ผลกระทบของการไถเตรียมดินร่วมกับการใส่ฟางข้าวต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์และศักยภาพในการทำให้โลกร้อน

Impacts of soil tillage with added rice straw on organic-rice yield and global warming potential

พัชรี แสนจันทร์[1*], สิรินภา จันทโกสิน[1], ดวงสมร ตุลาพิทักษ์[2] และ เกษสุดา เดชภิมล[2]

Patcharee Saenjan[1*], Sirinapa Junthakosin[1], Duangsamorn Tulaphitak[2] and Ketsuda Dejbhimon[2]

บทคัดย่อ: ประเทศไทยส่งออกข้าวอินทรีย์เป็นอันดับหนึ่งของโลก แต่ผลผลิตเฉลี่ยข้าวอินทรีย์ไทยอยู่ที่ 287 กิโลกรัมต่อไร่ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำมาก การใส่ฟางข้าวลงไปในดินแล้วไถเตรียมดินและขังน้ำในฤดูปลูกจะเกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2 และ CH_4) สู่บรรยากาศ ในการทดลองนี้ได้ให้ความสำคัญกับผลของการไถเตรียมดินร่วมกับการใส่ฟางข้าว เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่มีต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์และศักยภาพในการทำให้โลกร้อน ทำการทดลองในพื้นที่นาปรังข้าวอินทรีย์ที่ทำติดต่อกันมานาน 5 ปี ทำใน พ.ศ. 2551 ตั้งอยู่ในเขตชลประทานที่บ้านหนองตูม ต.หนองตูม อ.เมือง จ.ขอนแก่น ดินนาทดลองเป็นชุดดินร้อยเอ็ด (Re soil series, Paleustults) เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ตำรับการทดลองเป็น factorial มี 2 ปัจจัย โดยปัจจัยที่ 1 คือการใส่ฟางข้าว 2 ระดับ ได้แก่ 1) การไม่ใส่ฟางข้าว และ 2) การใส่ฟางข้าว 4 ตัน/ไร่ ใช้ฟางข้าวเก่าที่มีสัดส่วน C:N 42 ส่วนปัจจัยที่ 2 คือ การไถเตรียมดิน 3 แบบ ได้แก่ 1) ไม่ไถ (no tillage) 2) ไถกลบตอซัง (incorporation of rice stubble) 3) ไถกลบตอซัง ไถแปร (harrowing) และทำเทือก (puddling) โดยการไถเตรียมดินแบบนี้เรียกสั้น ๆ ว่า การทำเทือก ตำรับการทดลองทั้งหมดมี 6 ตำรับ ทำ 3 ซ้ำ รวม 18 แปลง ก่อนการทดลองวัดปริมาณตอซังที่เหลือจากนาปีได้ 1,242 กิโลกรัม/ไร่ ปลูกข้าวแบบนาหว่านโดยใช้ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ ผลการทดลองพบว่าการใส่ฟางข้าว 4 ตันต่อไร่แล้วตามด้วยทำเทือกให้ผลผลิตข้าวอินทรีย์สูงที่สุดในการทดลอง 653 กิโลกรัมต่อไร่ ทั้งนี้เพราะการทำเทือกจะเร่งการสลายตัวของฟางข้าวในนาและปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่ต้นข้าว แต่อย่างไรก็ตามในตำรับนี้มีการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก 102 gCH_4 m^{-2} (163 kg CH_4 rai^{-1}) และมีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าว 250 gCH_4 kg^{-1}grain โดยมีศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (GWP) 1.57 kg Ceq kg^{-1}grain ส่วนการใส่ฟางข้าวและไถกลบฟางในสภาพดินชื้น 18 วันก่อนขังน้ำเพื่อหว่านข้าว จะส่งผลให้ลดปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก โดยปล่อยเพียง 45 gCH_4 m^{-2} ซึ่งต่ำกว่าการใส่ฟางข้าวแล้วตามด้วยการทำเทือกถึง 56% แต่ให้ผลผลิตข้าวลดลง 18.7% ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าหากจะไถกลบฟางข้าว(ไม่ทำเทือก)ในนาข้าวอินทรีย์เพื่อลดผลกระทบต่อศักยภาพในการทำให้โลกร้อนอาจจะต้องแลกกับการสูญเสียผลผลิตข้าว

คำสำคัญ: การไถ, ฟางข้าว, ข้าวอินทรีย์, มีเทน, ศักยภาพในการทำให้โลกร้อนต่อหน่วยผลผลิตข้าว

[1] สาขาวิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

Land Resources and Environment Section, Department of Plant Science and Agricultural Resources, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand.

[2] ศูนย์ศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเกษตรกรรมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

Agricultural Research and Development Center in Northeast, Faculty of Agriculture , Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand.

* corresponding author, e-mail:patsae1@kku.ac.th

ABSTRACT: Thailand is a world top country in exporting organic rice, although the average production is very low, 287 kg rai^{-1}. It is well known that addition of rice straw, tillage and soil submergence creates greenhouse gases (CO_2 and CH_4) and emits to atmosphere. The present experiment focused on impact of soil tillage with rice straw addition on organic-rice yield and its global warming potential (GWP). Field experiment was conducted in second rice cropping, 2008, in a paddy field where 5-consecutive-year organic rice was already grown. It is irrigated area locates in Ban Nongtoom, Tambol Nongtoom, Ampor Muang, Khon Kaen. Soil texture is sandy loam, Re soil series, Paleustults. Factorial treatments in Completely Randomized Design was set up. Factor 1 as 1) no rice straw (RS) and 2) with rice straw of 4 t rai^{-1}. The rice straw used was not fresh with C:N ratio 42. Factor 2 as 3 types of soil tillage: 1) no tillage, 2) incorporation of rice stubble, and 3) incorporation of rice stubble, harrowing and then puddling; this type of tillage in short was called puddling. The total treatments were 6 with 3 replications, carried out on 18 plots. Rice stubble residue left from previous crop was 1,242 kg rai^{-1}. Wet seeding of Chinat 1 rice variety at the rate of 10 kg rai^{-1} was cultivated. Results found that addition of rice straw, 4 t rai^{-1} with puddling gave highest organic rice yield, 653 kg rai^{-1}, as puddling helped accelerating organic matter decomposition and also releasing plant nutrients. However, this treatment emitted seasonal methane 102 gCH_4 m^{-2} (163 kg CH_4 rai^{-1}) and released 250 gCH_4 kg^{-1}grain with global warming potential (GWP) of 1.57 kg C_{eq} kg^{-1}grain. On the contrary, adding rice straw and then incorporating it in moist soil (not in submerged soil like in puddling case) 18 days before wet seeding could reduce total methane emission. It emitted merely 45 gCH_4 m^{-2} which was considerably lower than that with pudding rice straw by 56%, but it gave lower grain yield by 18.7%. The results indicated that managing agricultural practice to mitigate the impact on global warming potential can be made at the expense of losing some rice production.
Keywords: tillage, rice straw, methane, organic rice, GWP per kg grain

บทนำ

ข้าวอินทรีย์ผลิตมากในทวีปเอเชียและกำลังขยายตัวเพิ่มขึ้น ประเทศผู้ผลิตข้าวอินทรีย์ที่สำคัญมี 5 ประเทศได้แก่ จีน อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ เกาหลีใต้ และไทย รวมพื้นที่ผลิตข้าวอินทรีย์ทั่วโลก 839,463 ไร่ ประเทศไทยผลิตข้าวอินทรีย์เป็นอันดับ 5 ของโลก มีพื้นที่ปลูกข้าวอินทรีย์ 52,181 ไร่ สามารถผลิตข้าวอินทรีย์ 15,000 ตัน และส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของโลก (บริษัท ศูนย์วิจัยกสิกรไทย จำกัด, 2550) จากข้างต้นจะพบว่าผลผลิตเฉลี่ยของข้าวอินทรีย์ไทย 287 กิโลกรัมต่อไร่อยู่ในระดับต่ำมาก

ในกระบวนการผลิตข้าวอินทรีย์ เกษตรกรนิยมใส่อินทรียวัตถุ เช่น ฟางข้าว ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก และเศษซากพืชต่างๆ ลงไปในดินนาร่วมกับการไถเตรียมดินที่ประกอบด้วย ไถกลบตอซัง (ไถดะ) ไถแปร และทำเทือก และนิยมกักน้ำไว้ในกระทงนาให้ขังตลอดฤดูปลูกซึ่งสภาพน้ำในนาจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ว่าอาศัยน้ำฝนหรือน้ำชลประทาน อินทรียวัตถุและปุ๋ยอินทรีย์ที่ใส่ลงไปในดินนาจะทำหน้าที่เป็นแหล่งของธาตุอาหาร ฟื้นฟูสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดิน และขณะเดียวกันการสลายตัวของอินทรียวัตถุภายใต้สภาพที่ขาดออกซิเจนจะทำให้เกิดกระบวนการสร้างและปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2 และ CH_4) สู่บรรยากาศ ผลการศึกษาเกี่ยวกับการไม่ไถเตรียมดิน (no tillage) ในดินเขตร้อน พบว่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (GWP) เพิ่มขึ้นมากกว่าการไถแบบดั้งเดิม (conventional tillage) แต่ถ้าไม่ไถเตรียมดินติดต่อกันมากกว่า 20 ปี ศักยภาพในการทำให้โลกร้อนจะลดลง แต่ความไม่แน่นอนของศักยภาพในการทำให้โลกร้อนกลับสูงขึ้น (Six et al., 2004) อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษากับในดินไร่ และข้อมูลผลของการไถเตรียมดินในดินนาต่อก๊าซเรือนกระจกและศักยภาพในการทำให้โลกร้อนมีน้อยมากในประเทศไทย

ก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยมากเป็นอันดับสองรองจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทนมีศักยภาพทำให้โลกร้อนสูงกว่า CO_2 ถึง 25 เท่า (IPCC, 2007) ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าภายในระยะเวลา 2 ศตวรรษที่ผ่านมามีอัตราเพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศ 0.5 - 0.8% ต่อปี (Bouwman, 1991) เมื่อปี ค.ศ. 2000 ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในบรรยากาศ 0.7 ppmv ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนอาจเพิ่มขึ้นถึง 1.75 ppmv (Wuebbles and Hayhoe, 2002) และอาจมีอัตราเพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศ 1% ต่อปี (Schimel, 2000) ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนทั่วโลกจากทุกแหล่งกำเนิด

มีประมาณ 598 ล้านตันต่อปี (IPCC, 2001) โดยนักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวกันอย่างครอบคลุม พบว่านาข้าวทั่วโลกปลดปล่อยก๊าซมีเทน 90 ล้านตันต่อปี (IPCC, 2007), 53 ล้านตันต่อปี (Cao et al., 1998), 25 - 54 ล้านตันต่อปี (Mosier et al., 1998) และ 33 - 49 ล้านตันต่อปี (Neue and Sass, 1998) ในขณะที่นาข้าวของประเทศไทยปลดปล่อยประมาณ 1.8 ล้านตันต่อปี (นิวัติ, 2546) ข้าวนาอินทรีย์ปลดปล่อยประมาณ 107 - 990 gCH_4 m^{-2} (อัจฉราวดีและคณะ, 2552; พัชรีและคณะ, 2551)

ในการทดลองนี้วัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการไถเตรียมดินร่วมกับการใส่ฟางข้าวต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์และศักยภาพในการทำให้โลกร้อน

วิธีการศึกษา

พื้นที่ศึกษาและแผนการทดลอง

ทำการทดลองในนาข้าวอินทรีย์เกษตรกรในเขตชลประทานที่บ้านหนองตูม หมู่ที่ 3 ต.หนองตูม อ.เมือง จ.ขอนแก่น ในฤดูนาปรังเดือนมกราคมถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2551 พื้นที่นานี้ได้ปลูกข้าวอินทรีย์ติดต่อกันนาน 5 ปีก่อนการทดลอง เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) จัดอยู่ในชุดดินร้อยเอ็ด (Re soil series, Paleustults) พื้นที่ทดลองมีขนาด 783 ตารางเมตร วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ตำรับการทดลองเป็น factorial มี 2 ปัจจัย โดยปัจจัยที่ 1 คือ การใส่ฟางข้าว 2 ระดับ ได้แก่ 1) การไม่ใส่ฟางข้าว และ 2) การใส่ฟางข้าว ใช้ฟางข้าวเก่าที่เริ่มมีการสลายตัว มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม มีสัดส่วน C:N 42 ใส่ในอัตรา 4 ตัน/ไร่ ส่วนปัจจัยที่ 2 คือ การไถเตรียมดิน 3 ระดับ ได้แก่ 1) ไม่ไถ (no tillage) 2) ไถกลบตอซัง (incorporation of rice stubble) 3) ไถกลบตอซัง ไถแปร (harrowing) และทำเทือก (puddling) รวมทั้งหมด 6 ตำรับ ดังที่แสดงไว้ใน **Table 1** แต่ละตำรับทำ 3 ซ้ำ รวม 18 แปลงย่อย ก่อนการทดลองวัดปริมาณตอซังที่เหลือจากนาปีได้ 1,242 กิโลกรัมต่อไร่ เตรียมดินตามแผนการทดลอง ข้างต้น ทำนาหว่านโดยใช้ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่

การเก็บตัวอย่างก๊าซ

ใช้กล่องเก็บตัวอย่างก๊าซที่ทำด้วยอะคริลิค (acrylic) ครอบดินที่ปลูกข้าวในแต่ละแปลง โดยพื้นที่ที่ถูกครอบเพื่อเก็บตัวอย่างก๊าซ 0.6 x 0.6 เมตร เก็บในช่วงเวลา 9.00 - 11.00 นาฬิกา สัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยใช้กระบอกฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตรดูดตัวอย่างก๊าซออกจากกล่องเก็บตัวอย่างก๊าซทุก 5 นาที (0, 5, 10, 15 และ 20 นาที) แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph (Shimadzu GC-14B) ติดตั้งด้วยเครื่อง flame ionization detector (FID) (พัชรี และคณะ, 2545) คำนวณผลรวมของปริมาณก๊าซมีเทนที่ปล่อยทั้งหมดตลอดฤดูปลูก (total methane emission, TME หน่วยเป็น mg CH_4 m^{-2}) (Saenjan et al., 2002) คำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์ 1 กิโลกรัม (MPG) (พัชรี และชนะ, 2547; อัจฉราวดี และคณะ, 2552) และศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (global warming potential, GWP) (Freibauer, 2008) ต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์ 1 กิโลกรัม

การเก็บข้อมูลพืชและผลผลิตข้าว

นับจำนวนต้นข้าวต่อพื้นที่เมื่อต้นข้าวอายุ 68 วันหลังหว่าน และทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าวในพื้นที่ 1 ตารางเมตร ทำ 3 ซ้ำต่อตำรับการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของจำนวนต้นข้าวต่อพื้นที่ ผลผลิตข้าวอินทรีย์ ปริมาณก๊าซมีเทนที่ปล่อยทั้งหมดตลอดฤดูปลูก ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์ 1 กิโลกรัม (MPG) และศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (GWP) ต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์ 1 กิโลกรัม และมีการเปรียบเทียบตำรับการทดลองโดยวิธี Duncan's Multiple Rang Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม MSTAT-C

ผลการศึกษาและวิจารณ์

ผลของการไถและการใส่ฟางข้าวต่อจำนวนต้นข้าวและผลผลิตข้าวอินทรีย์

จำนวนต้นข้าวต่อพื้นที่ปลูกข้าวนาหว่านทั้งการทดลองอยู่ในช่วง 126 - 233 ต้นต่อตารางเมตร (**Table 1**) โดยพบว่าตำรับที่ทำเทือก (IHP และ RSIHP) ให้จำนวนต้นข้าวต่อพื้นที่ 215 และ 233 ต้นต่อตารางเมตรซึ่งมากกว่าตำรับที่ไม่ได้ทำเทือก (NT และ RSNT)ที่มีจำนวนต้นต่อพื้นที่ต่ำ 126 และ 133 ต้นต่อตารางเมตรอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ เนื่องจากการทำเทือกเป็นการปรับระดับพื้นที่ให้เรียบเหมาะแก่การกระจายตัวของเมล็ดข้าวที่หว่านและทำให้ดินนุ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการงอกและการตั้งตัวของเมล็ดดีกว่าที่ไม่มีการไถเตรียมดิน เพราะการไม่ไถเตรียมดินและการไถกลบตอซังอย่างเดียวจะทำให้หน้าดินไม่เรียบและขณะเดียวกันความชื้นที่ผิวดินไม่สม่ำเสมอทำให้เมล็ดข้าวงอกไม่ดี (กรมการข้าว, 2551) การทำเทือกจะลดการสูญเสียน้ำและธาตุอาหาร กำจัดวัชพืชและช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารด้วย (Sharma and De Datta, 1985; Ghildyal, 1978)

ในการทดลองนี้พบว่าการใส่หรือไม่ใส่ฟางข้าวจะให้จำนวนต้นข้าวต่อพื้นที่และผลผลิตข้าวไม่แตกต่างกันทางสถิติ (**Table 1**) นิตยา และคณะ (2551) พบว่าการไถกลบฟางข้าวที่อัตรา 1,200 - 1,600 กิโลกรัมต่อไร่ทำให้จำนวนต้นข้าวต่อตารางเมตรลดลงเมื่อเทียบกับการใส่ฟางข้าวที่อัตรา 0 - 800 กิโลกรัมต่อไร่ แต่ไม่มีผลต่อผลผลิตข้าว ในขณะที่การไถกลบฟางข้าวอัตรา 2,000 และ 2,400 กิโลกรัม.ต่อไร่ นอกจากจำนวนต้นข้าวต่อตารางเมตรลดลงแล้ว ยังพบว่ามีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวในช่วงแรก และทำให้ผลผลิตข้าวลดลง

ส่วนผลผลิตข้าวอินทรีย์ของทั้งการทดลองอยู่ในช่วง 400 - 653 กิโลกรัมต่อไร่ การไถและไม่ไถให้ผลผลิตข้าวอินทรีย์ไม่ต่างกัน แต่การไถและตามด้วยทำเทือก (IHP) ให้ผลผลิตข้าวอินทรีย์ 510 กิโลกรัมต่อไร่สูงกว่าการไม่ไถ (NT) ที่ให้ผลผลิตต่ำ 400 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับการทดลองของ Obermuelle and Mikkelsen (1984) ที่รายงานว่าการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ปลูกในดินที่มีการทำเทือกจะดีกว่าในดินที่ไม่ไถ

Table 1 Plant density, organic-rice yield, total methane emission (TME), methane emission per unit grain (MPG), global and global warming potential (GWP) per kg grain.

Treatment[2/]	Plant density[1/] (plant m^{-2})	Yield [1/] (kg rai^{-1})	TME[1/] (g CH_4 m^{-2})	MPG [1/] (g CH_4 kg^{-1} grain)	GWP per kg grain[1/ 3/] (kg C_{eq} kg^{-1}grain)
NT	126 c	400 c	30 bc	121 bc	0.76 bc
I	148 bc	450 bc	21 c	75 c	0.46 c
IHP	215 a	510 b	46 bc	145 b	0.91 b
RSNT	133 bc	451 bc	62 b	222 a	1.38 a
RSI	185 ab	531 b	45 bc	136 bc	0.85 bc
RSIHP	233 a	653 a	102 a	250 a	1.57 a
F-test	**	**	*	*	*
CV (%)	7.8	6.3	22.9	21.6	23.6

[1/] Average value (n = 3). Different letters indicate significant difference at $p \leq 0.01$(**) between the treatments by using DMRT.

[2/] NT: no tillage; I: incorporation of rice stubble; IHP: incorporation of rice stubble, harrowing and puddling; RSNT: rice straw application and no tillage; RSI: rice straw application, incorporation of rice stubble; RSIHP: rice straw application, incorporation of rice stubble, harrowing and puddling.

[3/] The index was expresses as CO_2-C equivalent to the GWP (CO_2 : CH_4 = 1 : 23)

การใส่ฟางข้าวในอัตรา 4 ตันต่อไร่ (โดยไม่ทำเทือกร่วม) ไม่สามารถเพิ่มผลผลิตข้าว แต่กลับส่งผลกระทบต่อต้นข้าว ทั้งนี้ผู้วิจัยสังเกตเห็นต้นข้าวมีอาการขาดไนโตรเจนใบมีสีเหลือง (chlorosis) เมื่อข้าวอายุ 45 วันหลังหว่าน ในขณะที่แปลงที่ใส่ฟางข้าว 4 ตันต่อไร่ที่มีการไถและตามด้วยทำเทือก (RSIHP) ให้ผลผลิตข้าวอินทรีย์สูงที่สุดในการทดลอง 653 กิโลกรัมต่อไร่และสูงกว่าแปลงที่ไม่ไถ (RSNT) ซึ่งให้ผลผลิต 451 กิโลกรัมต่อไร่และแปลงที่ไถกลบฟางข้าว (RSI) ซึ่งให้ผลผลิต 531 กิโลกรัมต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะเห็นว่าหากมีการใส่ฟางข้าว การทำเทือกจะจำเป็นมากต่อการเพิ่มผลผลิตข้าว ทั้งนี้เพราะการทำเทือกจะเร่งการสลายตัวของฟางข้าวในนาและปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่ต้นข้าว (Jing'an et al., 2007)

การใส่ฟางข้าวในปริมาณ 4 ตันต่อไร่ให้ผลผลิตข้าวอินทรีย์อยู่ในช่วง 451- 653 กิโลกรัมต่อไร่ นิตยา และคณะ (2551) รายงานว่าการไถกลบฟางข้าวในอัตรา 2 ตันต่อไร่ ให้ผลผลิตข้าว 674 กิโลกรัมต่อไร่ และ Surekha et al. (2006) รายงานว่าการไถกลบฟางข้าว (ในรายงานไม่ระบุปริมาณฟางข้าว) ให้ผลผลิตข้าวอยู่ในช่วง 551 - 591 กิโลกรัมต่อไร่ ในการทดลองนี้ผลผลิตข้าวของแปลงที่ใส่ฟางข้าวอยู่ในระดับที่คล้ายกับงานทดลองของนิตยา และคณะ (2551) และของ Surekha et al. (2006)

อย่างไรก็ตามผลผลิตข้าวอินทรีย์ในนาปรังชลประทาน (ชุดดินร้อยเอ็ด) ที่ได้จากการทดลองนี้ 451- 653 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณสูงกว่าค่าเฉลี่ยข้าวอินทรีย์ทั้งประเทศ 287 กิโลกรัมต่อไร่ ทั้งนี้จะเห็นว่าหากมีการให้น้ำชลประทานแก่ข้าวอินทรีย์จะสามารถเพิ่มผลผลิตได้มาก การทดลองกับข้าวอินทรีย์ในลักษณะคล้ายกันของ Maneewan and Sa-nguansubpayakorn (2007) พบว่าข้าวที่ได้รับปุ๋ยอินทรีย์และน้ำตลอดฤดูปลูกจะให้ผลผลิตข้าวสูงอยู่ในช่วง 1,090 - 1,194 กิโลกรัมต่อไร่ (ในชุดดินอยุธยา) และได้ผลผลิต 475 - 537 กิโลกรัมต่อไร่ (ในชุดดินองครักษ์) แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าการใส่อินทรียวัตถุลงไปในดินและขังน้ำจะส่งผลให้เกิดก๊าซเรือนกระจกโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนปล่อยสู่บรรยากาศ (Inubushi et al. (1997) ในดินนาขังน้ำหากไม่ใส่อินทรียวัตถุจะพบว่าปริมาณก๊าซมีเทนลดลง 57% และผลผลิตข้าวลดลง 16% เมื่อเทียบกับการใส่อินทรียวัตถุ (Yu and Chen, 2004)

ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก (total methane emission, TME)

การปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก (TME) ในแปลงที่ไม่ใส่ฟางข้าวอยู่ในช่วง 21 - 46 $gCH_4\ m^{-2}$ (**Table 1**) โดยพบว่า แปลงที่ไถกลบตอซัง (I) นั้นเดิมทีก่อนปลูกข้าวมีการไถกลบตอซัง 18 วันก่อนขังน้ำเพื่อหว่านข้าว ขณะนั้นดินได้อยู่ในสภาพชื้นมีออกซิเจนในดินทำให้อินทรียวัตถุในดินเกิดการสลายตัวได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Khalil and Inubushi, 2007) ในระดับหนึ่งไปก่อนแล้ว เมื่อมีการขังน้ำและหว่านเมล็ดข้าวในแปลงนี้พบว่ามีก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูกปล่อยในปริมาณ 21 $gCH_4\ m^{-2}$ ซึ่งต่ำที่สุดในการทดลอง ในแปลงที่ไม่ใส่ฟางข้าวนั้นผลของการไถเตรียมดินต่อปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูกไม่แตกต่างกัน

การปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูกในแปลงที่ใส่ฟางข้าวอยู่ในช่วง 45 - 102 $gCH_4\ m^{-2}$ ในขณะที่แปลงที่ใส่ฟางข้าวร่วมกับการไถนั้นพบว่าการใส่ฟางข้าวแล้วตามด้วยไถกลบ (RSI) มีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก 45 $gCH_4\ m^{-2}$ ต่ำกว่าแปลงที่ใส่ฟางข้าวและไม่ไถ(RSNT)ซึ่งปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก 62 $gCH_4\ m^{-2}$ ในขณะที่แปลงที่ใส่ฟางข้าวร่วมกับการไถกลบ ไถแปร และตามด้วยทำเทือก (RSIHP) มีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูกสูงที่สุด 102 $gCH_4\ m^{-2}$ จะเห็นว่าการใส่ฟางข้าวและไถกลบซึ่งทำในสภาพดินชื้น 18 วันก่อนขังน้ำเพื่อหว่านข้าว ส่งผลให้ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูกลดลง 27% เมื่อเทียบกับตำรับที่ใส่ฟางข้าวและไม่ไถ (ซึ่งในแปลงที่ใส่ฟางข้าวและไม่ไถนี้มีการขังน้ำ ทำให้ฟางข้าวสลายตัวในสภาพไร้ออกซิเจนตลอดฤดูปลูก จึงมีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนสูงกว่า) และลดลง 56% เมื่อเทียบกับตำรับที่ใส่ฟางข้าวร่วมกับการทำเทือก

พัชรี และคณะ (2551) พบว่าการใส่ฟางข้าวสดในอัตรา 800 กิโลกรัมต่อไร่ ไถกลบและขังน้ำมีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก 765 g CH_4 m^{-2} กล่าวคือได้ใส่ฟางข้าวสดในอัตราต่ำกว่าของการทดลองนี้ (ซึ่งการทดลองนี้ใช้ฟางข้าวเก่าอัตรา 4 ตันต่อไร่) แต่มีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนมากกว่าของการทดลองนี้ซึ่งปล่อยก๊าซมีเทน 45 - 102 g CH_4 m^{-2} ทั้งนี้เพราะในฟางข้าวสดมีสารพวกเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูงซึ่งเป็นสารประกอบที่สลายตัวง่าย ในขณะที่ฟางข้าวเก่ามีสารดังกล่าวน้อยกว่า (Laube and Martin, 1981) จึงปล่อยก๊าซมีเทนต่ำกว่า การใส่ปุ๋ยหมักฟางข้าวปล่อยก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 23 - 30 % ซึ่งปล่อยต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใส่ฟางข้าวสดที่ปล่อยก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 162 - 250% (Corton et al., 2000)

ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าว (methane emission per unit grain, MPG)

ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าว (MPG) เป็นดัชนีที่สะท้อนถึงในการผลิตข้าวนั้นจะต้องมีการปล่อยก๊าซมีเทนเกิดขึ้น โดยคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนที่ปล่อยจากการผลิตข้าวอินทรีย์ 1 กิโลกรัม จากการทดลองพบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 75 - 250 gCH_4 kg^{-1}grain (**Table 1**) ในแปลงที่ให้ผลผลิตข้าวอินทรีย์สูงที่สุดในการทดลอง 653 กิโลกรัมต่อไร่นั้นปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก 102 gCH_4 m^{-2} (163 kg CH_4 rai^{-1}) และมีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าว 250 gCH_4 kg^{-1}grain

งานวิจัยในลักษณะเดียวกันที่ทดลองในนาข้าวที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีชนิดต่างๆ ร่วมกับการจัดการน้ำเพื่อลดการปล่อยก๊าซมีเทนพบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าวอยู่ในช่วง 14 - 45 g CH_4 kg^{-1}grain (พัชรีและชนะ, 2547) จากนาข้าวที่มีการการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับการจัดการน้ำเพื่อลดการปล่อยก๊าซมีเทนจะมีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าวอยู่ในช่วง 37 - 113 g CH_4 kg^{-1}grain (พัชรีและสิริธร, 2548) ส่วนนาข้าวอินทรีย์ที่มีการไถกลบตอซังและปุ๋ยหมักและขังน้ำตลอดฤดูปลูกพบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าวอยู่ในช่วง 391 - 2,680 g CH_4 kg^{-1}grain (อัจฉราวดี, 2552) ในประเทศญี่ปุ่นนาข้าวที่มีการใส่กากตะกอนที่ค้างอยู่ในเตาหลอมเหล็ก (revolving furnace slag) ซึ่งเป็น oxidizing agentพบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าวอยู่ในช่วง 54 - 96 g C kg^{-1}grain (หรือ 72 - 128 g CH_4 kg^{-1}grain) (Furukawa and Inubushi, 2002) Corton et al. (2000) ได้วัดปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าวนาปรังที่มีการใส่ฟางข้าวสดอัตรา 4 ตัน/เฮกตาร์(หรือ 640 กก/ไร่)และขังน้ำตลอดฤดูปลูกอยู่ในช่วง 43 - 59 kg CH_4 t^{-1} grain (หรือ 43 - 59 g CH_4 kg^{-1}grain)

ศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (global warming potential, GWP)

ในการทดลองนี้ผลผลิตข้าว 1 กิโลกรัม มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (GWP) อยู่ในช่วง 0.46 - 1.57 kg C_{eq} kg^{-1}grain โดยพบว่าแปลงที่ใส่ฟางข้าวและไม่ไถ (RSNT) และแปลงที่ใส่ฟางข้าวร่วมกับการทำเทือก (RSIHP) นั้นผลผลิตข้าว 1 กิโลกรัม มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (GWP) 1.38 และ 1.57 kg C_{eq} kg^{-1}grain ซึ่งสูงกว่าทุกแปลง (NT, I, IHP และ RSI) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Zou et al. (2005)รายงานว่าการใส่วัสดุอินทรีย์ปรับปรุงดินในนาข้าวจะเพิ่ม GWP สุทธิอย่างมาก แต่ในขณะที่การระบายน้ำออกกลางฤดูให้กับดินที่ไม่ได้ใส่วัสดุอินทรีย์จะลด GWP สุทธิลงอย่างมาก การระบายน้ำออกหลายครั้งและการระบายน้ำออกกลางฤดูลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและศักยภาพในการทำให้โลกร้อนลงได้ 35% แต่ผลผลิตข้าวลดลง 7 - 11% (Towprayoon et al., 2005) ในขณะที่การทดน้ำให้กับดินแห้งกลับทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nishimura et al., 2004)

สรุป

การไถเตรียมดินร่วมกับการใส่ฟางข้าวมีผลกระทบต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์และศักยภาพในการทำให้โลกร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดการฟางข้าวและสภาพความชื้นในดิน โดยที่การใส่ฟางข้าวและการทำเทือก

จำเป็นมากต่อการเพิ่มผลผลิตข้าวอินทรีย์ ทั้งนี้การใส่ฟางข้าว 4 ตันต่อไร่แล้วตามด้วยทำเทือกให้ผลผลิตข้าวอินทรีย์สูงที่สุดในการทดลอง 653 กิโลกรัมต่อไร่ เพราะการทำเทือกจะเร่งการสลายตัวของฟางข้าวในนาและปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่ต้นข้าว แต่อย่างไรก็ตามในตำรับนี้มีการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก 102 $gCH_4\ m^{-2}$ (163 kg $CH_4\ rai^{-1}$) และมีปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนต่อหน่วยผลผลิตข้าว 250 $gCH_4\ kg^{-1}$grain โดยมีศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (GWP) 1.57 kg $C_{eq}\ kg^{-1}$grain ส่วนการใส่ฟางข้าวและไถกลบฟางในสภาพดินชื้น 18 วันก่อนขังน้ำเพื่อหว่านข้าวจะส่งผลให้ลดปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดตลอดฤดูปลูก โดยปล่อยเพียง 45 $gCH_4\ m^{-2}$ ซึ่งต่ำกว่าการใส่ฟางข้าวแล้วตามด้วยการทำเทือกถึง 56% แต่ให้ผลผลิตข้าวลดลง 18.7%

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนทั่วไป ปีงบประมาณ 2551 สำหรับดำเนินการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมการข้าว กระทรวงเกษตรสหกรณ์. 2551. การเตรียมแปลงปลูกข้าว. แหล่งข้อมูล: http://www.brrd.in.th /rkb/data_006/rice_xx2-06_NEWweedriceA03.html. ค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2552.

นิตยา รื่นสุข, ประนอม มงคลบรรจง, เฉลิมชาติ ฤาไชยคาม, และ วาสนา อินแถลง. 2551. การจัดการฟางข้าวในพื้นที่ทำนาอย่างต่อเนื่อง. วารสารวิชาการข้าว. 2: 35-46.

นิวัติ เจริญศิลป์. 2546. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ: ก๊าซมีเทนจากนาข้าว. เอกสารทางวิชาการ. ศูนย์วิจัยข้าวปราจีนบุรี สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร.

บริษัท ศูนย์วิจัยกสิกรไทย จำกัด. 2550. ข้าวอินทรีย์: ศักยภาพการตลาดที่เติบโตอย่างต่อเนื่อง (มองเศรษฐกิจฉบับที่ 1991). แหล่งข้อมูล: http://www.kasikornresearch.com/portal/site/KResearch/menuitem.458591694986660a9e4e1262658f3fa0/?cid=4&id=9215. ค้นเมื่อ 31 ตุลาคม 2552.

พัชรี แสนจันทร์ และชนะ ศรีสมภาร. 2547. ผลตอบแทนการผลิตข้าวจากนาที่มีการลดการปล่อยก๊าซมีเทน. วารสารเกษตร. 20: 259-271.

_____. และ สิริธร คมน์ทิพยรัตน์. 2548. การจัดการปุ๋ยและน้ำเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าวหว่านน้ำตมและลดการปล่อยก๊าซมีเทน. วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 38: 13-32

_____. กัลยกร โปร่งจันทึก และ ดวงสมร ตุลาพิทักษ์. 2551. การใช้วัสดุอินทรีย์ในนาข้าวอินทรีย์ที่มีการลดก๊าซมีเทน. วารสารวิจัย มข. 13: 114-125.

_____. อัจฉราวดี เครือภักดี และ ดวงสมร ตุลาพิทักษ์. 2551. ผลผลิตข้าว การสะสมคาร์บอน และศักยภาพของการเกิดก๊าซมีเทนในดินนาที่ใส่ปุ๋ยหมักฟางข้าวและลดการไถพรวน. แก่นเกษตร. 36: 305-314.

_____. ดวงสมร ตุลาพิทักษ์, เทพฤทธิ์ ตุลาพิทักษ์ และศุภชัย ตั้งชูพงศ์. 2545. ปริมาณการปลดปล่อย CH_4 จากนาข้าวเกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, ขอนแก่น.

อัจฉราวดี เครือภักดี. 2552. ผลของการเตรียมดิน การใช้ตอซังและปุ๋ยหมักฟางข้าวต่อผลผลิตข้าวอินทรีย์และพลวัตของอินทรีย์คาร์บอนในดินนา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

อัจฉราวดี เครือภักดี,พัชรี แสนจันทร์ ดวงสมร ตุลาพิทักษ์ และสุรศักดิ์ เสรีพงศ์. 2552. อิทธิพลของการเตรียมดินและปุ๋ยหมักฟางข้าวต่อความหนาแน่นรวมของดิน ผลผลิตขาวและการปลดปล่อยก๊าซมีเทน. วารสารวิจัย มข ฉบับวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และเทคโนโลยี. 14: 89-99.

Bouwman, C.M. 1991. Agronomic aspects of wetland rice cultivation and associated methane emission. Biogeochemistry. 15: 65-88.

Cao M., K. Gregson, and S. Marshall. 1998. Global methane emission form wetlands and its sensitivity to climate change. Atmos. Environ. 32: 3293-3299.

Corton, T.M., J.B. Bajita, F.S. Grospe, R.R. Pamplona, C.A. Asis Jr., R. Wassmann, R.S. Lantin, and L. V. Buendia. 2000. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in Central Luzon (Philippines). Nutrient Cycling in Agroecosystems. 58: 37-53.

Furukawa, Y., and K. Inubushi. 2002. Feasible suppression technique of methane emission from paddy soil by iron amendment. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 64: 193-201.

Freibauer, N. 2008. Designing an observation strategy for N_2O. Spring New York. 203: 135-151.

Ghidyal, B. P. 1978. Effects of compaction and puddling on soil physical properties and rice growth. Soils and rice IRRI Los Banos, Philippines.

Inubushi, K., K. Hori, S. Matsumoto, and H. Wada. 1997. Anaerobic decomposition of organic carbon in paddy soil in relation to methane emission to the atmosphere. Water Science and Technology. 36: 523-530.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Eds Houghton, J.T., Y Ding, DJ Griggs, M Noguer, PJ van der Linden, and D Xiaosa. Cambridge University Press, Cambridge.

_____. 2007. Summary for Policymaker. *In:* Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge.

Jing'an, S., T. Xiaohong, W. Chaofu, and X. Deti. 2007. Effect of conservation tillage on soil organic matter in paddy rice cultivation. Acta Ecologica Sinica. 27: 4434 - 4442.

Khalil, M.I., and K. Inubushi. 2007. Posibilities to reduce rice straw-induced global warming potential of a sandy paddy soil by combining hydrological manipulations and urea - N fertilizations. Soil Biology & Biochemistry. 39: 2675-2681.

Laube V.M. and S.M. Martin. 1981. Conversion of Cellulose to Methane and Carbon Dioxide by Triculture of Acetivibrio cellulolyticus, Desulfovibrio sp., and Methanosarcina barkerit. Applied and Environmental Microbiology.

Maneewan, N., and C. Sa-nguansubpayakorn. 2007. Effect of organic and chemical fertilizers on acid sulfate soil management for Patumthani 1 rice production. P. 1-7. In: the 4th Steering Meeting and Symposium on International Network for Water and Ecosystem in Paddy Field (INWEPF) on 5 - 7 July, 2007. The Emerald Hotel, Bangkok, Thailand.

Mosier, A.R., J.M Dexbury, J.R. Freney, O. Heinemeyer, K. Minami and D.E. Johnson. 1998. Mitigating agricultural emissions of methane. Climate Change. 40: 39-80.

Neue, H.U., and R.L. Sass. 1998. The budget of methane from rice fields. IGACtivities Newsletter. 12: 3 - 11.

Nishimura, S., T. Sawamoto, H. Akiyama, S. Sudo, and K. Yagi. 2004. Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. Global biogeochemical cycles. 18: GB2017.1- GB2017.10.

Obermuelle, A.J., and D.S. Mikkelsen. 1984. Effect of water management and soil aggregation on the growth and nutrient uptake of rice. Agron. J. 66: 627-632.

Saenjan. P., D. Tulaphitak, T. Tulaphitak, S. Tangchupong, and S. Jearakongman. 2002. Methane emission from Thai farmer's paddy fields as s basis for appropriate mitigation technologies. Transactions of Soil Science : Confronting New Realties in the 21st Century. In: 17th World Congress of Soil Science, 14 - 21 August 2002, Bangkok, Thailand.

Schimel, J. 2000. Miorobes and Methane. Nature. 403: 375 - 7.

Sharma, P.K., and S.K. De Datta. 1985. Effects of pudding on soil physical properties and processes. Soil physics and rice, International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.

Six, J., S.M. Ogle, F.J. Breidt, R.T. Conant, A.R. Mosier, and K. Paustain. 2004. The potential of mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. Global Change Biology. 10: 155-160.

Surekha, K., K. Pavan, C. Reddy, A.P. Padma, S.P. Kumari, and P.C. Cruz. 2006. Effect of straw on yield components of rice (Oryza sativa L.) under rice - rice cropping system. J. Agronomy & Crop Science 192: 92-101.

Towprayoon, S., K. Smakgahn, and S. Poonkaew. 2005. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. Chemosphere. 59: 1547-1556.

Wuebbles, D.J., and K. Hayhoe. 2002. Atmospheric methane and global change. Earth-Sci Rev. 57: 177-210.

Yu, K., and G. Chen. 2004. Reduction of global warming potential contribution from a rice field by irrigation, organic matter, and fertilizer management. Global Biogeochemical Cycles. 18: GB3018-10.

Zou, J., Y. Huang, and J. Jiang. 2005. A 3-year measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. Global Biogeochemical Cycles. 19: GB2021-19.