ผลงานเรื่องที่ 2

ผลงานฉบับเต็ม

เรื่อง

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่มีต่ออินทรีย์คาร์บอนในดินในประเทศไทย
Effects of Land-use Changes on Soil Organic Carbon in Thailand

ของ

นายสถาพร ใจอารีย์
ตำแหน่งนักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษ ตำแหน่งเลขที่ 302
สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 1 กรมพัฒนาที่ดิน

ขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิชาการเกษตรเชี่ยวชาญ
ตำแหน่งเลขที่ 302
ผู้เชี่ยวชาญด้านวางระบบการพัฒนาที่ดิน

สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 1 กรมพัฒนาที่ดิน
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

สารบัญ

เรื่อง	**หน้า**
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	1
การตรวจเอกสาร	2
วิธีดำเนินการ	7
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	12
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	23
คำขอบคุณ	24
เอกสารอ้างอิง	25
ภาคผนวก	28

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าน้ำหนักของอะตอม (Atomic Weight) และ สัดส่วนที่พบในโลกของ ไฮโดรเจน (H) คาร์บอน(C) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O)	6
2	การจำแนกดิน และความหนาแน่นรวมของดินในแปลงศึกษา	13
3	ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และสมบัติของดินบางประการในแต่ละ 10 เซนติเมตร ที่ความลึก 1 เมตร (± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	14
4	ค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ($\delta^{13}C$) ของดินตามระดับความลึกแต่ละ 10 เซนติเมตร ของดินลึก 1 เมตร ในแต่ละแปลง (± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, สุ่มเก็บ 5 ซ้ำในแต่ละแปลง)	16
5	ประวัติการใช้ที่ดินและการจัดการดินในแปลงทดลองข้าวโพดคัดพันธุ์ของศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน จังหวัดฉะเชิงเทรา	21

ตารางผนวกที่

1	คำอธิบายชั้นหน้าตัดดิน (Soil profile description) ของดินแปลงศึกษาทั้ง 4 แปลง ในอำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา	29
2	ค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (C_s) อินทรีย์คาร์บอนจากป่า (C_{df}) และอินทรีย์คาร์บอนจากข้าวโพด (C_{dc}) โดยคำนวณจากเดลต้าคาร์บอน-13 ($\delta^{13}C_s$) ในดินของช่วงเวลาที่ศึกษา 12 ปี หลังบุกเบิกป่าอำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา	33
3	ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ที่ระดับ 0-10, 40-50, 70-80 และ รวม 0-100 เซนติเมตร ในช่วงเวลาที่ศึกษา 12 ปี หลังบุกเบิกป่า อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	34

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กราฟการเปลี่ยนแปลงของ (1) ปริมาณคาร์บอน (2) ค่า เดลต้าคาร์บอน-13 ของอินทรียวัตถุในดินที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร โดยใช้โมเดลแสดงการเปลี่ยนแปลงของป่า (เส้นประหนา) ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ (เส้นดำหนา) ป่าฟื้นฟูคาโปเอียร่า (Capoeira) ระบบเปิด (เส้นประเล็ก) และ ป่าฟื้นฟูคาโปเอียร่า ระบบปิด (เส้นดำเล็ก)	4
2	ปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนในดินและสัดส่วนของคาร์บอนที่สลายตัวยากและง่ายของพืชป่าและพืชเกษตรหลังการเปลี่ยนแปลงจากป่าไปเป็นทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์และอ้อยโดยสมาการการถดถอย(Fitted regression models)	5
3	แปลงศึกษาการปลูกข้าวโพดหลังจากป่าถูกบุกเบิกในพื้นที่อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา	7
4	ภาพถ่ายดาวเทียมของ พ.ศ.2532 (1989), พ.ศ.2539 (1996) และ พ.ศ. 2545 (2002) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ในแปลงป่าไม้ (NFT), ข้าวโพด 3 ปี (AG3), 7 ปี (AG7) และ 10 ปี (AG10)	9
5	รูปหน้าตัดดินของแปลงป่าดั่งเดิม ในอำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา	15
6	ค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาหลังจากป่าถูกบุกเบิก ในระดับความลึกที่ชั้นดิน 0-10, 40-50 และ 70-80 เซนติเมตร	17
7	การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมในดิน (Cs), ที่สลายจากป่า (Cdf) และจากข้าวโพด (Cdc) ในช่วงเวลา 12 ปี หลังจากถูกบุกเบิกในดินที่ระดับ 0-10 เซนติเมตรของแปลงศึกษา 18	18
8	กราฟการคาดการณ์โดยใช้สมการการสลายแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยการสมการการถดถอย ของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (C_s) อินทรีย์คาร์บอนจากป่า (C_{df}) และ อินทรีย์คาร์บอนจากข้าวโพด (C_{dc}) ใน ช่วงเวลา 50 ปีข้างหน้า	20
9	ปริมาณสัดส่วนของอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายง่าย (Labile carbon); (เส้นดำประ) และย่อยสลายยาก (Stable carbon); (แถบสีดำ) เปรียบเทียบกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินรวม (เส้นลายดำ) หลังจากการเปลี่ยนจากป่ามาเป็นข้าวโพดในช่วงเวลา 50ปี ของแปลงศึกษาอำเภอท่าตะเกียบ	20
10	กราฟการสลายแบบเอกซ์โพเนนเชียลเชิงเส้นผสมผสาน เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนภายใต้การจัดการที่เข้มข้น (●) และการจัดการแบบทั่วไป (○) ในดิน หลังจากป่าถูกบุกรุก (0 ปี, พ.ศ.2510) ของแปลงศึกษาศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา	22

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่มีต่ออินทรีย์คาร์บอนในดินของประเทศไทย

สถาพร ใจอารีย์

สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 1 กรมพัฒนาที่ดิน

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่มีต่ออินทรีย์คาร์บอนในดิน ทำการทดลองในพื้นที่ อำเภอท่าตะเกียบและอำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา มีจุดประสงค์เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนในดินจากพื้นที่ป่าไม้มาเป็นข้าวโพด โดยใช้วิธีการศึกษาแบบต่อเนื่องของเวลาและไอโซโทปเทคนิค เริ่มทำการศึกษาโดยเก็บข้อมูลดินและพืชใน พ.ศ.2548 จากแปลงศึกษาทั้งหมด 4 แปลง คือ 1) แปลงป่าไม้ธรรมชาติ 2) แปลงปลูกข้าวโพดหลังจากถูกบุกรุกระยะเวลา 3 ปี 3) 7 ปี และ 4)10 ปี โดยทำการเก็บข้อมูลต่อเนื่องอีก 3 ปี ตั้งแต่ พ.ศ.2548 ถึง พ.ศ. 2550 รวมเป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 12 ปี ตามลำดับ ผลการศึกษาในพื้นที่ อำเภอท่าตะเกียบ พบว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินลดลงในอัตรา 43.6 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี โดยคิดเป็น 47 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ลดลงเทียบจากดินป่า การศึกษาโดยใช้ไอโซโทปเทคนิคพบว่า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ลดลงนี้ส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์คาร์บอนของพืชป่าไม้ ในขณะที่อินทรีย์คาร์บอนในดินที่มาจากการปลูกข้าวโพด มีการเพิ่มขึ้นเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ (12.3 ตันคาร์บอนต่อไร่ จากคาร์บอนทั้งหมด 151.4 ตันคาร์บอนต่อไร่) และเมื่อศึกษาในดินภายใต้การจัดการดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์อย่างเข้มข้นในแปลงศูนย์ศึกษา พบว่าเพิ่มขึ้นกว่าเดิมที่เป็นป่าถึง 2 เท่า (จากดินป่าดั่งเดิม 64.6 ตันคาร์บอนต่อไร่ เป็น 103.2 ตันคาร์บอนต่อไร่) และ พบว่า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน จากพื้นที่ป่าดั้งเดิม 64.6 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี เมื่อเวลาผ่านไป 40 ปี พบว่าพื้นที่ที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงบำรุงดินนั้นลดลงเหลือ 15.4 ตันคาร์บอนต่อไร่ ในขณะที่มีการจัดการที่เข้มข้น พบว่ามีการเพิ่มขึ้น เป็น 103.2 ตันคาร์บอนต่อไร่ จากการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากป่าไม้มาเป็นข้าวโพดมีผลต่อการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนอย่างมาก ในขณะที่ระบบการปลูกข้าวโพดแบบทั่วไป หลังบุกเบิกป่า มีการเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนในดินน้อยมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการจัดการดินอย่างเข้มข้น พบว่าอินทรีย์คาร์บอนในดินเพิ่มขึ้นกว่าเดิมที่เป็นป่าถึง 2 เท่า

คำหลัก : การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน อินทรีย์คาร์บอน ข้าวโพด ไอโซโทปเทคนิค อัตราการเปลี่ยนแปลง
ทะเบียนวิจัยเลขที่ : 49-53-13-15-010001-013-102-01-13

Effects of Land-use Changes on Soil Organic Carbon in Thailand

Sathaporn Jaiarree

Office of Land Development Regional 1 Land Development Department

Abstract

The study on the effects of land-use changes on soil organic carbon aims to investigate changes in soil carbon stocks when tropical forest is converted to conventional corn plantation. The study was conducted during 2005-2007 at Tha Ta Kieb and Phanom Sara Kham district in Chachoengsao province, eastern Thailand. The impact of land-use and management on dynamics of soil carbon was studied using the stable carbon isotope technique and chronosequence study. Soil carbon and its components were examined by studying soil under corn cultivation and after deforestation at periods of 0, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11 and 12 years. The results revealed that only small carbon inputs from conventional corn plantation were found over this time span, and thus soil carbon is still dominated by the forest-derived fraction The study found that soil carbon was reduced at the rate of 43.56 ton carbon per rai per year. Reduction was most pronounced in the top 10 cm soil layer, which after 12 years of cultivation, reduced by 47%. After 12 years of continuous corn cultivation, the corn-derived carbon fraction made up about 10% of total soil organic carbon (1.96 of the total 24.22 ton carbon per rai). However, when the soil was improved by intensive soil management program found that the amount of soil organic carbon was raised up more than the original forest soil 2 times (64.63 to 103.19 ton carbon per rai) From these results, it can be concluded that deforestation followed by conventional corn cultivation causes a rapid reduction of soil organic carbon, and represents a significant contributor to carbon emissions into the atmosphere. However, it found that soil organic carbon was raised up more than the original forest soil by intensive soil management program

Keywords : Land-use change, soil organic carbon, corn, stable isotope, turnover rate

Research number: 49-53-13-15-010001-013-102-01-13

คำนำ

ในรอบหลายทศวรรษ ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้ที่ดินอย่างมาก โดยเฉพาะการบุกรุกทำลายป่า เพื่อเปลี่ยนมาทำการเกษตร (Phat et al., 2004) พื้นที่ป่าไม้ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้ลดลงจาก 1,634 ล้านไร่ ใน พ.ศ. 2533 เป็น 1,597 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2548 (FAO, 2005) ซึ่งพื้นที่การเกษตรเพิ่มขึ้นถึง 350 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงศตวรรษ (พ.ศ. 2423 ถึง 2523) (Flint, 1994) ประเทศไทย หลังจากป่าถูกบุกรุกการไถดินและการเผาป่าไม้เป็นกระบวนการหนึ่ง ในการเตรียมแปลงเพาะปลูกการเกษตร ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซค์สู่บรรยากาศ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ย่อมจะมีผลต่อการหมุนเวียนของอินทรีย์คาร์บอนในดินด้วย (Brunn et al., 2009 ; Ziegler et al., 2009)

อินทรีย์คาร์บอนในดิน (Soil organic carbon) พบว่ามีปริมาณเก็บกักอยู่ในสัดส่วนสูงที่สุดในระบบการหมุนเวียนของคาร์บอนในของโลก (Batjes, 1996) มีการศึกษาอย่างหลากหลายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากป่ามาเป็นพื้นที่เกษตร ที่มีผลต่ออินทรีย์คาร์บอนในดิน (Mendham et al, 2003 ; Cerri et al., 2007 ; Yimer et al., 2007 ; Reijneveld et al., 2009 ; Schulp and Verburg, 2009) อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงนี้นอกจากจะมีผลต่ออินทรีย์คาร์บอนในดินแล้วยังมีผลต่อระบบนิเวศอื่นๆ ด้วย อาทิเช่น ระบบการหมุนเวียนของธาตุอาหารในดิน ระบบความสัมพันธ์ของดินและน้ำ ขบวนการชะล้างพังทลายของดิน และการเก็บกักคาร์บอนในดิน เป็นต้น ข้อมูลจากความสัมพันธ์ต่างๆ เหล่านี้ย่อมจะมีผลต่อการวางแผนการจัดการระบบการเกษตรอย่างยั่งยืนในอนาคต (Wen et al., 2007) การศึกษาอินทรีย์คาร์บอนจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน สามารถประยุกต์ใช้วิธีการไอโซโทปเทคนิคของไอโซโทปคาร์บอนที่เสถียรตัว(Stable carbon isotope) ทำการวิเคราะห์เพื่อมาใช้ประเมินของอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในดินที่สลายตัวมาจากพืชที่ต่างชนิดกันโดยการหาค่าสัดส่วนของไอโซโทปคาร์บอนกับคาร์บอนปกติ ($^{13}C/^{12}C$) และพืชตัวอย่างและคำนวณอยู่ในรูปเดลต้าคาร์บอน-13 ($\delta^{13}C$)[1] มีหน่วยเป็นเปอร์มิล(Per mil - ‰) ทั้งนี้พืชที่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงสูง เช่น พืชตระกูลหญ้า ข้าวโพด จะมีค่า เดลต้าคาร์บอน-13อยู่ในช่วง -17 เปอร์มิล ถึง -9 เปอร์มิล ส่วนพืชประเภทไม้ยืนต้นต่างๆ อาทิเช่น ป่าไม้ ไม้ผล เป็นต้น จะมีค่าอยู่ในช่วง -33 เปอร์มิล ถึง -22 เปอร์มิล (O'Leary, 1981)

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่มีผลอินทรีย์คาร์บอนในดิน 2) ศึกษาสัดส่วนของอินทรีย์คาร์บอนในดินภายใต้ระบบการปลูกข้าวโพด หลังจากการเปลี่ยนการใช้ที่ดินจากป่ามาเป็นข้าวโพด 3) ศึกษาการประยุกต์ใช้สมการทดถอย (Regression model) ของอินทรีย์คาร์บอนในดินกับช่วงเวลาภายใต้การใช้ที่ดินที่แตกต่างกัน หลังจากป่าถูกบุกเบิก

ซึ่งจะสามารถศึกษาแหล่งที่มาของอินทรีย์คาร์บอนที่ผสมอยู่ในดินนั้นๆ ได้ (Staddon, 2004) สำหรับในประเทศไทยมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ป่ามาปลูกอ้อยพบว่า มีการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนอย่างเห็นได้ชัด (Yoneyama et al., 2006) และได้ใช้วิธีการไอโซโทปเทคนิคในการประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากป่าไม้ไปเป็นข้าวโพดที่มีผลต่ออินทรีย์คาร์บอนในดิน อัตราการเปลี่ยนแปลงของ

---

[1] เดลต้าคาร์บอน-13 ($\delta^{13}C$) หมายถึง ค่าบ่งบอกเฉพาะตัวทางนิเวศวิทยา คำนวณจากค่าสัดส่วนของการเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนของไอโซโทปคาร์บอนกับคาร์บอนปกติ ($^{13}C/^{12}C$) ของตัวอย่างที่ศึกษากับตัวอย่างมาตรฐาน มีหน่วยเป็น เปอร์มิล (Per mil - ‰) (Craig, 1957)

อินทรีย์คาร์บอนในดินตลอดจนศึกษาถึงสัดส่วนของอินทรีย์คาร์บอนในดินที่มาจากแหล่งกำเนิดของพืชป่าไม้หรือข้าวโพด โดยศึกษาในลักษณะความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องของเวลาหลังจากป่าถูกบุกรุกทำให้สามารถอธิบายถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้ที่ดินที่ไม่เหมาสมเพื่อหาวิธีการจัดการเพื่อบรรเทาสภาวะโลกร้อนได้เป็นอย่างดี

การตรวจเอกสาร

1. อินทรีย์คาร์บอนในดิน

แหล่งสะสมคาร์บอนบนโลกหลักๆ ได้แก่ ดิน บรรยากาศ และน้ำ ดินเป็นแหล่งเก็บกักที่มีบทบาทสำคัญของวัฏจักรคาร์บอนในโลก โดยพบว่ามีอินทรีย์คาร์บอนเก็บกักอยู่ประมาณ 1,550 เพนตากรัมคาร์บอน (Pg C) [2] และมีอนินทรีย์คาร์บอนเก็บกักอยู่ 750 เพนตากรัมคาร์บอน ที่ความลึก 1 เมตร ซึ่งรวมแล้วดินเก็บกักคาร์บอนทั้งหมด 2,300 เพนตากรัมคาร์บอน ถึง 3 เท่า และมากกว่าพืชพรรณบนผิวโลกที่มี 610 เพนตากรัมคาร์บอน ถึง 3.8 เท่า (Batjes, 1996) 1 ใน 3 ของคาร์บอนเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งพบใต้ดิน และ 1 ใน 25 ของคาร์บอนจะอยู่ในน้ำ สำหรับการแลกเปลี่ยนคาร์บอนระหว่างพื้นดินและบรรยากาศนั้น ดินจะมีการปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศในปริมาณเท่ากับที่พืชใช้ในการสังเคราะห์แสงและถ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนในดินเนื่องมาจากการชะล้างพังทลายของดิน จะทำให้ปริมาณคาร์บอนในดินลดลงได้

การสะสมอินทรีย์คาร์บอนมีต้นกำเนิดมาจากการย่อยสลายของอินทรียวัตถุซึ่งเป็นการย่อยสลายของพืชและสัตว์ด้วยจุลินทรีย์ การย่อยสลายของพืชหรือลำต้นที่ถูกไถกลบลงไปในดินหลังจากเก็บเกี่ยวแล้วจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการย่อยสลายของสัตว์ที่ตายลง ปุ๋ยคอกที่เติมลงไปในดินเพื่อช่วยยกระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน หลังจากสิ่งต่างๆ เหล่านั้นเข้าสู่ดินแล้ว อินทรีย์คาร์บอนจะส่งผลต่อโครงสร้างของดิน โดยเริ่มจากมวลชีวภาพถูกเปลี่ยนสภาพในกระบวนการย่อยสลายพร้อมทั้งมีจุลินทรีย์ในดินมาย่อยสลายมวลชีวภาพ อินทรีย์คาร์บอนที่มาจากแต่ละขั้นตอนนั้นมีองค์ประกอบและคุณสมบัติแตกต่างกัน บางครั้งการแตกตัวของอินทรีย์คาร์บอนจะเป็นอินทรีย์คาร์บอนชนิดเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาซึ่งมาจากจุลินทรีย์ที่อยู่ใต้ดิน และอาศัยอยู่ใต้ดินมาเป็นเวลาพันปี

นอกจากนั้น คาร์บอนเข้าสู่ดินโดยพืชสีเขียวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยกระบวนการสังเคราะห์แสงเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบในรูปคาร์บอนต่างๆ เช่น เซลลูโลส และลิกนิน จากนั้นคาร์บอนในพืชจะเข้าสู่แหล่งสะสมอินทรีย์คาร์บอนในดินโดยเศษซากพืช รากพืช และสารที่ซึมออกมาจากรากพืช หรือย่อยสลายโดยสัตว์ต่างๆ สารที่ได้จากการที่สัตว์ย่อยสลายขนาดของเศษซากพืชที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ส่วนมากจะเกิดขึ้นใกล้กับผิวดิน ดังนั้นคาร์บอนจึงมีการสะสม ในดินได้ง่ายและจะสูญเสียได้ง่ายเช่นเดียวกันถ้าเกิดการกัดกร่อนดินหรือมีการไถพรวนอย่างรุนแรงเพิ่มขึ้น ในบางครั้งคาร์บอนและธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (Essential elements) ได้กลายเป็นแหล่งอาหารของสัตว์ที่อาศัยอยู่ในดิน รวมถึงแบคทีเรีย เชื้อรา และสัตว์ที่อาศัยอยู่ในดิน (Follent, 2001)

2. การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินกับอินทรีย์คาร์บอนในดิน

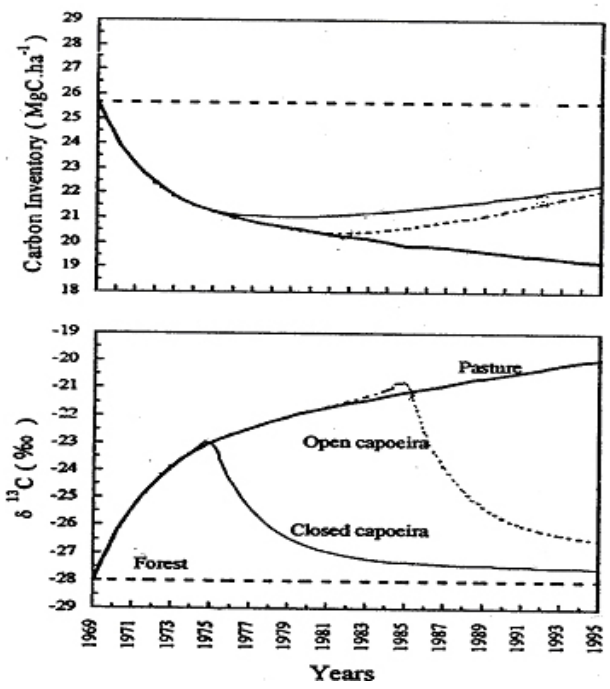
อินทรีย์คาร์บอนในดินบนมีการเปลี่ยนแปลงจากปริมาณมากแล้วลดน้อยลงหลังจากมีการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปริมาณคาร์บอนในดินที่ลดลงเกิดจากการปฏิบัติในทางตรงข้ามกับการเพิ่มคาร์บอนในดิน

---

[2] เพนตากรัมคาร์บอน (Pg C) = 10^{15} กรัมคาร์บอน

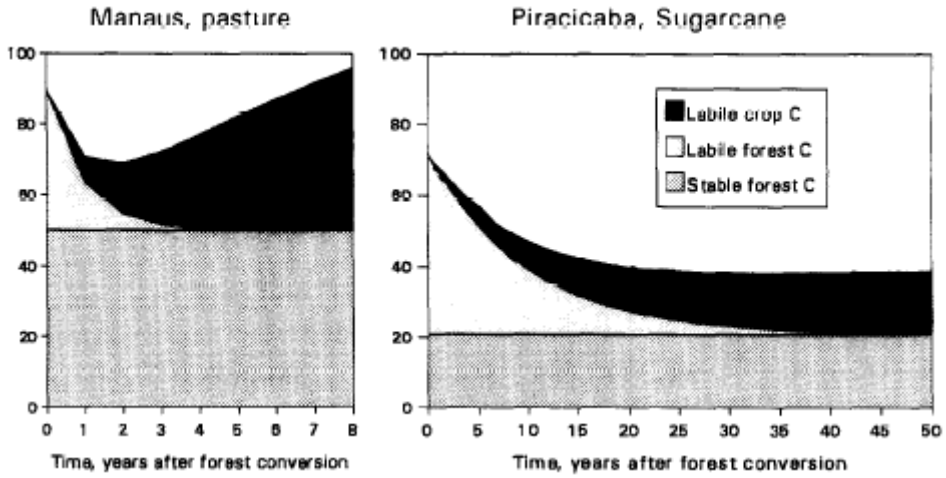
คาร์บอนในดินเกษตรกรรมโดยทั่วไปลดลงประมาณร้อยละ 20 ถึง 50 เมื่อเทียบกับสภาพเดิม เท่าที่ผ่านมา ผลผลิตที่ต่ำ การเก็บเกี่ยว การเคลื่อนย้ายซากพืช การเตรียมพื้นที่อย่างเข้มข้นและการเตรียมดินโดยไม่เพาะปลูกเป็นเหตุที่นำไปสู่การลดลงของปริมาณคาร์บอนในดิน ในทำนองเดียวกันการจัดการที่ไม่ถูกต้องเป็นสาเหตุสำคัญของการลดลงของคาร์บอนในดินอย่างถาวรต่อประสิทธิภาพในการผลิตป่าไม้ ทุ่งหญ้า พื้นที่เกษตรกรรม การระบายน้ำออกจากพื้นที่ชุ่มน้ำแล้วใช้เป็นพื้นที่เพาะปลูก ทุ่งหญ้าหรือป่าไม้ ทำให้มีการย่อยสลายอย่างรวดเร็วสูญเสียอินทรีย์คาร์บอนจากดินด้านล่างที่มีคาร์บอนในปริมาณมาก ความเค็มที่เพิ่มขึ้นของดิน ความเป็นกรด การสูญเสียน้ำ ตลอดจนความเสื่อมสภาพอื่นๆ ของดิน มีผลทางลบต่อคาร์บอนในดิน การรบกวนสิ่งคลุมดินโดยมนุษย์ทำให้เกิดการสูญเสียหน้าดินโดยลม และน้ำในอัตราที่รวดเร็วกว่าอัตราการเกิดของดิน ซึ่งส่งผลเสียอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการผลิต รวมทั้งคุณภาพน้ำ อากาศ และการพังทลายของดิน ทำให้ดินส่วนที่สมบูรณ์ด้วยสารอินทรีย์ไปอยู่ผิดที่ โดยลดปริมาณคาร์บอนของดินในบางพื้นที่ การพังทลายของดินอาจกระตุ้นการย่อยสลายด้วยสาเหตุจากการแยกส่วน และการใส่สารอินทรีย์เพื่อคุ้มครองผลของการเสื่อมสภาพต่อผลผลิตส่งผลไปถึงสมดุลคาร์บอนในดิน ส่วนที่ชะล้างบางส่วนจะไปอยู่ในพื้นที่ต่ำ และส่วนน้อยจะไหลลงสู่ทะเล การถูกฝังในสภาพขาดอากาศอาจลดการย่อยสลายของสารย่อยสลายที่อยู่เป็นการเพิ่มการดูดซับคาร์บอน คาร์บอนที่สูญเสียจากพื้นที่เกษตรเป็นผลจากการชะล้างของดิน การนำดินที่ไถพรวนไปไว้ในที่ไม่เหมาะสม การทำแร่ในอัตราที่รวดเร็ว การควบคุมการชะล้างและพังทลายของดินจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการรักษาและเพิ่มปริมาณคาร์บอนในดิน (คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, 2545)

การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินมีผลกระทบต่ออินทรีย์คาร์บอนในดินอย่างมาก โดยทั่วไปเมื่อป่าถูกบุกเบิกมาเป็นพื้นที่เกษตร อินทรีย์คาร์บอนในดินส่วนใหญ่จะลดลงอย่างรวดเร็วถ้าอยู่ภายใต้การจัดการดินที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการปลูกพืชแบบผิวถางในดินบนที่ดอน Van Noordwijk et al. (1997) รายงานว่า เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่อยู่ในดินภายใต้การใช้ที่ดินที่ต่างกันจะมีค่าแตกต่างกันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนในป่าพรุ ป่าทั่วไป ป่าที่รื้อฟื้นใหม่ ตลอดจนแปลงไม้ผลการเกษตรและพืชไม้พุ่ม เป็นต้น การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินนั้นมีตัวอย่างที่ทำการศึกษาโดย De Camargo et al. (1999) เปรียบเทียบระหว่างป่าในเขตคาโปเอียร่า(Capoeira) ที่ถูกทำลายในประเทศบราซิล เมื่อถูกเปลี่ยนมาเป็นทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ และเมื่อถูกปรับปรุงและพัฒนาให้มาเป็นป่าฟื้นฟู (Secondary forest) ทั้งระบบปิดและระบบเปิด พบว่าในช่วง 10 ปี แรกของการบุกรุกป่าอินทรีย์คาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อถูกปรับปรุงและพัฒนา ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนปรับเพิ่มขึ้นมาเกือบเหมือนเดิมภายใน 7 – 8 ปี ทั้งระบบปิดและระบบเปิด อย่างไรก็ตามถ้ายังปล่อยเป็นสภาพทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์แบบทั่วไปนั้น อินทรีย์คาร์บอนยังคงลดลงจนเข้าใกล้จุดสมดุลคงที่ที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเวลาเกือบ 30 ปี (ภาพที่ 1) และเมื่อศึกษาค่าเดลต้าคาร์บอน-13 พบว่าสอดคล้องกับสภาพการใช้ที่ดิน กล่าวคือ ค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ของดินในป่าเดิมมีค่า – 28 เปอร์มิล (พืชป่าหรือไม้ยืนต้น) เปลี่ยนเพิ่มขึ้นเป็น – 20 เปอร์มิล ในดินทุ่งหญ้าซึ่งเป็นค่าประมาณของพืชประเภททุ่งหญ้า และเมื่อวิเคราะห์ในดินของป่าที่ฟื้นตัวกลับมาใหม่พบว่าดินมีค่าเดลต้าคาร์บอน-13 เท่ากับ – 27 เปอร์มิล ซึ่งเป็นการยืนยันว่า การศึกษาไอโซโทปเทคนิคสามารถอธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่มีต่ออินทรีย์คาร์บอนในดินได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 1 กราฟการเปลี่ยนแปลงของ (1) ปริมาณคาร์บอน (2) ค่า เดลต้าคาร์บอน-13 ของอินทรียวัตถุในดิน ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร โดยใช้โมเดลแสดงการเปลี่ยนแปลงของป่า (เส้นประหนา) ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์(เส้นดำหนา) ป่าฟื้นฟูคาโปเอียร่า (Capoeira) ระบบเปิด (เส้นประเล็ก) และ ป่าฟื้นฟูคาโปเอียร่า ระบบปิด (เส้นดำเล็ก) (De Camargo et al., 1999)

มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนหลังจากป่าบุกรุกในพื้นที่ป่าเขตร้อนของเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซียโดย Cerri and Andreux (1990) ซึ่งรายงานว่า การเปลี่ยนแปลงจากป่าไปเป็นทุ่งหญ้าภายใต้การจัดการของดินอย่างดีเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนไปเป็นอ้อย พบว่า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินภายใต้การปลูกอ้อยลดลงอย่างมากจนถึงจุดสมดุลย์คงที่ระยะเวลา 40 ปี ในขณะที่แปลงทุ่งหญ้าลดลงในช่วงแรกหลังจากป่าถูกบุกเบิกแต่ใช้เวลาเพียง 8 ปี อินทรียวัตถุฟื้นกลับมาเท่าในระดับเดิม และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของอินทรียวัตถุภายใต้การจัดการที่แตกต่างกันทั้ง 2 แปลง พบว่า อินทรีย์คาร์บอนในแปลงทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์มีสัดส่วนที่ลงมากกว่าแปลงปลูกอ้อยถึง 2 เท่า (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 ปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนในดินและสัดส่วนของคาร์บอนที่สลายตัวยากและง่ายของพืชป่าและพืชเกษตรหลังการเปลี่ยนแปลงจากป่าไปเป็นทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์และอ้อยโดยสมาการถดถอย(Fitted regression) models (Cerri and Andreux, 1990)

3. การใช้ไอโซโทปคาร์บอน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนในดิน

ธาตุคาร์บอนที่เป็นค่าคงที่เสถียรตัวในโลกมีอยู่ 2 ชนิด คือ คาร์บอนปกติ (^{12}C) และไอโซโทปคาร์บอน (^{13}C) ซึ่งพบอยู่เป็นสัดส่วน 98.982 เปอร์เซ็นต์ และ 1.108 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Walker et al., 1989) และค่าสัดส่วนของ คาร์บอนปกติ และ ไอโซโทปคาร์บอน นั้นมีค่าเฉพาะตัวตามลักษณะของอินทรีย์สารนั้นๆ ในแหล่งต่างๆ ตามธรรมชาติ เช่น ดิน พืช เป็นต้น โดยทั่วไปอินทรีย์คาร์บอนที่ผสมรวมอยู่ในดินส่วนใหญ่มาจากการสลายตัวของพืช 2 กลุ่ม (Craig, 1957) คือ พืชประเภทไม้ยืนต้นหรือป่าไม้ ซึ่งจะมีค่าสัดส่วนไอโซโทปคาร์บอน ต่อ คาร์บอนปกติ ในรูป เดลต้าคาร์บอน-13 ประมาณ -40 เปอร์มิล ถึง -20 เปอร์มิล (Per mil หรือ 1/1,000) และพืชอีกกลุ่มหนึ่งคือพืชเขตร้อน อาทิเช่น ข้าวโพด อ้อย เป็นต้น จะมีค่า เดลต้าคาร์บอน-13 ในช่วง -17 เปอร์มิล ถึง -9 เปอร์มิล ความแตกต่างโดยเฉพาะของพืช 2 กลุ่มนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถนำมาใช้แยกแยะสัดส่วนของอินทรีย์คาร์บอนในดินที่มาจากการสลายตัวของพืช 2 กลุ่ม ในการอธิบายการหมุนเวียนของอินทรีย์คาร์บอนในดิน (Staddon, 2004) นอกจากนี้อาจจะนำไปใช้ในแหล่งอื่นๆ ที่อินทรีย์คาร์บอนไปเป็นองค์ประกอบ เช่น ในวัฏจักรห่วงโซ่อาหาร เป็นต้น การใช้เทคนิคไอโซโทปคาร์บอนที่เสถียรตัว (Stable ^{13}C) นี้สามารถอธิบายในการศึกษาพลวัตรของคาร์บอนในดินได้เป็นอย่างดีตลอดจนศึกษาถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนตามช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้ที่ดินได้เช่นเดียวกัน ทำให้เข้าใจถึงกลไกของวัฏจักรคาร์บอนในแหล่งเก็บกักต่างๆในโลก อย่างไรก็ตามเทคนิคการใช้ไอโซโทปที่เสถียรตัวไม่ได้มีแค่ไอโซโทปคาร์บอนอย่างเดียวยังมีธาตุอื่นๆ ที่ใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน อาทิเช่น ไอโซโทปไฮโดรเจน (^{2}H) ไอโซโทปไนโตรเจน(^{15}N) และไอโซโทปออกซิเจน (^{18}O) เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามค่าไอโซโทปต่างๆ เหล่านี้จะผันแปรไปตามขบวนการทางวิทยาศาสตร์กายภาพและเคมี ภายใต้สิ่งแวดล้อมนั้นๆ (Blair et al., 1985; Galimov, 1985)

ตารางที่ 1 ค่าน้ำหนักของอะตอม (Atomic Weight) และ สัดส่วนที่พบในโลกของ ไฮโดรเจน (H) คาร์บอน(C) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O)

ธาตุ	ไอโซโทป	น้ำหนักของอะตอม (amu)	สัดส่วนที่พบ (%)
Hydrogen	^{1}H	1.007825	99.985
	^{2}H	2.014102	0.015
Carbon	^{12}C	12.000	98.90
	^{13}C	13.00335	1.10
Nitrogen	^{14}N	14.003047	99.63
	^{15}N	15.000109	0.37
Oxygen	^{16}O	15.994915	99.76
	^{17}O	16.999131	0.04
	^{18}O	17.999160	0.20

อย่างไรก็ตามการศึกษาพื้นที่เสื่อมโทรม เพื่อฟื้นฟูกลับมาเป็นป่าก็สามารถใช้ไอโซโทปเทคนิคได้เช่นกัน (Schedlbauer and Kawanagh, 2008)

วิธีการดำเนินการ

1. พื้นที่ศึกษา

ทำการศึกษาในพื้นที่เกษตรกรในเขตอำเภอท่าตะเกียบ และแปลงทดลองข้าวโพดคัดพันธุ์ของศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยค่าเฉลี่ยของน้ำฝนรายปีมีปริมาณ 1,600 และ 1,240 มิลลิเมตรต่อปีตามลำดับ อุณหภูมิเฉลี่ย 28.2-27.9 องศาเซลเซียส ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 100-140 เมตร ข้อมูลการใช้ที่ดินในพื้นที่ทดลองได้มาจากการสอบถามประวัติการใช้พื้นที่จากเกษตรกรและทำการวิเคราะห์แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายดาวเทียม ใน พ.ศ. 2532 พ.ศ. 2539 และ พ.ศ.2545 เพื่อนำมายืนยันความถูกต้องของข้อมูลประวัติการใช้ที่ดิน

ภาพที่ 3 แปลงศึกษาการปลูกข้าวโพดหลังจากป่าถูกบุกเบิกในพื้นที่อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา

2 แปลงทดลองศึกษา

2.1 อำเภอท่าตะเกียบ

ทำการคัดเลือกพื้นที่ศึกษาในพื้นที่เกษตรกรในเขตอำเภอท่าตะเกียบ เป็น 4 แปลง ตามสภาพการใช้ที่ดินโดยการสอบถามประวัติพื้นที่ เพื่อนำมาใช้ศึกษาแบบวิธีการต่อเนื่องของเวลา (Chronosequence study) ประกอบด้วย

(1) แปลงป่าธรรมชาติ (NFT) เป็นพื้นที่ป่าธรรมชาติโดยมีพิกัด UTM ที่ 47PQR 801203m.E, 1495709 m.N พื้นที่เป็นป่าประเภทป่าดิบแล้ง มีต้นไม้หลัก อาทิเช่น ตะแบก *(Lagerstroemia floribunda Jack.)* เป็นต้น

(2) แปลงปลูกข้าวโพดเป็นระยะเวลา 3 ปี หลังจากป่าถูกบุกเบิก (AG3) มีพิกัดทางภูมิศาสตร์ UTM ที่ 800765 m.E, 149567 m.N มีพื้นที่ประมาณ 10 ไร่ โดยพื้นที่ทำการปลูกข้าวโพดตั้งแต่ พ.ศ.2545 หลังถูก

บุกรุกและเริ่มเก็บตัวอย่างดินใน พ.ศ.2548 พ.ศ.2549 และ พ.ศ.2550 ตามลำดับของจำนวนปีหลังจากป่าถูกบุกรุกที่ 3 4 และ 5 ปี (AG3)[3]

(3) แปลงปลูกข้าวโพดระยะเวลา 7 ปี หลังจากป่าถูกบุกเบิก ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างต่อเนื่องอีก 3 ปี เช่นเดียวกันใน 7 8 และ 9 ปีตามลำดับ (AG7)[3]

(4) แปลงปลูกข้าวโพดระยะเวลา 10 ปี หลังป่าถูกบุกเบิกและทำการเก็บตัวอย่างที่ 10 11 และ 12 ปี ตามลำดับเช่นเดียวกัน (AG10)[3]

โดยแต่ละแปลงศึกษามีระยะห่างกันในช่วง 100 – 150 เมตร (ภาพที่ 4)

2.2 ศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน

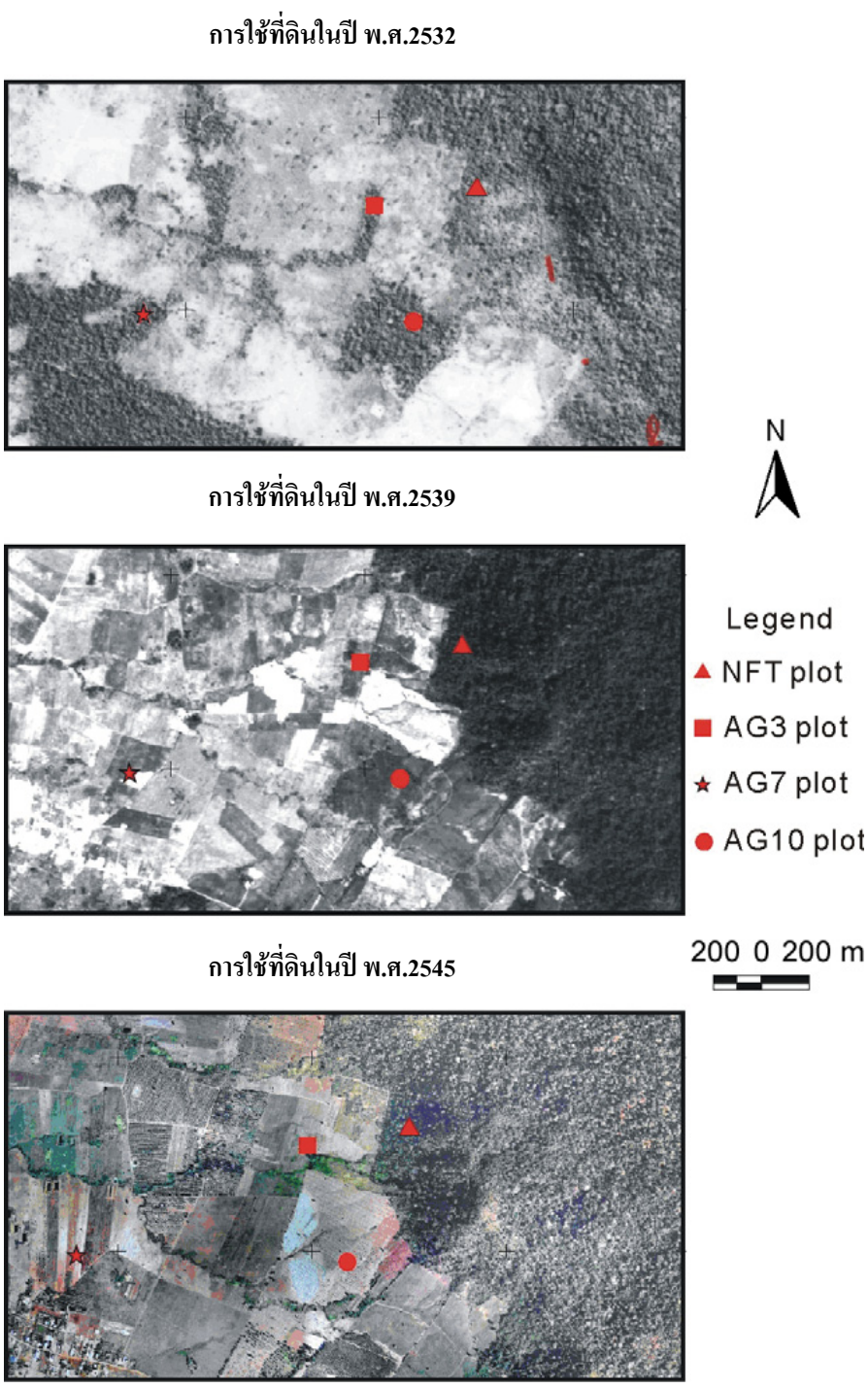
สมการการสลายแบบเอกโพเนนเชียล ที่ได้จากการศึกษาในพื้นที่อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ศึกษาในพื้นที่ศูนย์ศึกษาพัฒนาเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนภายใต้การจัดการที่เข้มข้น (Intensive soil management) และการจัดการแบบทั่วไป (Conventional soil management) ในดิน หลังจากป่าถูกบุกรุกใน พ.ศ. 2510 และก่อตั้งศูนย์ฯใน พ.ศ. 2522 จนถึง พ.ศ. 2550

3. การจัดการดิน

การจัดการดินสำหรับปลูกข้าวโพดของเกษตรในแปลงอำเภอท่าตะเกียบในช่วง 3 ปีแรกหลังการจากบุกเบิกป่าแล้วปลูกข้าวโพดเกษตรกรจะไม่ใส่ปุ๋ยใดๆทั้งสิ้นเมื่อเริ่มปีที่ 4 เกษตรกรจึงเริ่มใส่ปุ๋ยหลังจากนั้น ส่วนใหญ่ใส่ปุ๋ยเคมี 16-20-0 ในอัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองพื้นและใส่ปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 อีกครั้ง เมื่อข้าวโพดอายุประมาณ 30 วัน ในอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ และเริ่มปลูกประมาณเดือนมิถุนายนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการเริ่มตกของฝนเป็นสำคัญ และจะเก็บเกี่ยวในช่วงประมาณเดือนกันยายน โดยหลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าวโพดแล้วจะทำการทิ้งซากข้าวโพดไว้ จนกระทั่งถึงฤดูกาลปลูกใหม่จึงจะทำการเผาตอซังข้าวโพดแล้วทำการเตรียมดินในฤดูปลูกใหม่

---

[3] (AG3) หมายถึงแปลงทดลองที่ปลูกพืชข้าวโพดมา 3 ปีหลังจากป่าถูกทำลายและศึกษาต่อเนื่อง ปีที่ 4และ 5
(AG7) หมายถึงแปลงทดลองที่ปลูกพืชข้าวโพดมา 7 ปีหลังจากป่าถูกทำลายและศึกษาต่อเนื่อง ปีที่ 8และ 9
(AG10) หมายถึงแปลงทดลองที่ปลูกพืชข้าวโพดมา10 ปีหลังจากป่าถูกทำลายและศึกษาต่อเนื่องปีที่ 11และ 12



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายดาวเทียมของ พ.ศ.2532 (1989), พ.ศ.2539 (1996) และ พ.ศ.2545 (2002) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ในแปลงป่าไม้ (NFT), ข้าวโพด 3 ปี (AG3), 7 ปี (AG7) และ 10 ปี (AG10)

4. การเก็บตัวอย่างดินและการวิเคราะห์

ทำการสำรวจและจำแนกดินในแปลงศึกษาโดย คณะอนุกรมวิธานดินสหรัฐอเมริกา (Soil Survey Staff, 1990) ตัวอย่างดินจะถูกสุ่มมา 5 จุด ในแต่ละแปลงศึกษาเพื่อหาค่าความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk density) ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร. และ 45 เซนติเมตร โดย Steel core 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร (Blake, 1965) การศึกษาทางเคมีของดิน จะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดิน 5 จุด โดยวิธีการสุ่มรวม (Composite sample) จาก 3 จุด ซ้ำผสมกันในแต่ละจุดของแต่ละแปลง ตัวอย่างดินจะถูกเก็บในทุกระดับ 10 เซนติเมตร ในความลึก 1 เมตร ก่อนการเตรียมดินเพื่อปลูกข้าวโพดเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์คาร์บอน ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส โปแตสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้และลักษณะเนื้อดิน โดยตัวอย่างดินทั้งหมดจะถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และร่อนผ่านตะแกรง 2 mesh sieve อินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (CHONS analyzer), รุ่น Flash EA 1112 series ด้วย เครื่องตรวจวัดโดยเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal conductivity detector-TCD detector (ก๊าซพา(Carrier gas), ฮีเลี่ยม (Helium) : อัตราการไหล (flow rate) = 130 ml mm^{-1} อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส : อุณหภูมิในท่อ (Column) 50 องศาเซลเซียส) การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน(pH) โดยวิธีดินต่อน้ำ (1:1) ค่าโปแตสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จะถูกสกัดด้วยแอมโมเนียมอะซิเตท 1 M(NH_4OAC) ที่ pH 7 (Jackson, 1958) สำหรับค่าความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส จะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี Bray II (Bray and Kurty, 1945)

5. การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนจากพืชกลุ่มป่าไม้และไม้ยืนต้น (C3) และ กลุ่มพืชเขตร้อน (C4) ในดิน

ตัวอย่างดินและพืชจะถูกแยกมาเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าสัดส่วนของ ไอโซโทปคาร์บอน ต่อ คาร์บอนปกติ (เดลต้าคาร์บอน-13, $\delta^{13}C$) การวิเคราะห์หา เดลต้าคาร์บอน-13 จะใช้เครื่องวิเคราะห์หามวลน้ำหนักธาตุ (Mass spectrometer analyzer) มีหน่วยเป็นเปอร์มิล (Per mil -‰) หรือหนึ่งส่วนในพันส่วน ดังสมการที่ (1)

$$\delta^{13}C = [(R_{sample} - S_{standard})/ R_{standard}]*100 \quad (1)$$

โดยที่ R_{sample} = ค่าสัดส่วนของ ไอโซโทปคาร์บอน ต่อ คาร์บอนปกติ ในตัวอย่างดินและพืช

$R_{standard}$ = ค่าสัดส่วนของ ไอโซโทปคาร์บอน ต่อ คาร์บอนปกติ ของค่าตัวอย่างมาตรฐานของอินทรีย์คาร์บอน (ค่าคาร์บอนมาตรฐานจากหอย *Belemnitella americana* จากยุค ครีเทเชียส (Cretaceous) ของ Pee Dee formation[4]; ค่ามาตรฐาน RPDB = 0.0112372) (Craig, 1957)

ในการศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอนที่ผสมอยู่ในดินโดยใช้ค่า เดลต้าคาร์บอน-13 มาคำนวณในสมการ (1) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนจากแหล่งต้นกำเนิดประเภทพืชกลุ่มป่าไม้และไม้ยืนต้น หรือกลุ่มพืชเขต**ร้อน** (ข้าวโพด-C4) ได้จากการคำนวณในสมการที่ (2) และ (3) ดังต่อไปนี้ (Cerri et al., 1991)

$$C_s = C_{df} \times C_{dc} \quad (2)$$

$$C_s \delta^{13}C_s = (C_{d5} \delta^{13}C_{dg}) + (C_{dc} \delta^{13}C_{dc}) \quad (3)$$

[4] Pee Dee formation อยู่ในพื้นที่เขตหินปูนในรัฐคาโรไลนาตอนใต้ของสหรัฐอเมริกา

โดยที่ C_s คือ ค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมทั้งหมดในดิน

C_{df} คือ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนจากป่าไม้

C_{dc} คือ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนจากพืชข้าวโพด

$\delta^{13}C_{ds}$ คือ ค่าสัดส่วนของ $^{13}C/^{12}C$ จากตัวอย่างดินรวมในแปลงที่ศึกษา

$\delta^{13}C_{df}$ คือ ค่าสัดส่วนของ $^{13}C/^{12}C$ จากตัวอย่างพืชป่าไม้ในแปลงศึกษา

$\delta^{13}C_{dc}$ คือ ค่าสัดส่วนของ $^{13}C/^{12}C$ จากพืชข้าวโพดในแปลงศึกษา

อย่างไงก็ตามการศึกษาถึงองค์ประกอบของอินทรีย์คาร์บอนในแง่ของการย่อยสลายของอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายยากและง่าย ได้ถูกศึกษาเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนในดินตามการต่อเนื่องของเวลา ตามสมการที่ (4) และ (5) (Bernoux et al., 1998)

$$C_{df,t} = C_{dfs} + C_{dfl,t=0}\, e^{(-kft)} \qquad (4)$$

$$C_{dc,t} = C_{dc}\,(1-e^{(-kc,t)} \qquad 5)$$

โดยที่ $C_{df,t}$ คือ ปริมาณอินทร์คาร์บอนที่สลายตัวมาจากป่าไม้ในช่วงเวลาที่ศึกษา(t)

$C_{dc,t}$ คือ ปริมาณอินทร์คาร์บอนที่สลายตัวมาจากข้าวโพดในช่วงเวลาที่ศึกษา(t)

C_{dfs} คือ ปริมาณอินทร์คาร์บอนที่สลายตัวมาจากป่าไม้ชนิดสลายตัวยาก (Stable fraction)

C_{dfl} คือ ปริมาณอินทร์คาร์บอนที่สลายตัวมาจากป่าไม้ชนิดสลายตัวง่าย (Labile fraction)

kf คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของพืชป่าไม้

kc คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของพืชข้าวโพด

อินทรีย์คาร์บอนชนิดสลายตัวยากโดยเฉลี่ยจะมีค่าการสลายตัวอยู่ช่วงเวลา 50 – 100 ปี ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้เป็นช่วงเวลาสั้น (12 ปี) จึงถือได้ว่าค่า C_{df} (พืชป่าไม้ชนิดสลายตัวยาก) จึงถือว่าเป็นค่าคงที่ (ไม่มีค่า k) (Jenkinson and Rayner, 1977 ; Cerri et al., 1991) และค่าเวลาของการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอน (Turnover time) ที่ย่อยสลายง่ายจะทำการคำนวณจากค่า 1/kf ในพืชป่าไม้ และ 1/kc ในพืชข้าวโพด (Balesdent et al., 1988)

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ทางสถิติหาความแตกต่างของอินทรียวัตถุในดินจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยการวิเคราะห์หาความแปรปรวน (ANOVA posthoc testing with Fisher's least significant difference: ANOVA – LSD) ที่ P = 0.05 ($P<0.05$)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ลักษณะดิน

การจำแนกดินโดยคณะอนุกรมวิธานดินสหรัฐอเมริกา พบว่า ดินจัดอยู่ใน Subgroups Typic Paleustults - ชุดดินโพนพิสัย, Pp: Aeric Endoaqualfs-ชุดดินนครปฐม, Np: Kanhaphic Haplustults - ชุดดินท่ายาง, Ty และ Typic Paleustults - ชุดดินบ้านจ้อง, Bg ในแปลงป่าไม้, แปลง 3 ปี, แปลง7 ปี และ แปลง10 ปี ตามลำดับ (ตารางที่2) การศึกษาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินในทุกๆ 10 เซนติเมตร ความลึก 1 เมตร ในแต่ละแปลงทดลองพร้อมทั้งสมบัติทางเคมีของดินและเนื้อดิน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนในดินชั้นบนของแปลงป่าไม้ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ กับ แปลงข้าวโพดในปีที่ 7 เป็นต้นไป อย่างไรก็ตามพบว่าในดินชั้นล่างที่ลึกมากกว่า 70 เซนติเมตร ปริมาณอินทรียวัตถุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในทุกแปลงทดลอง สามรถอธิบายได้ว่า ในดินบนมีกิจกรรมของการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนสูง ดังนั้นเมื่อป่าถูกบุกเบิก ดินชั้นบนจะมีการย่อยสลายของอินทรีย์คาร์บอนมากขึ้นทำให้มีการลดลงมากอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ดินชั้นล่างมีการย่อยสลายของอินทรีย์คาร์บอนน้อยน่าจะมาจากสาเหตุจากการมีกิจกรรมการย่อยสลายของอินทรีย์คาร์บอนโดยจุลินทรีย์น้อยในดินชั้นล่าง ประกอบกับดินชั้นล่างส่วนใหญ่พบว่าจะเป็นอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายยาก เมื่อเทียบกับดินชั้นบนที่มีอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายง่ายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมของความลึกตลอด 1 เมตร พบว่ามีค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนลดลงจากแปลงป่าไม้ 1062.4 ตันคาร์บอนต่อไร่ เป็น 857.1, 680.7 และ 559.7 ตันคาร์บอนต่อไร่ ในแปลงข้าวโพด 3 ปี, 7 ปี และ 10 ปี ตามลำดับ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแปลง ป่าไม้, แปลง 3ปี และ แปลง 7ปี ตามลำดับ (ตารางที่3)

ตารางที่ 2 การจำแนกดิน และความหนาแน่นรวมของดินในแปลงศึกษา

แปลง	การจำแนกดิน (กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา)	ชั้น	ความลึก (เซนติเมตร)	ความหนาแน่นรวมของดิน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
NFT	Kaolinitic,	A_1	0-17	1.39±0.06[1]
	Typic Paleustults	BA	17-40	
	ชุดดินโพนพิสัย, Pp	Bt_1	40-75	1.60± 0.04
		Bt_2	75-100	
AG3	Mixed,	A_p	0-16	1.61± 0.07
	Aeric Endoaqualfs	Bt_{g1}	16-28	
	ชุดดินนครปฐม, Np	Bt_{g2}	28-54	1.80± 0.05
		Bt_{g3}	54-75	
AG7	Silicious,	A_1	0-12	1.67± 0.03
	Kanhaphic Haplustults	Bt_1	12-32	
	ชุดดินท่ายาง, Ty	Bt_2	32-60	1.84± 0.04
AG10	Kaolinitic,	A_p	0-11	1.62± 0.04
	Typic Paleustults	AB	11-25	
	ชุดดินบ้านจ้อง, Bg	Bt_1	25-62	1.70± 0.03
		Bt_2	62-100	

[1] ความหนาแน่นรวมของดิน ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (คำนวณจาก 5 ซ้ำในแต่ละแปลงศึกษา)

ตารางที่ 3 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และสมบัติของดินบางประการในแต่ละ 10 เซนติเมตร ที่ความลึก 1 เมตร (± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ความลึก	แปลง	อินทรีย์คาร์บอน	OC	Total N	Avai. P	Exch. K	pH	Texture[2]
ซม.		ตันคาร์บอนต่อไร่	%	%	ppm	ppm		
0-10	NFT	377.38(±25.63)a[1)]	3.83(±1.60)	0.39	32.91	153.40	7.0	SL
	AG3	339.94(±11.50) a	3.26(±1.10)	0.22	73.82	59.77	7.2	L
	AG7	164.19(±18.57) b	1.57(±0.18)	0.12	14.75	34.86	6.0	CL
	AG10	189.63(±8.38) b	1.82(±0.80)	0.20	14.08	34.86	6.6	CL
10-20	NFT	164.69(±7.00) a	1.75(±0.20)	0.19	9.70	59.77	6.3	L
	AG3	123.63(±43.75) a	1.14(±0.40)	0.11	17.82	37.85	7.1	SL
	AG7	150.31(±1.07) a	1.39(±0.01)	0.12	12.95	38.85	6.1	CL
	AG10	79.31(±18.63) b	0.73(±0.17)	0.08	11.71	39.84	7.1	C
20-30	NFT	116.69(±10.44) a	1.38(±0.23)	0.12	11.33	28.89	6.1	SCL
	AG3	111.56(±23.69) a	1.02(±0.22)	0.09	13.55	27.89	7.0	SC
	AG7	101.38(±5.07) a	0.93(±0.05)	0.08	10.57	36.96	6.4	CL
	AG10	68.56(±17.50) b	0.63(±0.16)	0.05	10.93	29.88	6.6	C
30-40	NFT	85.13(±11.69) a	0.94(±0.20)	0.10	10.16	24.90	5.8	SCL
	AG3	96.25(±24.19) a	0.91(±0.23)	0.07	10.70	30.88	6.9	C
	AG7	69.75(±2.44) ab	0.66(±0.02)	0.07	10.75	37.85	6.3	L
	AG10	51.69(±15.13) b	0.49(±0.14)	0.04	9.85	22.91	6.5	C
40-50	NFT	79.81(±13.13) a	0.76(±0.12)	0.06	11.51	23.91	6.1	C
	AG3	46.75(±6.38) b	0.44(±0.06)	0.04	8.77	20.92	6.6	C
	AG7	67.44(±14.32) b	0.63(±0.19)	0.03	7.18	37.85	5.7	SCL
	AG10	37.88(±5.44) b	0.36(±0.05)	0.03	9.66	39.84	6.5	C
50-60	NFT	73.38(±17.19) a	0.90(±0.77)	0.05	9.44	33.87	6.1	C
	AG3	23.38(±5.44) b	0.20(±0.05)	0.04	12.38	10.96	6.6	SCL
	AG7	37.94(±2.32) b	0.33(±0.02)	0.03	9.10	40.84	5.8	SCL
	AG10	36.81(±19.63) b	0.32(±0.17)	0.01	6.86	35.86	6.5	C
60-70	NFT	50.19(±10.19) a	0.39(±0.11)	0.04	8.49	28.89	5.7	C
	AG3	34.13(±4.07) b	0.30(±0.04)	0.10	10.87	10.96	6.5	CL
	AG7	23.00(±2.00) b	0.20(±0.02)	0.05	6.91	35.86	6.1	CL
	AG10	27.63(±11.38) b	0.24(±0.10)	0.01	6.66	37.85	6.5	C
70-80	NFT	37.94(±6.88) a	0.36(±0.03)	0.02	8.38	31.88	6.1	C
	AG3	33.31(±7.38) a	0.29(±0.06)	0.04	14.78	11.95	6.3	SCL
	AG7	30.63(±1.75) a	0.26(±0.02)	0.04	8.59	37.85	6.1	C
	AG10	25.19(±21.82) a	0.22(±0.19)	0.01	7.31	49.81	6.3	C
80-90	NFT	41.31(±6.07) a	0.33(±0.05)	0.04	7.30	29.88	6.1	C
	AG3	35.25(±5.75)ab	0.30(±0.05)	0.04	2.0	9.96	6.3	SCL
	AG7	20.56(±6.38) b	0.18(±0.06)	0.02	3.00	40.84	6.0	C
	AG10	20.13(±15.82) b	0.17(±0.14)	0.01	2.00	36.86	6.2	C

ความลึก	แปลง	อินทรีย์คาร์บอน	OC	Total N	Avai. P	Exch. K	pH	Texture[2]
90-100	NFT	35.88(±8.13) b	0.23(±0.02)	0.05	7.17	33.87	6.3	C
	AG3	12.81(±5.07) b	0.11(±0.04)	0.03	2.0	9.96	6.6	SL
	AG7	15.50(±1.32) b	0.13(±0.01)	0.01	2.00	31.88	6.0	C
	AG10	22.88(±8.88) b	0.20(±0.08)	0.01	2.00	37.85	6.0	C
รวม	NFT	1,062.38 a						
	AG3	857.07 b						
	AG7	680.69 c						
	AG10	559.69 c						

ตารางที่ 3 (ต่อ) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และสมบัติของดินบางประการในแต่ละ 10 เซนติเมตร ที่ความลึก 1 เมตร (± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

หมายเหตุ: [1)] ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

[2)] Sl = Sandy loam, L = Loam, CL = Clay loam, SCL = Sandy clay loam, SC = Sandy clay, C = Clay

ภาพที่ 5 รูปหน้าตัดดินของแปลงป่าดั่งเดิม ในอำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา

2. ไอโซโทปของอินทรีย์คาร์บอน

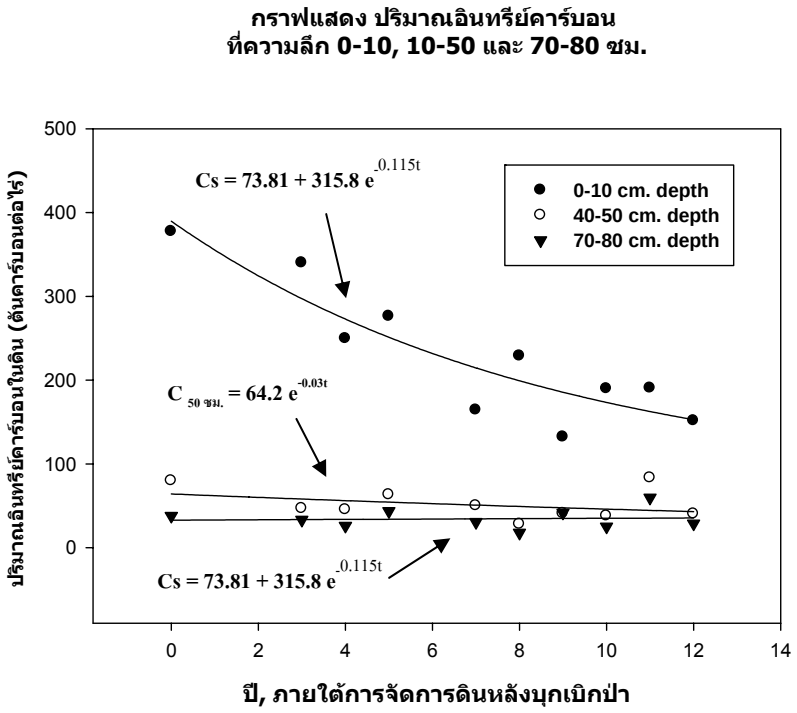
ค่าสัดส่วนโซโทปคาร์บอนที่เสถียรตัว หรือค่าเดลต้าคาร์บอน-13 สามารถนำไปหาปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวมาจากพืชป่าไม้ และพืชข้าวโพด สามารถนำไปหาความสัมพันธ์ของอินทรีย์คาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงหลังป่าไม้ถูกบุกเบิก โดยวิธีการการศึกษาแบบต่อเนื่องของระยะเวลา ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ทราบอัตราการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอน และระยะเวลาของการฟื้นตัวกลับ (Turnover time) ของอินทรีย์คาร์บอน จากผลการศึกษาพบว่า ค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ของแปลงป่าในชั้นผิวดินมีค่า -26.9 เปอร์มิล ในดินระดับ 0–10 เซนติเมตร และมีค่า -26.1,-23.8 และ -25.8 เปอร์มิล ในดิน แปลง AG3, AG7 และ AG10 ตามลำดับ เหตุผลของการเพิ่มขึ้นของค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ของดินแปลงข้าวโพดเมื่อเทียบกับแปลงป่าไม้อธิบายได้ว่าดินในแปลงข้าวโพดมีการผสมของเศษซากพืชจากข้าวโพดลงไปในดิน ซึ่งค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ของพืชข้าวโพดในการศึกษามีค่าเท่ากับ -10.8 เปอร์มิล เมื่อผสมลงไปหลังจากดินถูกบุกเบิก ทำให้ค่าของดินที่เปลี่ยนไปเป็นข้าวโพดมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น -23.8 เปอร์มิล ในแปลงข้าวโพด AG7 ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Cerri (1986) และ Balesdent et al. (1987) ทำการทดลองในประเทศบราซิล โดยอธิบายว่า ค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ของดินในป่า จะมีค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ต่ำกว่าดินในแปลงเกษตรที่มีพืชกลุ่มเขตร้อนที่ปลูกอยู่ อาทิเช่น อ้อย ข้าวโพด เป็นต้น เพราะเหตุผลว่าพืชเหล่านี้จะมีค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ที่สูงกว่าพืชไม้ป่าหรือไม้ยืนต้น

ตารางที่ 4 ค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ($\delta^{13}C$) ของดินตามระดับความลึกแต่ละ 10 เซนติเมตร ของดินลึก 1 เมตร ในแต่ละแปลง (± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, สุ่มเก็บ 5 ซ้ำในแต่ละแปลง)

แปลง	เดลต้าคาร์บอน-13 (เปอร์มิล , ‰) ของดินตามระดับความลึก (เซนติเมตร)									
(ปี)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
NFT	-26.9 (±0.1)	-26.1 (±0.1)	-26.1 (±0.2)	-25.6 (±0.2)	-25.6 (±0.1)	-25.1 (±0.2)	-25.0 (±0.2)	-25.5 (±0.3)	-26.1 (±0.2)	-25.8 (±0.3)
3	-26.1 (±0.1)	-26.0 (±0.1)	-25.8 (±0.1)	-26.0 (±0.1)	-26.6 (±0.2)	-26.6 (±0.3)	-	-	-26.5 (±0.1)	-27.3 (±0.1)
7	-23.8 (±0.2)	-24.9 (±0.1)	-25.7 (±0.3)	-26.2 (±0.4)	-26.4 (±0.4)	-	-24.7 (±0.2)	-26.7 (±0.3)	-26.2 (±0.3)	-26.8 (±0.4)
10	-25.8 (±0.1)	-	-25.3 (±0.4)	-25.2 (±0.3)	-25.4 (±0.3)	-25.8 (±0.4)	-	-25.4 (±0.2)	-25.0 (±0.4)	-24.6 (±0.3)

3. การเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนในดินตามระดับความลึกของดิน

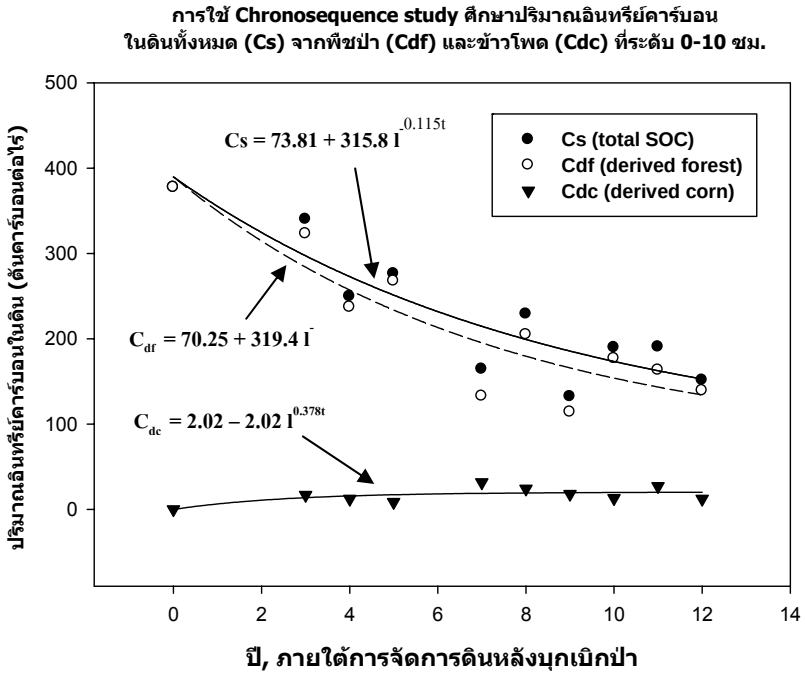
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์คาร์บอนในดินจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากป่ามาเป็นข้าวโพดในดินชั้นบนที่ระดับ 0 – 10 เซนติเมตรโดยดูความสัมพันธ์ตามช่วงเวลาที่เปลี่ยนไปในช่วง 12 ปี พบว่า อินทรีย์คาร์บอนรวมของดิน (C_S) นั้นมีการลดลงอย่างรวดเร็วจาก 377.4 ตันคาร์บอนต่อไร่ ในดินป่า (เริ่มต้นที่ 0 ปี) มาเป็น 189.6 ตันคาร์บอนต่อไร ในปีที่ 12 ของการปลูกข้าวโพด เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยวิธีการตามการต่อเนื่องของเวลา พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นการสลายแบบเอกโพเนนเชียล มีค่า $Cs = 73.81 + 315.8\ e^{-0.115t}$ โดยที่ t หมายถึงเวลาและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.824 โดยมีค่าช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลง (Turnover time) ของอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 8.7ปี และมีอัตราเฉลี่ยการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 43.4 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี (ภาพที่ 6) เมื่อทำการศึกษาในชั้นดินที่ 50 เซนติเมตร พบว่าอินทรีย์คาร์บอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักจาก 0 ปี ถึง 12 ปี หลังจากป่าถูกบุกเบิกและเช่นกันในดินที่ความลึก 80 เซนติเมตร ก็พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนที่น้อยมาก ซึ่งค่าความสัมพันธ์ของอินทรีย์คาร์บอนกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าต่ำมากซึ่งแสดงว่า อินทรีย์คาร์บอนในดินชั้นล่างที่ลึกดังกล่าวแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดนมีความสัมพันธ์ในรูปสมการ $C_{50\ ซม.} = 64.2\ e^{-0.03t}$, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.116 และ $C_{80\ ซม.} = 4{,}620 - 4{,}587\ e^{-0.00005t}$, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.005 ในดินความลึก 50 เซนติเมตรและ 80 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 2.39 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี และช่วงเวลา 33.33 ปี ในดินลึก 50 เซนติเมตร และ 0.002 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี และมากกว่า 100 ปี ในดินที่ระดับ 80 เซนติเมตร จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ในดินชั้นบนมีอินทรีย์คาร์บอนในรูปของการสลายตัวง่าย ทำให้การสลายตัวมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนในขณะที่ในดินชั้นล่างอินทรีย์คาร์บอนจะอยู่ในรูปที่สลายตัวยากเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอัตราการสลายตัวใช้เวลานานมาก 50–100 ปีขึ้นไป ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bernoux et al. (1998) ซึ่งอธิบายว่าในดินชั้นล่างส่วนใหญ่จะเป็นอินทรีย์คาร์บอนประเภทสลายตัวยาก



ภาพที่ 6 ค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาหลังจากป่าถูกบุกเบิก ในระดับความลึกที่ชั้นดิน 0-10, 40-50 และ 70-80 เซนติเมตร

4. สัดส่วนของอินทรีย์คาร์บอนในดินที่มาจากป่าและข้าวโพด

การศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอนในดินที่มาจากป่าหรือข้าวโพดสามารถคำนวณได้จากการใช้ค่าสัดส่วนของไอโซโทปคาร์บอน ต่อ คาร์บอนปกติ ในรูปของเดลต้าคาร์บอน-13 ที่มีหน่วยเป็นเปอร์มิล (หนึ่งต่อหนึ่งพัน) โดยที่ค่า เดลต้าคาร์บอน-13 ในดินต่างกันจะมีค่าเฉพาะที่ต่างกัน เนื่องจากอินทรีย์คาร์บอนนั้นๆ เกิดจากการสลายตัวผุพังของพืชป่า และพืชข้าวโพด ซึ่งให้ค่าเดลต้าคาร์บอน-13 ที่แตกต่างตามสมการที่ (1) (2) (3) และ (4) และเมื่อนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของอินทรีย์คาร์บอนตามความต่อเนื่องของช่วงเวลาที่ศึกษา จะทำให้ทราบปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนรวมของดิน (Total soil carbon- C_s) อินทรีย์คาร์บอนที่มาจากป่า(Carbon derived from forest- C_{df}) และอินทรีย์คาร์บอนที่มาจากข้าวโพดมีเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรในช่วงเวลาที่ศึกษาหลังจากป่าที่ถูกบุกรุก โดยจากการศึกษาในดินบน 0–10 เซนติเมตร พบว่าการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์คาร์บอนที่มาจากป่า มีรูปแบบความสัมพันธ์ในลักษณะการสลายแบบเอกโพเนนเชียล มีสมการ $C_{df} = 70.25 + 319.4\ e^{-0.134t}$ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.833 มีอัตราการลดลงของอินทรีย์คาร์บอน 50.57 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี และมีค่าช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลง 7.46 ปี สำหรับในส่วนของอินทรีย์คาร์บอนที่มาจากการปลูกข้าวโพดหลังจากเปลี่ยนแปลงมาจากป่า พบว่ามีความสัมพันธ์ $C_{dc} = 2.02 - 2.02\ e^{0.378t}$ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.433 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนที่เพิ่มขึ้น 0.74 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี โดยมีช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลง 2.65 ปี เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างอินทรีย์คาร์บอนในส่วนของพืชป่าไม้กับในส่วนของพืชข้าวโพดที่อยู่ในดิน ชี้ให้เห็นชัดว่า หลังจากป่าถูกบุกรุกอินทรีย์คาร์บอนของพืชป่าไม้ได้ลดลงไปอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อินทรีย์คาร์บอนภายใต้การปลูกข้าวโพดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่7)

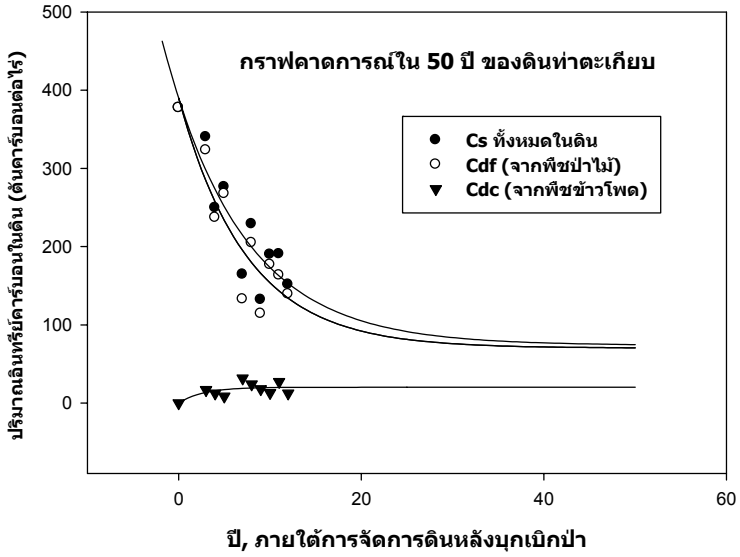


ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมในดิน (Cs), ที่สลายจากป่า (Cdf) และจากข้าวโพด (Cdc) ในช่วงเวลา 12 ปี หลังจากถูกบุกเบิก ในดินที่ระดับ 0-10 เซนติเมตรของแปลงศึกษา

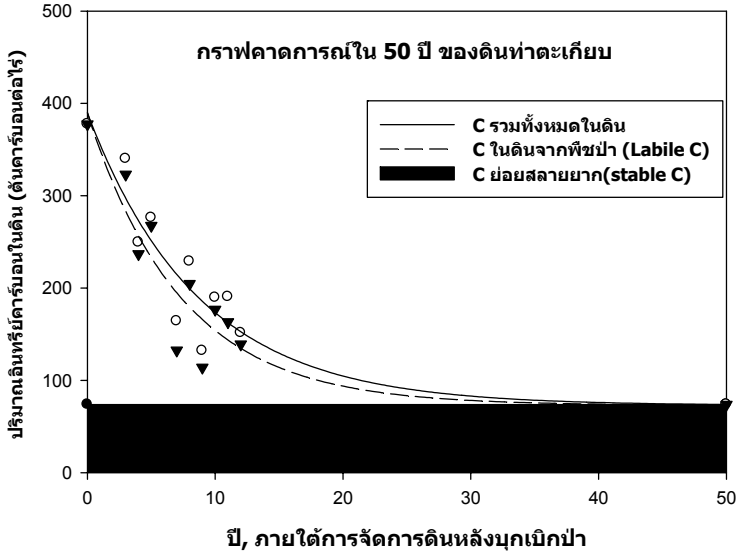
5. การคาดการณ์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน โดยใช้รูปแบบสมการการสลายแบบเอกซ์โพเนนเชียล

จากผลการศึกษาการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนในดินชั้นบน 0–10 เซนติเมตร หลังจากป่าไม้ถูกบุกเบิกเปลี่ยนมาเป็นข้าวโพดในช่วงเวลา 12 ปี และได้สมการซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินตามช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง $C_s = 73.81 + 315.8\ e^{-0.115t}$; ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.824 (ภาพที่ 8)

เมื่อศึกษาถึงช่วงเวลาที่ขยายต่อเป็นเวลานานหลังจากป่าถูกบุกเบิกเวลา 40 ปี พบว่า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนจะเริ่มเข้าในลักษณะคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเวลาเข้าใกล้ 40 ปี ค่าคงที่ในจุดสมดุลนี้อยู่ที่ 73.81 ตันคาร์บอนต่อไร่ อินทรีย์คาร์บอนในดินนี้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกอินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวยาก ซึ่งเป็นแหล่งถูกเก็บกักของอินทรีย์คาร์บอนที่สำคัญของโลกในดิน จากภาพที่ 9 ชี้ให้เห็นว่า อินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวง่ายนี้จะสลายตัวลดลงอย่างรวดเร็วและจะหมดไปหรือเหลือน้อยมากในช่วงเวลาไม่ถึง 40 ปี ถ้ายังคงมีการจัดการดินในรูปแบบเดิมอยู่ อย่างไรก็ตามมีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงการจัดการดินที่ดีจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนในดินอย่างเห็นได้ชัด (Cerri and Andreux, 1990) ซึ่งได้ทำการศึกษาในประเทศบราซิลในพื้นที่หลังจากป่าถูกบุกเบิกแล้วมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินมาเป็นทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์พบว่า ใช้เวลาเพียง 8 ปี อินทรีย์คาร์บอนในดินสามารถเพิ่มกลับมาอยู่ในระดับเดิมที่เคยเป็นป่ามาก่อน แต่เมื่อเปลี่ยนมาเป็นอ้อย ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินยังคงลดลงต่อเนื่องมาเข้าสู่สมดุลคงที่ที่ช่วงเวลา 50 ปี



ภาพที่ 8 กราฟการคาดการณ์โดยใช้สมการการสลายแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยการสมการการถดถอยของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (C_s) อินทรีย์คาร์บอนจากป่า (C_{df}) และ อินทรีย์คาร์บอนจากข้าวโพด (C_{dc}) ในช่วงเวลา 50 ปีข้างหน้า



ภาพที่ 9 ปริมาณสัดส่วนของอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายง่าย (Labile carbon); (เส้นดำประ) และย่อยสลายยาก (Stable carbon); (แถบสีดำ) เปรียบเทียบกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินรวม (เส้นลายดำ) หลังจากการเปลี่ยนจากป่ามาเป็นข้าวโพดในช่วงเวลา 50ปี ของแปลงศึกษา อำเภอท่าตะเกียบ

6. การประยุกต์ใช้สมการในพื้นที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา

สมการการสลายแบบเอกซ์โพเนนเชียล ที่ได้จากการศึกษาในพื้นที่อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ศึกษาในพื้นที่ศูนย์ศึกษาพัฒนาเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยนำข้อมูลผลวิเคราะห์ทางดินจากข้อมูลสมุดประจำแปลงทดลองของศูนย์ฯในแปลงทดลองปลูก

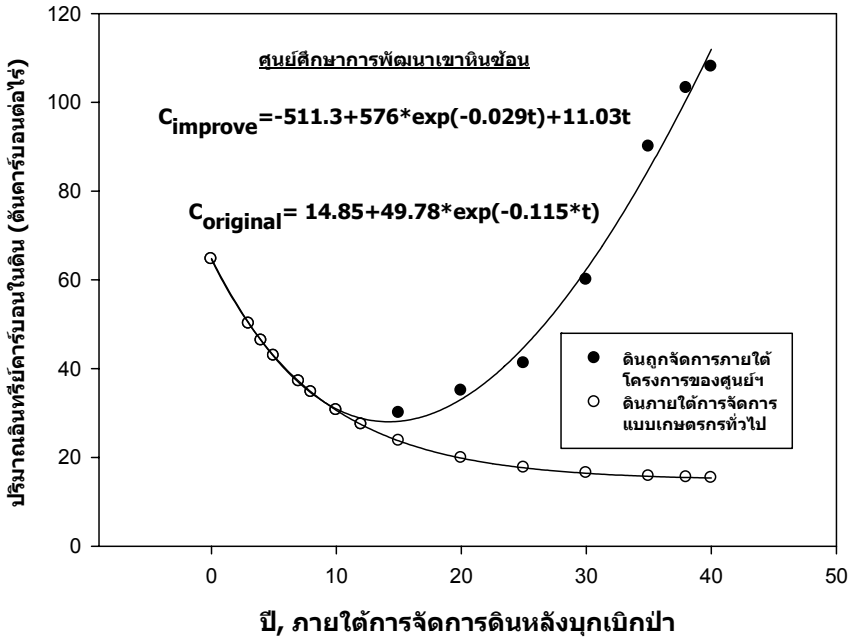
ข้าวโพดหวาน เพื่อคัดพันธุ์พระราชทาน “ฉัตรทอง” มาทำการศึกษาการเปรียบเทียบภายภายใต้การใช้ที่ดินและการจัดการดินที่แตกต่างกันตามความต่อเนื่องของช่วงเวลาโดยดินที่ทำการศึกษาทั้งในแปลงป่าดั่งเดิมและแปลงทดลองปลูกข้าวโพดหวาน เพื่อคัดพันธุ์ เป็นดินชุดจันทึก (Typic Ustipsaments) ผลการศึกษาพบว่าค่าอินทรีย์คาร์บอนในดิน จากพื้นที่ป่าดั้งเดิม (0 ปี เมื่อป่าถูกบุกเบิกปี พ.ศ. 2510) 64.63 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี เมื่อเวลาผ่านไป 40 ปี พบว่าพื้นที่ที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงบำรุงดินนั้นค่าอินทรีย์คาร์บอนในดินลดลงเหลือ 15.35 ตันคาร์บอนต่อไร่ (ภาพที่10) และเมื่อเก็บข้อมูลจากแปลงทดลองปลูกข้าวโพดหวาน เพื่อคัดพันธุ์พระราชทานฉัตรทองของศูนย์ (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน, 2531) แล้วนำมาคำนวณค่าอินทรีย์คาร์บอนในดินในช่วงเวลาต่อเนื่องหลังจากมีการจัดการดินอย่างดีพบว่า สมการความสัมพันธ์ของการสลายแบบเอกโพเนนเชียล ได้เปลี่ยนมาเป็นรูปแบบ การสลายแบบเอกโพเนนเชียลเชิงเส้นตรงผสมผสาน (Exponential linear combination) กล่าวคือ มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินหลังจากมีการปรับปรุงบำรุงดินในช่วงหลังการก่อตั้งศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อนในปี พ.ศ. 2522 (12 ปี หลังจากป่าถูกบุกเบิก) ซึ่งปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินมีค่า 27.37 ตันคาร์บอนต่อไร่ ในปี 2544 และเพิ่มขึ้นเป็น 103.19 ตันคาร์บอนต่อไร่ ในปี 2548 (38 ปี หลังจากป่าถูกบุกเบิก) ทั้งนี้ประวัติของการใช้ที่ดินและการจัดการดินดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ประวัติการใช้ที่ดินและการจัดการดินในแปลงทดลองข้าวโพดคัดพันธุ์ของศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน จังหวัดฉะเชิงเทรา[1]

พ.ศ.	ช่วงเวลา (ปี)	การใช้ที่ดิน	การจัดการดิน (ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี)				ตันต่อไร่ต่อปี
			อินทรีย์คาร์บอน	46-0-0	15-15-15	18-24-24	ปุ๋ยหมัก
2510	0	ป่าถูกบุกเบิก	64.63	-	-	-	-
2522	12	เริ่มตั้งศูนย์ฯ	27.37	-	-	-	-
2523-2530	13-20	ไม้ผลละมุดพร้อมพืชคลุม Centrocema	23.71	มข[2]	มข	มข	60-80
2531-2537	21-27	ข้าวโพดฝักอ่อนและคัดพันธุ์	17.65	4-6	6-8	3-4	60-80
2538-2548	28-38	ข้าวโพดหวานคัดพันธุ์และขยายพันธุ์	103.19	6-8	8-10	4-6	180-200

[1] ข้อมูลได้จากสมุดบันทึกประจำแปลงของศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อนและรายงานการสำรวจดินศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2526)

[2] มข = ไม่มีข้อมูล



ภาพที่ 10 กราฟการสลายแบบเอกโพเนนเชียลเชิงเส้นผสมผสาน เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์คาร์บอนภายใต้การจัดการที่เข้มข้น (●) และการจัดการแบบทั่วไป (○) ในดิน หลังจากป่าถูกบุกรุก (0 ปี, พ.ศ.2510) ของแปลงศึกษาศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

1. ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากป่าได้ถูกบุกเบิกเพื่อเปลี่ยนมาเป็นข้าวโพด โดยใช้เวลาเพียง 12 ปี สามารถลดลงถึง 47 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การจัดการดินปลูกข้าวโพดหลังจากป่าถูกบุกรุกมีการเพิ่มของอินทรีย์คาร์บอนเพียง 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

2. การศึกษาสัดส่วนของอินทรีย์คาร์บอนในดินภายใต้ระบบการปลูกข้าวโพด หลังจากการเปลี่ยนการใช้ที่ดินจากป่ามาเป็นข้าวโพด ซึ่งปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินรวมที่ลดลงอย่างรวดเร็วนั้น พบว่าอินทรีย์คาร์บอนที่มีอยู่ในดินส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์คาร์บอนที่สลายมาจากไม้ป่าก่อนถูกบุกรุก ในขณะที่มีอินทรีย์คาร์บอนที่มาจากการปลูกข้าวโพดในรูปแบบเกษตรกรทั่วไปมีสัดส่วนเพียง 10 เปอร์เซ็นต์

3. การศึกษาระยะยาวโดยใช้สมการการถดถอยรูปแบบการสลายแบบเอกซ์โพเนนเชียล สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน เมื่อลดลงอย่างรวดเร็วนั้นจะเข้าสู่สมดุลคงที่ในช่วงระยะเวลา 40 – 50 ปี โดยที่อินทรีย์คาร์บอนที่เหลืออยู่นั้นส่วนใหญ่จะเป็นอินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวยาก และอยู่ในส่วนของดินชั้นล่างและเมื่อศึกษาเปรียบเทียบการจัดการดินที่แตกต่างกันระหว่างการจัดการแบบเข้มข้นกับแบบทั่วไปหลังจากป่าถูกบุกเบิกมาทำการเกษตร พบว่าถ้ามีการจัดการที่ดีแล้ว ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสามารถเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมได้ในช่วงระยะเวลา 20 ถึง 50 ปีเมื่อเทียบกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในป่าดั่งเดิม

ข้อเสนอแนะ

แนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาที่ดิน คือ การใช้ที่ดินให้ถูกต้องตามสมรรถนะที่ดิน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง ในการวางระบบการพัฒนาที่ดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่ไม่เหมาะสมต่อสมรรถนะที่ดินนั้นๆ ทั้งนี้เกิดจาก ความต้องการของประชากรในการใช้ทรัพยากรที่ดินอยู่ในสภาวะถูกกดดันทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่จากป่าไม้ ไปเป็นพื้นที่เกษตร ซึ่งการใช้ที่ดินลักษณะนี้มีผลกระทบอย่างมากต่อความสูญเสียความอุดมสมบูรณ์ของดิน ทำให้ดินเสื่อมโทรมเร็วขึ้น สำหรับ พื้นที่ในเขตภาคกลางนั้น ยังพบว่ามีการบุกรุกทำลายป่าอยู่ โดยเฉพาะพื้นที่ในบริเวณจังหวัดอุทัยธานี สระบุรี ลพบุรี และนครนายก เป็นต้น

แนวทางการวิจัยครั้งนี้ ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ที่มีต่ออินทรีย์คาร์บอน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอินทรียวัตถุในดิน เป็นที่ทราบกันอยู่ว่า อินทรียวัตถุในดินเป็นตัวชี้วัดความอุดมสมบูรณ์ของดินต่อการปลูกพืชทางการเกษตร ผลสรุปของงานวิจัยครั้งนี้ชี้ชัดว่า การบุกรุกทำลายป่า มีผลกระทบใหญ่หลวงต่อการสูญเสียอินทรีย์คาร์บอน หรืออินทรียวัตถุในดิน ซึ่งจะส่งผลต่อการเสื่อมโทรมของดิน และจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ถ้ามีการจัดการดินที่ดี มีการวางระบบการพัฒนาที่ดินที่ถูกต้อง เช่น ตัวอย่างของศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน สามารถนำมาปรับใช้ในพื้นที่เกษตรในเขตพื้นที่ภาคกลางด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการศึกษาผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ควรจะศึกษาให้ครอบคลุมในด้านต่างๆให้ครบถ้วน อาทิ ผลกระทบที่มีต่อธาตุอาหารในดิน ความชื้นในดิน ตลอดจนการชะล้างพังทลายของดิน เป็นต้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน จากพืชล้มลุกไปเป็นพืชยืนต้นข้ามปี อาทิเช่น การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากการปลูกพืชไร่ไปเป็น ยางพารา เป็นต้น

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณ กรมพัฒนาที่ดิน ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการศึกษา และวิเคราะห์ตัวอย่างดิน และพืช จากงานทดลอง

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2526. **รายงานการสำรวจดินศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน**. รายงานการสำรวจดินฉบับที่ 358 กองสำรวจและจำแนกที่ดิน, กรมพัฒนาที่ดิน. 412 น.

ศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน. 2531. **โครงการสร้างพันธุ์ลูกผสมสองชั้นในพืชผักรับประทานผลในศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อนและศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทราย**. กรมพัฒนาที่ดิน. 33 น.

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2545. **การศึกษาและจัดทำรายงานแห่งชาติ ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ**. กรุงเทพฯ: เอส พี เอส พริ้นติ้ง จำกัด. (โครงการศึกษาแหล่งกักเก็บก๊าซเรือนกระจกจากภาคป่าไม้และกิจกรรมการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ภายใต้พิธีสารเกียวโต เสนอสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. กุมภาพันธ์ 2545). 220 น.

Batjes, N.H. 1996. **Total C and N in soils of the world**. *Eur.J. Soil Sci.* **47**, 151-163.

Balesdent, J., G.H. Wagner and A. Mariotti. 1988. **Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance**. Soil Sci. Soc. Am. J. **52**: 118-24.

Bernoux, M., C.C. Cerri, C. Neill and J.f.l. de Moraes. 1998. **The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates**. Geoderma. **82**: 43-58.

Blake, G.R. 1965. **Bulk Density**. *In* Black, C.A. (ed.). Method of soil analysis, Part 1. American Socitety of Agronomy Monograph. No.9. Madison, Wisconsin. U.S.A. pp. 383-390.

Blair, N., A. Leu, E. Munoz, J. Olsen, E. Kwong and D. Des Marais. 1985. **Carbon isotopic fraction in heterotrophic microbial metabolism**. Appl. Environ. Microbiol. **50(4):** 996-1001.

Bray, R.A. and L.T. Kurtz. 1945. **Determination of total organic and available form of phosphorus in soil**. Soil. *Sci*. **59**: 39-45.

Bruun, T.B., A. de Neergaard, D. Lawrence and A.D. Ziegler. 2009. Environmental Consequences of the Demise in Swidden Agriculture in SE Asia: Soil Nutrients and carbon stocks. *Human Ecol.* **37**: 375-388.

Cerri, C.C.1986. **Dinamica da material organica do solo no agrosistema cana de acucar**. Thesis Diss., CENA-Univ. of Sao Paulo, Piracicaba (SP), Brazil, 197 pp.

Cerri, C.C. and F. Andreux.1990. **Change in organic carbon content of Oxisols cultivated with sugar cane and pasture, based on ^{13}C abundance measurements**. *Proceedings 14th International Congress Soil Science*, Kyoto, Japan. IV: 98-103.

Cerri, C.C., B.P. Eduardo and M.C. Piccolo. 1991. **Use of stable isotope in soil organic matter studies. IAEA Proc**. Series, IAEA-SM-**31/48**: 247-59.

Cerri, C., E.P. Easter, M. Paustian, K. Killian, K. Coleman, K. Bernoux, M. Falloon, P. Powlson, D.S. Batjes, N.H.E. Milne and C.C. Cerri. 2007. **Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazillian Amazon between 2000 and 2030**. Agr. Ecosyst. Environ. **122**: 58-72.

Craig, H. 1957. **Isotopic standards of carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide**. Geochim. Cosmochim. Acta. **12**: 133-149.

De Camargo, P.B., S. Trumbore, L.A. Martinelli, E.A. Davidson, D.C. Nepstad and R.L. Victoria.1999. **Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amasonia**. *Global Change Biology*. **5**: 693-702

FAO. 2005. **Global forest resources assessment 2005 (Progress towards sustainable forest management)**. FAO Forestry Paper 147, Rome. 320p.

Flint, E.P. 1994. **Changes in land use in South and Southeast Asia from 1880 to 1980: A data base prepared as part of a coordinated research program**. Chemosphere. **29**: 1015-1062.

Follent, M.C. 2001. **Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils**. Soil Tillage Res. **6**:77-92.

Galimov, E.M. 1985. **The Biological Fractionation of Isotopes**. Academic Press, New York, 261 pp.

Jackson, M.L. 1958. **Soil Chemical Analysis**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. pp 219-221.

Jenkinson, D.S. and J.H. Rayner. 1977. **The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiment**. Soil Sci. **123**: 298-305.

Mendham, D.D., A.M. O'Connell and T.S. Grove. 2003. **Change in soil carbon after land clearing or afforestation in highly weathered lateritic and sandy soils of south-western Australia**. Agri. Ecosyst. Environ. **95**: 143-156.

O'Leary, M.H. 1981. **Carbon isotope fractionation in plants**. Phytochemistry. **20**: 553-567.

Phat, N. K., W. Knorr and S. Kim. 2004. Appropriate **measures for conservation of terrestrial carbon stocks-analysis of trends of forest management in Southeast Asia**. For. Ecol. Manag.191: 283-299.

Reijneveld, A., J. van Wensem and O. Oenema. 2009. **Soil organic carbon contents of agricultural land in the Netherlands between 1984 and 2004**. Geoderma. **152**: 231-238.

Schedlbauer, J.L. and K.L. Kavanagh. 2008. **Soil organic carbon dynamics in a chronosequence of secondary forests in northeastern Costa Rica**. *Forest Ecol. Manag.* **255**: 1326-1335.

Schulp, C.J.E. and P.H. Verburg. 2009. **Effect of land use history and site factors on spatial variation of soil organic carbon across a physiographic region**. Agri. Ecosyst. Environ. **133**: 86-97.

Soil survey staff. 1990. **Keys to Soil Taxonomy.** 4th ed. SMSS Tech. Monogr., 6. SMSS, Blacks Burg, VA., 422 pp.

Staddon, P.L. 2004. **Carbon isotopes in functional soil ecology**. *Trend. Ecol. Evol.* **19**: 148-154.

Telles, E.C.C., P.B. Camargo, L.A. Martinelli, S.E. Trumbore, E.S. Costa, J. Santos, N. Higuchi and R.C.O. Oliveira. 2003. **Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia**. Global. Biogeochem. Cycles. **17**: 1040.

Van Noordwijk, M., C.C. Cerri, P.L. Woomer, K. Nugrohoand and B. Bernoux. 1997. **Soil organic carbon dynamics in the humid tropical forest zone**. Geoderma. **79**: 87-225.

Walker F.W., J.R. Parington and F. Feiner. 1989. **Nuclides and Isotopes; Chart of the Nuclides**. 14th ed., GE Nuclear Energy, GE Company, Nuclear Energy Operations, 175 Curtner Ave. San Jose, CA, USA.

Wen, Z., Y. Yong-Qiang, S. Wen-Juan and Y. Huang. 2007. **Simulation of soil organic carbon dynamics in Chinese rice paddies from 1980 to 2000**. Pedosphere. **17**: 1-10.

Yimer, F., S. Ledin and A. Abdelkadir. 2007. **Changes in soil organic carbon and total nitrogen contents in three adjacent land use types in the Bale Mountains, sout-easthern highlands of Ethiopia**. For. Ecol. Manag. **242**: 337-342.

Yoneyama, T., H. Okada and P. Chongpraditnum. 2006. **Effects of vegetation and cultivation on $\delta^{13}C$ values of soil organic carbon and estimation of its turnover in Asian tropics: A case study in Thailand**. Soil Sci. Plant Nutr. **52**: 95-102.

Ziegler, A.D., T.B. Bruun, M. Guardiola-Claramonte, T.W. Giambelluca, D. Lawrence and N.T. Lam. 2009. **Environmental Consequences of the Demise in Swidden Agriculture in SE Asia: Hydrology and Geomorphology**. Human Ecol. **37**: 361-373.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 คำอธิบายชั้นหน้าตัดดิน (Soil profile description) ของดินแปลงศึกษาทั้ง 4 แปลง ใน อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา

1) แปลงป่า (NFT) ชุดดินโพนพิสัย (Pp)

(NFT) (USDA) coarse skeletal, kaolinitic, Typic Paleustults

Horizon	Depth (cm.)	Horizon Description
A_1	0-17	Very dark gray (10 YR 3/1) clay loam ; moderate fine and medium subangular blocky structure ; firm, sticky, plastic ; many fine and medium roots; moderate alkaline; abrupt, smooth boundary.
BA	17-40	Dark brown (7.5 YR 3/4) very gravelly clay loam ; moderate fine and medium subangular blocky structure ; firm, slightly sticky, slightly plastic ; common fine and few medium roots ; gravels composed of unconsolidated ironstones about 60% by volume of the soil matrix ; neutral; clear, smooth boundary.
Bt_1	40-75	Brown (7.5 YR 5/4) very gravelly clay ; moderate fine and medium subangular blocky structure ; firm, slightly sticky, slightly plastic ; patchy thin clay coatings on ped faces in pores ; few fine roots ; gravels composed of unconsolidated ironstones about 70% by volume of the soil matrix, common ferric and manganese concretion ; neutral ; gradual, smooth boundary.
Bt_2	75-100	Light brownish gray (10 YR 6/2) gravelly clay ; common fine mottles of strong brown (7.5 YR 4/6) ; moderate medium and coarse subangular blocky structure ; firm, slightly sticky, slightly plastic ; patchy thin clay coatings on ped faces and in pores ; few fine roots ; gravels composed of unconsolidated ironstones about 50% by volume of the soil matrix, plinthites forming in the soil matrix, common ferric and manganese concretion; strongly acid.

2) แปลงปลูกข้าวโพด (AG 3) ชุดดินนครปฐม (Np),

AG3 (USDA) : fine, mixed, semiact, Aeric Endoaqualfs

Horizon	Depth (cm.)	Horizon Description
Ap	0-16	Very dark gray (10YR 3/1) slightly gravelly clay loam ; moderate fine and medium subangular blocky structure ; firm, sticky, plastic ;few fine and medium roots ;mildly alkaline ; clear, smooth boundary.
Bt_{g1}	16-28	Yellowish brown (10 YR 5/4) clay ; few fine mottles of red (2.5 YR 4/8) ; moderate medium and coarse subangular blocky structure ; firm sticky, plastic ; patchy thin clay coatings on ped faces and in pores ; few fine roots ; neutral ; clear, smooth boundary.
Bt_{g2}	28-54	Light brown gray (10 YR 6/2) clay ; many medium mottles of brownish yellowish brown (10 YR 6/8) and common fine mottles of red (2.5 YR 4/8) moderate medium and coarse subangular blocky structure ; firm sticky, plastic ; patchy thin clay coatings on ped faces and in pores ; few fine roots ; slightly acid ; gradual, smooth boundary.
Bt_{g3}	54-75	Light brownish gray (10 YR 6/2) clay; common fine mottles of brownish yellow (10 YR 6/8) and few fine mottles of red (2.5 YR 4/6); moderate medium and coarse subangular blocky structure; firm, sticky, plastic thin clay coatings on ped faces and in pores; few fine roots; slightly acid.

3) แปลงปลูกข้าวโพด (AG7) ชุดดินท่ายาง (Ty)

AG7 (USDA) loamy skeletal, siliceous, Kanhaphic Haplustults

Horizon	Depth (cm.)	Horizon Description
A_1	0-12	Dark grayish brown (10 YR 4/2) slightly gravell sandy clay loam ; moderate medium and coarse subangular blocky structure ; firm, slightly sticky, slightly plastic ; few fine roots ; neutral ; about, smooth boundary.
Bt_1	13-32	Yellowish brown (10 YR5/4) very gravelly sandy clay loam ; moderate fine and medium subangular blocky structure ; firm, slightly sticky, slightly plastic ; patchy thin clay coatings on ped faces and in pores ; few find roots ; gravels composed of sand stone and quardzite fragments about 80 % by volume of the soil matrix ; neutral.
Bt_2	32-60	Light yellowish brown (10 YR6/4) very gravelly sandy clay loam ; moderate fine and medium subangular blocky structure ; firm, slightly sticky, slightly plastic ; patchy thin clay coatings on ped faces and in pores ; gravels composed of sand stone and quardzite fragments about 80 % by volume of the soil matrix ; neutral.

4) แปลงปลูกข้าวโพด 10 ปี (AG10) ชุดดินบ้านจ้อง (Bg)

AG 10 (USDA) : fine, kaolinitic, Typic Paleustults

Horizon	Depth (cm.)	Horizon Description
A_1	0-11	Very dark grayish brown (10 YR 3/2) clay loam; moderate fine and medium subangular blocky structure; firm, sticky, plastic; common fine and abrupt, smooth boundary.
BA	11-25	Yellowish brown (10 YR 5/4) clay ;common fine mottles of yellowish red medium subangular blocky structure ; firm, slightly sticky, slightly plastic; few fine roots ; neutral ; gradual, smooth boundary.
Bt_1	25-62	Yellowish brown (10 YR 5/4) clay ; ;common fine mottles of yellowish red moderate fine and medium subangular blocky structure ; firm, slightly sticky, slightly plastic ;moderately thick clay coatings on ped faces in pores ; few fine roots ; neutral ; gradual, smooth boundary.
Bt_2	62-100	Light brownish gray (10 YR 6/2) gravelly clay; common fine mottles of strong brown (7.5 YR 4/6); moderate medium and coarse subangular blocky structure; firm, sticky, plastic; patchy thin clay coatings on ped faces and in pores; concretion; strongly acid.

ตารางผนวกที่ 2 ค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (C_s) อินทรีย์คาร์บอนจากป่า (C_{df}) และ อินทรีย์คาร์บอนจากข้าวโพด (C_{dc}) โดยคำนวณจากเดลต้าคาร์บอน-13 ($\delta^{13}C_s$) ในดินของช่วงเวลาที่ศึกษา 12 ปี หลังบุกเบิกป่าอำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา

ช่วงเวลา	$\delta^{13}C_s$	อินทรีย์คาร์บอนรวม (C_s)	อินทรีย์คาร์บอนจากป่า (C_{df}) (C3,ป่า)	อินทรีย์คาร์บอนจากข้าวโพด (C_{dc}) (C4,ข้าวโพด)
ปี	(เปอร์มิล)		(ตันคาร์บอนต่อไร่)	
0	-26.9	377.4	377.4	0
3	-26.1	339.9	323.0	16.9
4	-26.1	249.4	236.9	12.4
5	-26.4	276.1	267.5	8.6
7	-23.8	164.2	132.6	31.6
8	-25.2	228.8	204.6	24.2
9	-24.7	132.1	114.0	18.1
10	-25.8	189.6	176.7	12.9
11	-24.6	190.4	163.2	27.2
12	-25.6	151.4	139.2	12.3

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ที่ระดับ 0-10, 40-50, 70-80 และ รวม 0-100 เซนติเมตร ในช่วงเวลาที่ศึกษา 12 ปี หลังบุกเบิกป่า อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ช่วงเวลา	0-10 ซม.	40-50 ซม.	70-80 ซม.	รวม 0-100 ซม.
ปี		(ตันคาร์บอนต่อไร่)		
0	377.4	79.8	37.9	1,081.0
	(25.4)	(13.1)	(6.9)	
3	339.9	46.7	33.3	857.1
	(115.3)	(6.4)	(7.4)	
4	249.4	45.3	26.1	738.8
	(100.6)	(4.1)	(1.5)	
5	276.1	63.2	43.6	942.9
	(19.9)	(12.8)	(10.7)	
7	164.2	49.9	30.6	663.2
	(18.6)	(33.6)	(1.8)	
8	228.8	28.1	17.9	588.1
	(62.1)	(2.4)	(5.9)	
9	132.1	40.9	41.9	653.6
	(8.1)	(3.8)	(1.6)	
10	189.6	37.9	25.2	559.6
	(83.8)	(5.4)	(21.8)	
11	190.4	83.2	59.6	1162.1
	(17.4)	(6.2)	(8.1)	
12	151.4	40.4	28.8	740.9
	(17.7)	(3.0)	(1.3)	