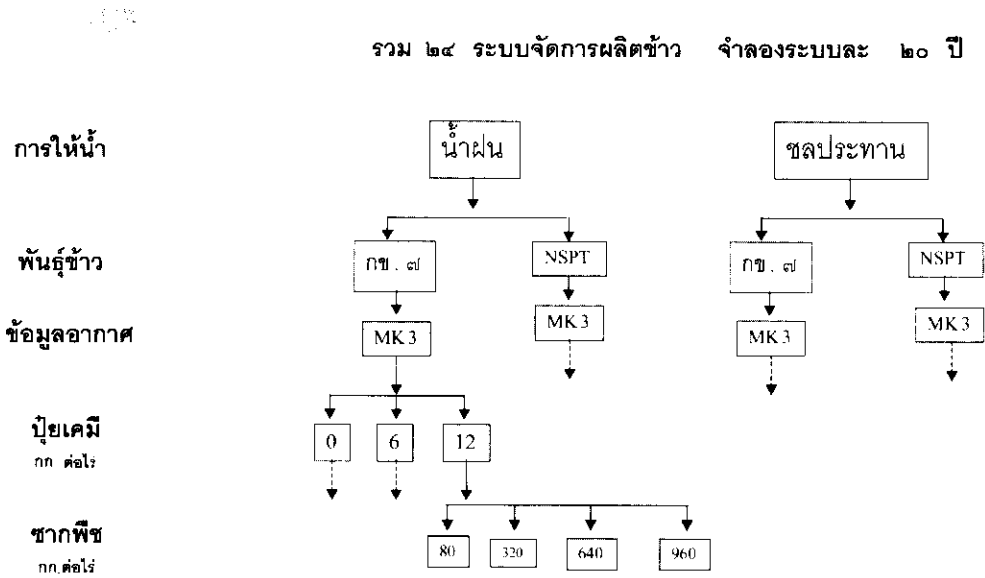
ใช้แบบจำลอง MK3 คำนวณ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด และปริมาณน้ำฝน ของจังหวัดขอนแก่นและจังหวัดเชียงใหม่ 2 ระยะ ระยะแรกระหว่างปี 2528-2543 เป็นการจำลองสภาพอากาศ (climate scenarios) โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ เรียกว่า 1xCO₂ scenario) เป็น 330 ppm ระยะที่สองระหว่างปี 2549-2589 (2006-2064) เป็นการจำลองสภาพอากาศโดยเพิ่มความเข้มข้นของ CO₂ เป็น 660 ppm (เรียกว่า 2xCO₂ scenario) และทำการปรับรูปแบบข้อมูลเพื่อแบบจำลองข้าวสามารถนำไปใช้ได้โดยโปรแกรม WeaData (ปราการและ อรรถชัย, 2545)

การจำลองระบบการผลิตข้าว (Rice simulation experimental design)

มีการจำลองสองแบบ (Scenario) ได้แก่ 1xCO₂ และ 2xCO₂ (รูปที่ 1)

Scenario 1xCO₂ ใช้ข้อมูลอากาศที่มีการวัดจริง (WTH) และข้อมูลอากาศจากแบบจำลองอากาศ MK3 ของขอนแก่น (KK) และเชียงใหม่ (CM) จำลองระบบการผลิตข้าวเหนียวสันป่าตอง และข้าว กข. 7 ในระหว่างปี พ.ศ. 2528-2542 ทั้งแบบใช้น้ำฝนอย่างเดียวและใช้น้ำชลประทานอย่างเต็มที่

Scenario 2xCO2 ใช้ข้อมูลอากาศจากแบบจำลองภูมิอากาศ MK3 ระหว่างปีพ.ศ. 2549-2569 ของจังหวัดขอนแก่น (KK) และจังหวัดเชียงใหม่ (CM) จำลองระบบการผลิตข้าวเหนียวสันป่าตอง และข้าวเจ้า กข. 7 แบบใช้น้ำฝนอย่างเดียวและใช้น้ำชลประทานอย่างเต็มที่ พร้อมทั้งการจัดการปุ๋ยไนโตรเจน



รูปที่ 1 ผังการจำลองการผลิตข้าวของจังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดขอนแก่นและทั้งประเทศ ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2568

การวิเคราะห์ความแตกต่าง

เพื่อประเมินความแตกต่างของผลผลิตที่ได้จากการจำลองของแบบจำลองข้าว CERES-Rice โดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศจากการวัดจริง (WTH) และ จากแบบจำลองอากาศ (MK3) จึงใช้ค่า RMSE (Root Mean Square Error = $[(\text{Simulated}-\text{Observed})^2/N]^{1/2}$ และค่า MD (Mean Deviation = $[(\text{Simulated}-\text{Observed})/N]$) ค่า RMSE แสดงถึงการเกาะตัวหรือการกระจายตัวของค่าที่ได้จากแบบจำลอง (Simulated) และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงของระบบการผลิต (Observed) ค่า RMSE แสดงการกระจายตัวของผลผลิตข้าวที่ได้จากชุดข้อมูลอากาศที่มีการวัดจริง (WTH) และชุดข้อมูลอากาศที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศ MK3 เมื่อเทียบกับข้อมูลผลผลิตข้าวที่มีการสำรวจและรายงานโดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรของ 2 จังหวัดในระหว่างปี 2528-2542 (OAE) ส่วนค่า MD แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองว่าค่าคาดการณ์เกินความจริง (Overestimate) หรือ น้อยกว่าความจริง (Underestimate) เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงของระบบการผลิต (Observed) กล่าวคือหากได้ค่า MD เป็นลบหมายถึงแบบจำลองข้าวที่ใช้ข้อมูลอากาศชุดนั้นๆ คำนวณผลผลิตข้าวได้น้อยกว่าผลผลิตข้าว OAE

ผลการศึกษา

การผลิตข้าวปี 2517-2545

ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2517 พื้นที่การปลูกข้าวของทั้งประเทศเพิ่มขึ้นปีละ 141,000 ไร่ ในปีพ.ศ. 2544 มีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 56.9 ล้านไร่ พื้นที่ปลูกข้าวของจังหวัดขอนแก่นเพิ่มขึ้นปีละ 12,000 ไร่ ในปีพ.ศ. 2544 มีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 2.0 ล้านไร่ แต่จังหวัดเชียงใหม่มีพื้นที่ปลูกข้าวลดลงปีละ 9,400 ไร่ ในปี 2544 มีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 0.46 ล้านไร่

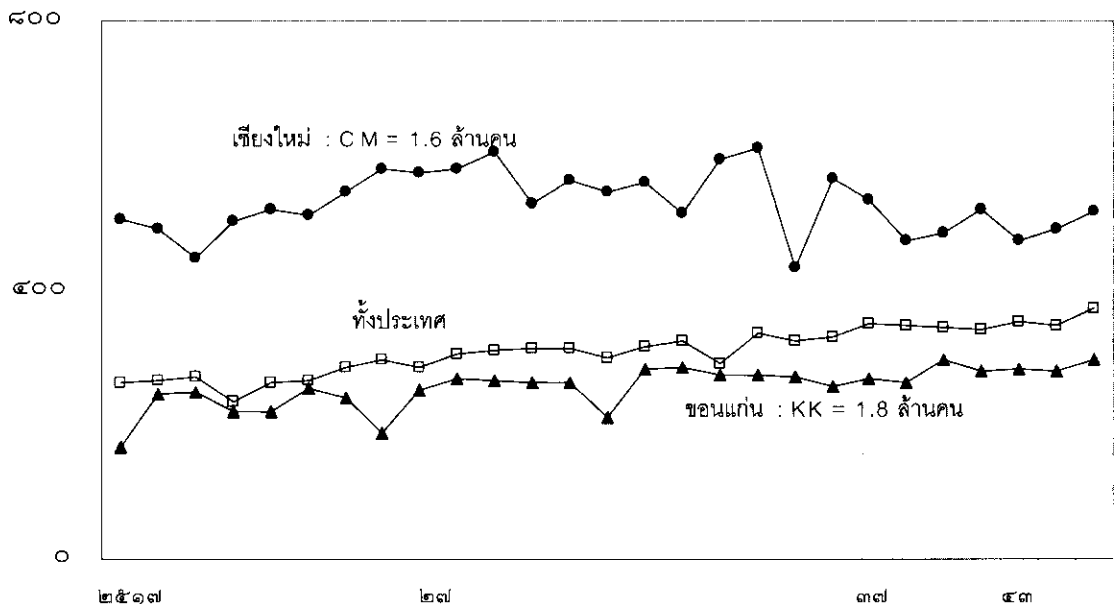
ผลผลิตข้าวต่อไร่ของทั้งประเทศ จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดเชียงใหม่ แสดงในรูป 2 ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2517 ผลผลิตข้าวของทั้งประเทศเพิ่มขึ้นปีละ 4.2 กก/ไร่/ปี ในปีพ.ศ. 2544 มีผลผลิตเฉลี่ย 374 กก/ไร่ ผลผลิตข้าวของจังหวัดขอนแก่นลดลงปีละ 0.5 กก/ไร่/ปี และในปีพ.ศ. 2544 มีผลผลิตเฉลี่ย 295 กก/ไร่ จังหวัดเชียงใหม่มีผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นปีละ 2.8 กก/ไร่ และในปีพ.ศ. 2544 มีผลผลิตเฉลี่ย 517 กก/ไร่

การผลิตข้าวในจังหวัดขอนแก่นพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นการผลิตข้าวแบบอาศัยน้ำฝน ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ ส่วนการผลิตในจังหวัดเชียงใหม่เป็นการผลิตข้าวที่มีน้ำชลประทานเสริมตั้งแต่ต้นฤดูปลูก และมีการใช้ปุ๋ยเคมีเสริมการผลิตในอัตราสูงกว่าจังหวัดขอนแก่น

ปริมาณฝนระหว่างปีพ.ศ. 2549-2568

แบบจำลองภูมิอากาศ MK3 คาดการณ์ปริมาณฝนระหว่างปีพ.ศ. 2549-2568 (scenario 2) ของจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดขอนแก่นได้สูงกว่าปริมาณน้ำฝนที่ได้รับในช่วง 2528-2542 (scenario 1) ร้อยละ 55 และ 19 คือจาก 1,761 มม. เป็น 1,132 มม. และ 1,314 มม. เป็น 1,105 มม. ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าการผลิตข้าวของทั้งสองพื้นที่อาจประสบปัญหาการมีน้ำมากเกินไปสำหรับพื้นที่ราบลุ่ม ถึงระดับที่ไม่อาจทำการผลิตข้าวได้หากมีระยะเวลาการท่วมขังเป็นระยะยาว อาจจะต้องทำการเปลี่ยนพันธุ์ข้าวจากพันธุ์ปัจจุบัน เป็นข้าวที่สามารถทนได้กับภาวะดังกล่าว

ผลผลิตข้าว (กิโลกรัมต่อไร่)



ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร <http://www.oae.go.th>

รูปที่ 2 ผลผลิตภาพของข้าวในจังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดขอนแก่นและทั้งประเทศระหว่างปี พ.ศ. 2517-2543

เปรียบเทียบผลผลิตข้าว พ.ศ. 2528-2542 (Scenario 1: 1xCO2)

แบบจำลองข้าวคำนวณผลผลิตข้าวที่ความชื้นร้อยละ 14 ของทั้งสองจังหวัดโดยใช้ข้อมูลอากาศแบบ WTH MK3 มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ทุกแบบการผลิตข้าว (ตารางที่ 3) คือให้สูงกว่าผลผลิต OAE ทั้งสองจังหวัด ยกเว้น การปลูกข้าวแบบอาศัยน้ำฝนและใช้ข้อมูลอากาศชุด MK3 ซึ่งให้ผลผลิตข้าวน้อยกว่าผลผลิต OAE พบว่าใช้ข้อมูลอากาศจากแบบจำลองภูมิอากาศ MK3 ทำให้ข้าวมีการขาดน้ำในขณะที่ข้าวอยู่ในระยะสิ้นสุดการสร้างใบ ถึงระยะเริ่มต้นการสร้างรวงและพบว่าชุดดินทั้งสองของสองจังหวัดมีปริมาณการระบายน้ำสูงมากคือมีอัตราการระบายน้ำเป็น 46 และ 307 มม. ที่ขอนแก่น และ 103 และ 418 มม. ที่จังหวัดเชียงใหม่ ตามลำดับ

การเปรียบเทียบผลผลิตข้าวที่ได้จากแบบจำลองข้าวเมื่อใช้ข้อมูลภูมิอากาศทั้งสองชุดโดยใช้ค่า RMSE และ ค่า MD (ตาราง ๔) พบว่าค่าการกระจายตัวของผลผลิต (RMSE) มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันและใกล้เคียงกัน ยกเว้น กรณีการผลิตโดยใช้น้ำฝนและใช้ข้อมูลภูมิอากาศชุด MK3 เนื่องจากสาเหตุที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว

การเปรียบเทียบแสดงว่าสามารถใช้แบบจำลองข้าว ในการจำลองผลกระทบที่อาจจะมีการผลิตข้าวทั้งสองพันธุ์ได้ในช่วง Scenario 2-2xCO2 เนื่องจากความเสถียรภาพของแบบจำลองข้าว และข้อมูลภูมิอากาศที่ได้จาก MK3

ตารางที่ 3 ผลผลิตข้าวเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อไร่) ที่ได้จากแบบจำลองข้าวในสองจังหวัดเมื่อใช้ข้อมูลอากาศจากการตรวจวัด (WTH) แบบจำลองภูมิอากาศ (MK3) และข้อมูลผลผลิตข้าวจากการรายงานสถิติ (OAE)

จังหวัด	การให้น้ำ	พันธุ์ข้าว	WTH	MK3	OAE
ขอนแก่น	น้ำฝน	เหนียวสันป่าตอง (NSPT)	352	142	267
		กข. 7	420	160	267
	ชลประทาน	NSPT	413	397	267
		กข. 7	493	521	267
เชียงใหม่	น้ำฝน	เหนียวสันป่าตอง (NSPT)	566	422	533
		กข. 7	672	477	533
	ชลประทาน	NSPT	645	637	533
		กข. 7	763	826	533

ตารางที่ 4 ค่า RMSE และ MD (กิโลกรัมต่อไร่) ของผลผลิตข้าวที่ได้จากแบบจำลองข้าวจากชุดข้อมูลอากาศ ๒ ชุด

จังหวัด	การให้น้ำ	พันธุ์ข้าว	RMSE		MD	
			WTH	MK3	WTH	MK3
ขอนแก่น	น้ำฝน	เหนียวสันป่าตอง (NSPT)	21.7	32.6	5.6	-8.4
		กข. 7	39.1	28.1	6.0	-7.2
	ชลประทาน	NSPT	37.3	33.3	6.9	7.5
		กข. 7	58.0	65.2	7.1	7.8
เชียงใหม่	น้ำฝน	เหนียวสันป่าตอง (NSPT)	12.8	30.9	8.1	-6.9
		กข. 7	37.8	32.3	8.3	-3.3
	ชลประทาน	NSPT	30.9	29.9	9.2	9.8
		กข. 7	61.3	77.6	9.5	10.1

เปรียบเทียบผลผลิตข้าว พ.ศ. 2549-2568 (Scenario 2: 2xCO2)

แบบจำลองข้าว CERES-Rice คำนวณผลผลิตข้าวที่ความชื้นร้อยละ 14 ของทั้งสองจังหวัดมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทุกแบบการผลิตข้าว (ตารางที่ 5) โดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศจากแบบจำลอง MK3

ที่จังหวัดขอนแก่น การผลิตข้าวแบบอาศัยน้ำฝนและใช้ปุ๋ยยูเรียให้ผลผลิตข้าวทั้งสองพันธุ์สูงขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่เพิ่ม แต่ในข้าวพันธุ์ กข. 7 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลผลิตข้าวในอัตราที่สูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของผลผลิตข้าวเหนียวสันป่าตอง คือมีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลผลิตข้าวอยู่ในช่วงระหว่าง 113-117 และ 97-99 กิโลกรัมข้าวต่อกิโลกรัมของปุ๋ยยูเรียที่ใช้ สำหรับการผลิตข้าวทั้งสองพันธุ์แบบใช้น้ำชลประทานทำให้ผลผลิตข้าวทั้งสองพันธุ์เพิ่มขึ้น 139-144 และ 105-109 กิโลกรัมข้าวต่อกิโลกรัมของปุ๋ยยูเรีย ตามลำดับ เมื่อมีการใช้ปุ๋ยพืชสดอย่างเดียวในการผลิตข้าวแบบอาศัยน้ำฝนพบว่าผลผลิตของข้าว กข. 7 และข้าวเหนียวสันป่าตองมีอัตราการเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 6.8 และ 7.1 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยพืชสดในอัตราต่ำที่สุด และเมื่อใช้มีการนำชลประทานเสริมพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นผลผลิตข้าวเป็นเพียงร้อยละ 16.0 และ 17.4 ตามลำดับ

ที่จังหวัดเชียงใหม่ในการผลิตข้าวแบบอาศัยน้ำฝนและใช้ปุ๋ยยูเรียให้ผลผลิตข้าวสูงขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่เพิ่มในข้าวทั้งสองพันธุ์ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของผลผลิตข้าว กข. 7 เพิ่มในอัตราที่สูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของผลผลิตข้าวเหนียวสันป่าตองโดยเฉพาะในระบบการผลิตข้าวที่ใช้ปุ๋ยพืชสดในอัตราต่ำ (80 กิโลกรัมแห้งของปุ๋ยพืชสดต่อไร่) กล่าวคือระบบการผลิตที่อาศัยน้ำฝนอย่างเดียวการใช้ปุ๋ยพืชสดอัตราต่ำทำให้ข้าวมีผลผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 109 กิโลกรัมข้าวต่อกิโลกรัมของปุ๋ยยูเรียเทียบกับเพียง 27.6 กิโลกรัมข้าวต่อกิโลกรัมของปุ๋ยยูเรียเมื่อใช้ปุ๋ยพืชสดในอัตรา 960 กิโลกรัมปุ๋ยพืชสดต่อไร่

เมื่อมีการใช้ปุ๋ยพืชสดอย่างเดียวในผลิตข้าวแบบอาศัยน้ำฝนพบว่าผลผลิตของข้าวเหนียวสันป่าตองและข้าว กข. 7 มีอัตราการเพิ่มขึ้นร้อยละ 107.3 และ 104.9 เมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยพืชสดในอัตราต่ำที่สุด และเมื่อใช้มีการนำชลประทานเสริมพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นผลผลิตข้าวเป็นร้อยละ 102.3 และ 104.0 ตามลำดับ อัตราการเพิ่มขึ้นนี้สูงกว่าอัตราที่เพิ่มขึ้นในจังหวัดขอนแก่นเป็นอย่างมาก

การผลิตแบบใช้น้ำชลประทานเสริมในช่วงที่ข้าวขาดน้ำร่วมกับการใช้ปุ๋ยยูเรียและการใส่ปุ๋ยพืชสดอัตรา 960 กิโลกรัมต่อไร่ทำให้ข้าวเหนียวสันป่าตองมีผลผลิตเพิ่มขึ้น 24.8 กิโลกรัมข้าวต่อกิโลกรัมของปุ๋ยยูเรีย และทำให้ข้าว กข 7 มีผลผลิตเพิ่มขึ้น 27.5 กิโลกรัมข้าวต่อกิโลกรัมของปุ๋ยยูเรีย ในทางตรงกันข้ามการใช้ปุ๋ยยูเรียและการใส่ปุ๋ยพืชสดอัตรา 80 กิโลกรัมต่อไร่ทำให้ข้าวเหนียวสันป่าตองมีผลผลิตเพิ่มขึ้น 83.7 กิโลกรัมข้าวต่อกิโลกรัมของปุ๋ยยูเรีย และทำให้ข้าว กข 7 มีผลผลิตเพิ่มขึ้น 126.6 กิโลกรัมข้าวต่อกิโลกรัมของปุ๋ยยูเรีย

การศึกษาครั้งนี้ได้ผลที่แตกต่างจากผลการศึกษาลักษณะเดียวกันของหลายสถาบัน (Matthews et al., 1997) ซึ่งส่วนใหญ่จะคาดการณ์ว่าผลผลิตข้าวของประเทศไทยมีแนวโน้มลดลง เมื่อถึงช่วงที่สภาพบรรยากาศเปลี่ยนแปลงอย่างแท้จริง เพราะการศึกษาในอดีตกำหนดให้อิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิอากาศต่อผลผลิตข้าวเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งอาจจะไม่ได้สะท้อนการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอย่างที่แบบจำลองภูมิอากาศ MK3 คาดการณ์

การจำลองระบบการผลิตข้าว โดยใช้วิธีการนี้ขึ้นในสภาวะการณ์ที่ภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงการรักษาและการเพิ่มผลผลิตข้าวในทั้งสองระบบนิเวศควรใช้ทั้งสองแนวทางในการใช้ปุ๋ยพืชแบบบูรณาการ (Integrated Nutrients Management System: INMS) กล่าวคือ ควรใช้ทั้งปุ๋ยพืชสดร่วมกับปุ๋ยเคมีในอัตราที่เกษตรกรสามารถปฏิบัติได้ และเหมาะสมต่อความต้องการและสภาพแวดล้อมที่ต้องการด้วย ในกรณีที่เกษตรกรสามารถผลิตปุ๋ยพืชสดได้เองจะทำให้การพึ่งพาปุ๋ยเคมีลดลงด้วย

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิอากาศทำให้การระบาดของโรค แมลงศัตรูข้าวเพิ่มขึ้น และอาจมีความรุนแรงมากขึ้น แต่แบบจำลองข้าว CERES-Rice รุ่นปัจจุบันยังไม่ได้นำเอาปัจจัยดังกล่าวเข้ามาประกอบการคำนวณผลผลิตข้าว ซึ่งต้องมีการพัฒนาต่อไป

ตารางที่ 5 ผลผลิตข้าวเฉลี่ย ๒๐ ปี (๒๕๔๙-๒๕๖๘) ที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองข้าวที่จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดเชียงใหม่โดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศจากแบบจำลอง MK3

	ระบบการผลิตข้าว						
	อัตราปุ๋ยพืชสด (กิโลกรัมต่อไร่)	โดยอาศัยน้ำฝน			โดยใช้น้ำชลประทาน		
		อัตราปุ๋ยยูเรีย (กิโลกรัมต่อไร่)	อัตราปุ๋ยยูเรีย (กิโลกรัมต่อไร่)	อัตราปุ๋ยยูเรีย (กิโลกรัมต่อไร่)	อัตราปุ๋ยยูเรีย (กิโลกรัมต่อไร่)	อัตราปุ๋ยยูเรีย (กิโลกรัมต่อไร่)	อัตราปุ๋ยยูเรีย (กิโลกรัมต่อไร่)
ขอนแก่น		0	6	12	0	6	12
เหนียวสันป่าตอง	960	124	240	318	274	430	486
	640	122±	236	315	246	404	463
	320	119±	238	317	261	417	474
	80	116±	236	315	246	404	463
	0	116±8.3	234	314	233	394	452
กข. 7	960	144	282	376	363	573	642
	640	142	280	375	351	561	631
	320	139	278	373	332	547	617
	80	135	276	372	313	530	602
เชียงใหม่							
เหนียวสันป่าตอง	960	896	917	951	1238	1257	1287
	640	620	697	763	833	893	956
	320	792	811	850	1050	1084	1132
	80	432	549	651	612	698	779
กข. 7	960	1049	1067	1102	1580	1600	1634
	640	961	980	1007	1377	1419	1463
	320	784	866	928/1098	1173	1247	
	80	512	679	814	774	924	1028

ข้อจำกัดของแบบจำลองภูมิอากาศ MK3

แบบจำลองภูมิอากาศ MK3 เป็นแบบจำลองที่มีขนาดของตารางพื้นผิวโลกในแนวนอนขนาด 200x200 กิโลเมตร ยังต้องปรับปรุงในด้านนี้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังมีความไม่แน่นอนเกี่ยวกับการคาดการณ์อัตราการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศโลก กระบวนการเคลื่อนที่ของความร้อนในมหาสมุทรเป็นส่วนสำคัญที่ต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในด้านวิทยาศาสตร์ เพื่อให้ความเข้าใจในการปรับปรุงแบบจำลอง นอกจากนี้การใช้ scenario 2 ซึ่งให้มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างทันทีในปี.ศ. 2549 นั้นอาจจะไม่สะท้อนความเป็นจริง เนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและค่อยเป็นค่อยไป

ข้อจำกัดของแบบจำลองข้าว CERES-Rice

แบบจำลองข้าว CERES-Rice เป็นแบบจำลองกระบวนการต่างๆ ที่เกิดในพืชและดินเท่าที่จะมีความเข้าใจ และเป็นแบบจำลองที่พิจารณากระบวนการผลิตเป็นจุด (point-based) กล่าวคือ เป็นแปลงผลิตพืชข้าวที่มีความสม่ำเสมอในด้านการจัดการผลิต สภาพทางเคมีและกายภาพของดิน นอกจากนี้ในแบบจำลองยังขาดพลวัตของธาตุอาหารพืชอีกหลายตัวที่สำคัญ โดยเฉพาะในสภาพการผลิตที่มีปริมาณน้ำฝนมากขึ้นกว่าในปัจจุบัน ซึ่งคาดว่าจะมีการระบายน้ำสูงกว่าระดับปัจจุบันหลายเท่าตัว

การเตรียมตัว

ในระดับเกษตรกร ควรเตรียมการเกี่ยวกับสภาพที่มีน้ำฝนมากกว่าระดับปัจจุบันถึงร้อยละ 40-50 ควรมีการปรับวิธีการระบายน้ำ การปรับปรุงวิธีการใส่ปุ๋ยเคมีอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเท่าเดิมรวมทั้งระดับผลผลิตข้าวที่ต้องการด้วย การที่น้ำฝนมีมากขึ้นตามแบบจำลองภูมิอากาศ MK3 นั้นอาจกระตุ้นให้เกิดปัญหาด้านโรคแมลงมากขึ้น มีการระบาดเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ในระดับเจ้าหน้าที่เกษตรในระดับพื้นที่ ควรเตรียมการด้านการเตือนภัย พัฒนาระบบเฝ้าระวังภัย และระบบการป้องกัน-แก้ไขสถานการณ์ที่อาจจะเกิดจากสภาพน้ำฝนมาก ควรเตรียมพัฒนาระบบเครือข่ายด้านนี้ในระดับพื้นที่ที่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารในระดับพื้นที่สูงพื้นที่ และพื้นที่สูญเสียไปให้มากขึ้น

ควรเตรียมการเพื่อดำรงรักษาความอุดมสมบูรณ์ของดินในสภาพที่มีน้ำฝนมากขึ้นกว่าเดิมโดยการเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน หรือ การปลูกพืชเสริมก่อนการทำนา เพื่อเสริมและเติมระดับของธาตุคาร์บอนในดิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญทางโครงสร้างของจุลินทรีย์ในดิน

สรุป

การใช้แบบจำลองพืชซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม DSSAT 3.5 และแบบจำลองภูมิอากาศ MK3 สามารถประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่อาจเกิดขึ้นได้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการผลิตข้าวในสองระบบนิเวศได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ในระหว่างปีพ.ศ. 2549-2568 ระบบการผลิตข้าวของทั้งสองจังหวัดมีแนวโน้มที่จะได้ผลผลิตไม่น้อยกว่าช่วงที่ผ่านมา และพบว่ามีปริมาณน้ำฝนมากกว่าระดับที่เคยได้รับ สิ่งที่แบบจำลองข้าวยังไม่มีพลวัตได้แก่ พลวัตของก๊าซเรือนกระจก เช่น ก๊าซมีเทน พลวัตของโรคแมลงในภาวะอากาศอนาคต และพัฒนาการของพันธุ์ข้าวในอีก 20 ปีข้างหน้า ในแบบจำลองภูมิอากาศยังต้องลดขนาดของค่าตารางของพื้นที่ให้สามารถจำลองสภาพภูมิอากาศเฉพาะพื้นที่ได้

คำนิยม

ดร. อานนท์ สนิทวงศ์ ณ อยุธยา และ START (<http://www.start.or.th>) ที่ช่วยประสานงานด้านข้อมูลกับ Dr. John McGregor ณ ศูนย์วิจัยบรรยากาศของ CSIRO น.ส. ศรินทิพย์ พรหมฤทธิ์ ช่วยเตรียมข้อมูลการผลิตข้าวในสองจังหวัดจากเอกสารและเว็บเพจของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร และนายปรากฏ ศรีงาม เพิ่มความสามารถในการแปลงข้อมูลอากาศที่ได้จากแบบจำลองอากาศ MK3 ให้อยู่ในรูปแบบของ ICASA โดยใช้โปรแกรม WeaData1

เอกสารอ้างอิง

- ปราการ ศรีงาม และ อรรถชัย จินตะเวช ๒๕๔๕ คู่มือการใช้งานโปรแกรมจัดการข้อมูลภูมิอากาศ WeaData 1.0 หน้า ๓๕๓-๓๕๔ ใน อรรถชัย จินตะเวชและ ศรินทิพย์ พรหมฤทธิ์ (บรรณาธิการ) รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยการประมาณผลผลิตอ้อยด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ๒๕๑๘-๔๔. สถิติการเกษตรของประเทศไทย. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- อรรถชัย จินตะเวช วินัย ศรวัต ก้อนทอง พวงประโคน หัสไชย บุญจง เกริก บัณฑิตเพ็ชร พนมศักดิ์ พรหมบุญรมย์ และ ปรีชา พรหมณีย์ ๒๕๔๔ แบบจำลองระบบการผลิตพืชกับงานวิจัยระบบการทำฟาร์ม เอกสารเสนอในการสัมมนาาระบบเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ ๑ กรุงเทพฯ ๑๕-๑๗ พ.ย. ๒๕๔๓.
- Alocilja, E.C., and J.T. Ritchie. 1988. Upland rice simulation and its use in multicriteria optimization. Univ. of Hawaii and Michigan State Univ. IBSNAT. 95 pp.
- Baker, J.T., L.H. Allen, Jr., and K.J. Boote. 1990. Growth and yield responses of rice to CO₂ concentration. J. Agric. Sci. 115: 313-320.
- Buendia, L.V., H-U. Neue, R. Wassmann, R.S. Lantin, A.M. Javellana, Y. Xu, A.K. Makarim, T.M. Corton, and N. Charoensilp. 1997. Understanding the Nature of Methane Emission from Rice Ecosystems as Basis of Mitigation Strategies. Applied Energy. 56: 433-444.
- Godwin, D.C., and U. Singh. 1998. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems, p. 55-78. In: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K. Thornton. (eds.) . Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Aca. Pub., London, UK.
- Gordon, H.B., and S.P. O'Farrell. 1997. Transient climate change in the CSIRO global coupled model with dynamical sea ice. Mon. Wea. Rev. 125: 875-907.
- Gordon, H.B., L.D. Rotstayn, J.L. McGregor, M.R. Dix, E.A. Kowalczyk, S.P. O'Farrell, L.J. Waterman, A.C. Hirst, S.G. Wilson, M.A. Collier, I.G. Watterson, and T.I. Elliott. 2002. The CSIRO MK3 Climate System Model. CSIRO Atmospheric Research Tech. Paper No. 60. (in Press).
- Hansen, J., I. Fung, A. Lacis, D. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy, and G. Russell. 1988. Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. J. Geophys. Res. 93: 9341-9364.
- Houghton, J., and D. Yihui, et al. (eds.). 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, U.K., New York: Cambridge University Press, UK, 881 pp.
- Houghton, R.A. 2002. Magnitude, distribution and causes of terrestrial carbon sinks and some implications for policy. Climate Policy. 1: 71-88.
- Jintrawet, A. A Decision Support System for Rapid Assessment of Lowland Rice-based Cropping Alternatives in Thailand. Agric. Syst. 47: 247-258.

- Lal, M., K. K. Singh, L. S. Rathore, G. Srinivasan, and S. A. Saseendran. 1998. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agricultural and Forest Meteorology*. 89:101-114.
- Matthews, R. B., M. J. Kropff, T. Horie, and D. Bachelet. 1997. Simulating the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia and Evaluating Options for Adaptation. *Agricultural Systems*. 54: 399-425.
- McCarthy, J.J., et al (eds.) . 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability : contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel. Cambridge; New York: Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 1032 pp.
- Metz, B., et al (eds.) . 2001. Climate Change 2001: Mitigation. Cambridge; New York : Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 752 pp.
- Olszyk, D.M., H. G. S. Centeno, L. H. Ziska, J. S. Kern, and R. B. Matthews. 1999. Global climate change, rice productivity and methane emissions: Comparison of simulated and experimental results. *Agricultural and Forest Meteorology*. 97: 87-101.
- Ritchie, J.T. 1998. Soil water balance and plant water stress, p. 41-54. In. G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K. Thornton. (eds.) . *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Aca. Pub., London, UK.
- Ritchie, J.T., U. Singh, D.C. Godwin, and W.T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield, p. 79-98. In. G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K. Thornton. (eds.) . *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Aca. Pub., London, UK.
- Tsuji, G.Y., G. Uehara, and S. Balas (eds.) . 1994. DSSAT v3. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- van Vuuren, D.P., and H.J.M. de Vries. 2002. Mitigation scenarios in a world oriented at sustainable development: the role of technology, efficiency and timing. *Climate Policy*. 1:189-210.
- Watherald, R.T., and S. Manabe. 1988. Cloud feedback processes in a general circulation model. *J. Atmos. Sci*. 45: 1397-1415.
- Wilson, C.A., and J.F.B. Mitchell. 1987. A doubled CO₂ climate sensitivity experiment with a GCM including a simple ocean. *J. Geophys. Res*. 92: 13315-13343.

URL1: <http://www.oae.go.th/>

URL2: <http://www.gfdl.noaa.gov/reference.html>