การประเมินสภาพภูมิอากาศในอดีตโดยอาศัยตัวบ่งชี้เรณูวิทยาและธรณีเคมีของอินทรียวัตถุที่ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนทะเลสาบบริเวณประเทศไทย

Paleoclimatic Assessment Based on Palynological and Organic Geochemical Proxies in Lake Sediments in Thailand

อัคนีวุธ ชะบางบอน*

Akkaneewut Chabangborn*

หน่วยปฏิบัติการวิจัยสัณฐานวิทยาของพื้นผิวโลกและธรณีพิบัติภัยขั้นสูงในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ภาควิชาธรณีวิทยาคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Morphology of Earth Surface and Advanced Geohazards in Southeast Asia Research Unit,

Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Received : 28 September 2016

Accepted : 13 December 2016

Published online : 27 January 2017

บทคัดย่อ

ตัวบ่งชี้ที่ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนทะเลสาบสามารถนำมาใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมตลอดจนสภาพภูมิอากาศในอดีตได้ ตัวบ่งชี้ที่นิยมนำมาศึกษาจากทะเลสาบบริเวณประเทศไทย ได้แก่ เรณูวิทยาและธรณีเคมีของอินทรียวัตถุ โดยละอองเรณูชี้ให้เห็นถึงการกระจายตัวและการเปลี่ยนแปลงของพันธุ์พืชร่วมกับสภาพภูมิอากาศ อย่างไรก็ตามการศึกษาด้วยวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากความต่างของการผลิตและการกระจายตัวของละอองเรณูของพืชแต่ละชนิด รวมถึงการรักษาสภาพของละอองเรณูในแอ่งสะสมตะกอน นอกจากนั้นความคล้ายคลึงกันทำให้การจำแนกชนิดของละอองเรณูทำได้ยาก สำหรับตัวบ่งชี้ทางธรณีเคมีของอินทรียวัตถุประกอบด้วย ค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอน และอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรไนโตรเจน โดยทำการแปลผลร่วมกันในเชิงของการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในทะเลสาบและปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้ามาสู่ทะเลสาบสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝน อย่างไรก็ตามเนื่องจากอินทรียวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงและถูกย่อยสลายอยู่ตลอดเวลาจากการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้การแปลความหมายโดยอาศัยตัวบ่งชี้ชนิดนี้มีความซับซ้อน ดังนั้นในการจำลองสภาพภูมิอากาศในอดีตจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการสอบเทียบร่วมกับตัวบ่งชี้ชนิดอื่น และทำความเข้าใจกับสภาพแวดล้อมในปัจจุบันโดยรอบทะเลสาบ เพื่อจำกัดความคลาดเคลื่อนในการแปลความหมายให้น้อยที่สุด

คำสำคัญ : ตะกอนทะเลสาบ, ตัวบ่งชี้, เรณูวิทยา, ธรณีเคมี, อินทรียวัตถุ

***Corresponding author. E-mail** : akkaneewut@gmail.com

Abstract

Proxies in lake sediment study in Thailand have been here summarized and discussed. Palynology and organic geochemistry are commonly used to reconstruct the past climate. The pollen and spore records provide the information of plant diversity and also vegetation dynamics in regarding to the climate change. However, this approach has several limitations mainly caused by the differences in pollen production, dispersion, preservation and identification. Total organic carbon, carbon and nitrogen ratio, carbon and nitrogen isotope ratios are the indicator of abundance and origin of organic matters reflected lake level and runoff fluctuation. Since the organic matters have been altered and decomposed by microbial activities through time, environmental assessment based of organic geochemical proxies are complicate. Therefore to compare with the other proxies and to understand the present conditions of the lake are necessitated in order to reduce uncertainty in the past climate reconstruction.

Keywords : lake sediment, proxy, palynology, geochemistry, organic matter

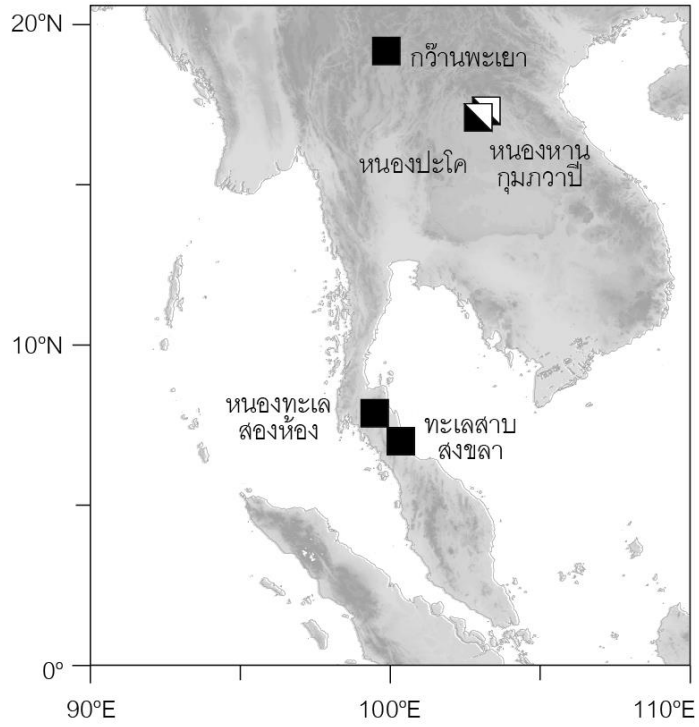
บทนำ

ผลการตรวจวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศบริเวณเกาะเมาน่าโลอา (Mauna Loa) ซึ่งนำเสนอโดย ชาร์ล เดวิด คีลิง (Charles David Keeling) เมื่อปี ค.ศ. 1961 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิพื้นผิวโลกที่ร้อนขึ้น เป็นผลสืบเนื่องมาจากการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดความตระหนักถึงผลกระทบที่อาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) ทั้งในด้านสภาพแวดล้อมรวมถึงการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ปัจจุบันมีการตั้งคณะกรรมการกลางระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change หรือ IPCC) เพื่อติดตามและประเมินผลกระทบอันอาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยาร่วมกับการใช้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ แม้ว่าผลที่ได้จากการตรวจวัดและแบบจำลองสภาพภูมิอากาศแสดงให้เห็นว่าโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณน้ำฝนที่ผันแปรไปเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิพื้นผิวโลกร้อนขึ้นในบางบริเวณยังไม่ชัดเจน เช่น เขตมรสุมทวีปเอเชีย (Asian monsoon region) (Cruz *et al*., 2007; IPCC, 2012)

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมตลอดจนสภาพภูมิอากาศในอดีตส่งผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการสะสมตัวของตะกอนในแอ่งสะสมตะกอนทะเลสาบหรือมหาสมุทร (lake sediment หรือ marine sediment) การก่อตัวของหินงอก (speleothem) หรือธารน้ำแข็ง (ice sheet) ตลอดจนวิวัฒนาการทางธรณีสัณฐานวิทยา (geomorphology) การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ถูกบันทึกเอาไว้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระยะเวลาหลายพันถึงหลายหมื่นปีของการพัฒนาตัวของหลักฐานทางธรณีวิทยา (geological archives) นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม โดยไม่มีปัจจัยอันเนื่องมาจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้อง จึงทำให้ข้อมูลดังกล่าวเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบในการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (เช่น Cook & Jones, 2012; Chabangborn *et al*., 2013; Chabangborn & Wohlfarth, 2014)

การประเมินสภาพภูมิอากาศบรรพกาลโดยใช้ตัวบ่งชี้ที่ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนทะเลสาบ

ตะกอนในทะเลสาบเป็นหลักฐานทางธรณีวิทยาที่นิยมนำมาใช้ในการประเมินสภาพแวดล้อมในอดีต รวมถึงการแปลผลในเชิงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศบรรพกาล (paleoclimate) ทั้งนี้เนื่องจากชั้นตะกอนที่สะสมตัวในทะเลสาบมักที่จะไม่ถูกรบกวนทำให้การลำดับชั้นตะกอนไม่ซับซ้อน โดยตะกอนชั้นล่างมีอายุแก่กว่าชั้นตะกอนที่ปิดทับอยู่ด้านบนตามกฎการลำดับชั้นตะกอน (law of superposition) นอกจากนี้แล้วตะกอนทะเลสาบยังสะสมตัวร่วมกับตัวบ่งชี้ (proxy) หลายชนิด เช่น ลักษณะทางกายภาพของตะกอน สมบัติทางธรณีเคมี และซากดึกดำบรรพ์พืชหรือสัตว์ จึงสามารถนำการแปลความหมายจากตัวบ่งชี้แต่ละชนิดมาสอบเทียบกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยลงได้ (Last & Smol, 2001) ตัวบ่งชี้ที่มักมีการนำมาใช้ศึกษาตะกอนทะเลสาบในประเทศไทย (ภาพที่ 1) ได้แก่ เรณูวิทยา (palynology) และสมบัติทางธรณีเคมีของอินทรียวัตถุ (geochemistry of organic matter) ที่ตกสะสมตัวร่วมกับตะกอนในทะเลสาบ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออภิปรายถึงข้อจำกัดในการนำตัวบ่งชี้ดังกล่าวมาทำการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย

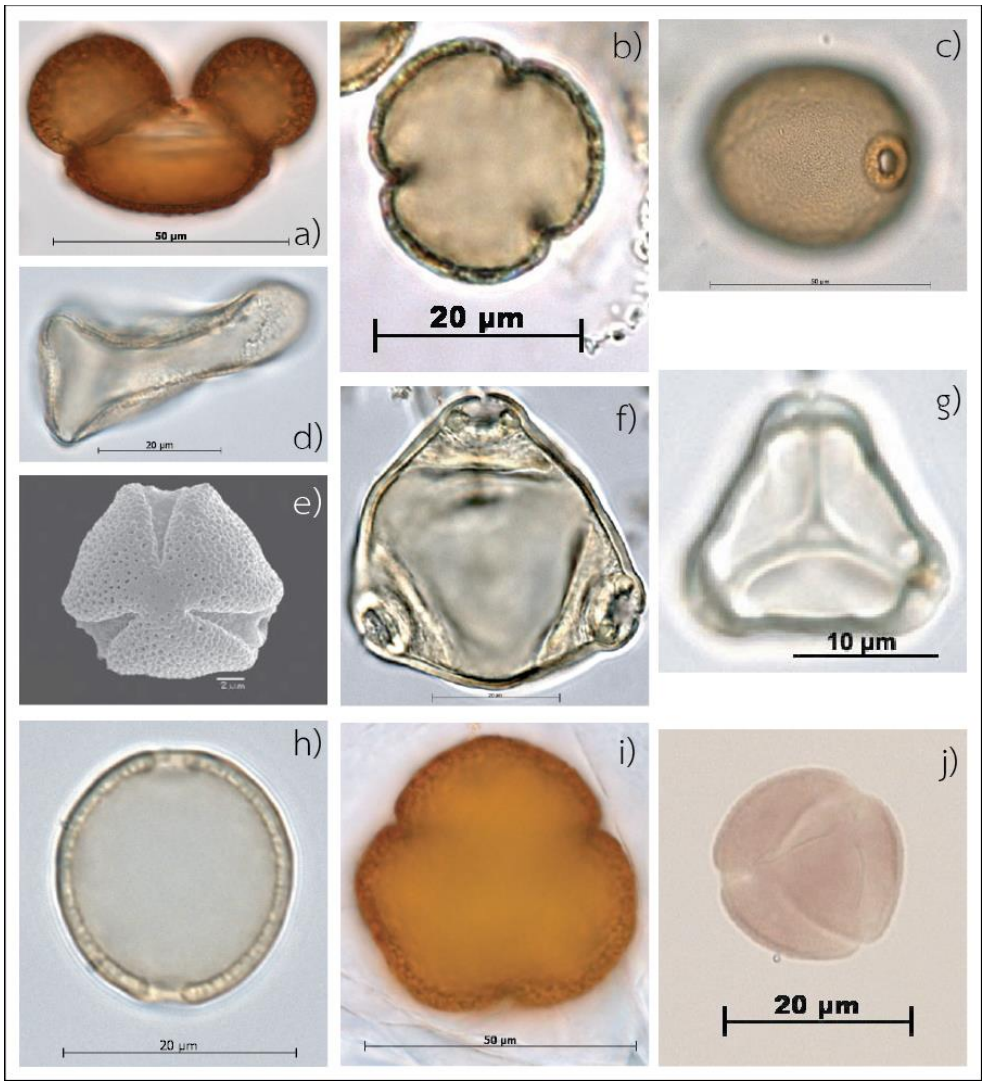


ภาพที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งของหนองน้ำหรือทะเลสาบที่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในอดีต โดยใช้ตัวบ่งชี้เรณูวิทยา (สีดำ) และธรณีเคมีของอินทรียวัตถุ (สีขาว) ในบริเวณประเทศไทย ได้แก่ กว๊านพะเยา (Penny & Kealhofer, 2005; White *et al*., 2004) หนองหานกุมภวาปี (Kealhofer & Penny, 1998; White *et al*., 2004; Wohlfarth *et al*., 2012; Chawchai *et al*., 2013; Chawchai *et al*., 2015) หนองปะโค (Penny, 2001; White *et al*., 2004; Burke, 2014) หนองทะเลสองห้อง (Maloney, 1996; White *et al*., 2004) และทะเลสาบสงขลา (Rugmai, 2006)

เรณูวิทยา

เรณูวิทยา เป็นการศึกษาละอองเรณู (pollen) หรือเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ของพืชดอก (angiosperm) และพืชเมล็ดเปลือย (gymnosperm) รวมถึงสปอร์ (spore) ซึ่งเป็นเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ของพืชกลุ่มเฟิร์น (pteridophyte) หรือ มอสส์ (moss) (Bennett & Willis, 2001) ผนังของละอองเรณูด้านนอก (exine) ประกอบด้วยสารที่เรียกว่า สปอร์โรพอเลนิน (sporopollenin) ซึ่งเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่ทนทานต่อการย่อยสลายทั้งทางเคมีและทางกายภาพได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้วละอองเรณูและสปอร์ของพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันทั้ง ขนาด รูปร่าง สมมาตร ช่องเปิด (aperture) และลวดลายบน

ผนังด้านนอก ทำให้สามารถจำแนกชนิดของพืชพรรณได้ เมื่อละอองเรณูและสปอร์แพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมแล้ว ส่วนมากไม่ได้เข้าไปผสมพันธุ์กับรังไข่หรือเซลล์สืบพันธุ์เพศเมีย แต่ถูกชะกลับลงมาสู่พื้นดินโดยฝนและบางส่วนถูกพัดพามาสะสมตัวร่วมกับตะกอนในทะเลสาบ แม่น้ำ หรือทะเล



ภาพที่ 2 ละอองเรณูที่มักพบร่วมกับตะกอนในทะเลสาบ บริเวณประเทศไทย a) สกุลสน (*Pinus*) b) สกุลโอ๊ค (*Quercus*) c) วงศ์หญ้า (Poaceae) และ d) วงศ์กก (Cyperaceae) ละอองเรณูของพืชที่ขึ้นอยู่บริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำ e) สกุลไชยวาน (*Cephalanthus**) f) สกุลลัดวิเจีย (*Ludwigia*) และ g) สกุลชมพู่หรือหว้า (*Eugenia*) และละอองเรณูของพืชที่สามารถทนต่อความแห้งแล้ง h) สกุล *Celtis* i) สกุลยางนา (*Dipterocarpus*) และj) สกุลก่อ (*Lithocarpus*) (ข้อมูลจาก: http://apsa.anu.edu.au/ และ *Verellen *et al.*, 2007)

การนำเอาละอองเรณูและสปอร์ที่ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนทะเลสาบมาใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงพืชพันธุ์ร่วมกับสภาพแวดล้อมบรรพกาลมีการพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดย ศาสตราจารย์ เลียวนาร์ด วอน โพสต์ (Prof. Lennart von Post) แห่งมหาวิทยาลัยสต๊อกโฮล์ม ประเทศสวีเดน และมีการพัฒนาเทคนิคที่ใช้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ในการจำแนกสภาพภูมิอากาศตามวิธีของเคิปเปน (Köppen climate classification) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันยังอาศัยพันธุ์พืชหรือชนิดของป่าร่วมในการจำแนกสภาพภูมิอากาศ เรณูวิทยาจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมและแพร่หลายในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ ประกอบกับการที่ประเทศไทยตั้งอยู่ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น (tropical climate) ทำให้มีความหลากหลายของพืชพรรณและมีละอองเรณูที่ถูกพามาสะสมตัวร่วมกับตะกอนในทะเลสาบเป็นจำนวนมาก

อย่างไรก็ตามการใช้เรณูวิทยาในการจำลองการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมยังมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจาก 1) การผลิต การแพร่กระจายและการรักษาสภาพของละอองเรณูและสปอร์ของพืชแต่ละชนิดแตกต่างกัน 2) การจำแนกละอองเรณูและสปอร์ที่มีความคล้ายคลึงกัน และ 3) ความหลากหลายของละอองเรณูที่สะสมตัวในชั้นตะกอนทำให้แปลความหมายได้ยาก (Brewer *et al*., 2013) นอกจากนั้นละอองเรณูที่พบมากอย่างเห็นได้ชัดในแท่งตะกอนทะเลสาบบริเวณประเทศไทยประกอบด้วยพืชไม้ต้น (arboreal) สกุลสน (*Pinus*) และสกุลโอ๊ค (*Quercus*) รวมถึงพืชไม้พุ่ม (non-arboreal) วงศ์หญ้า (Poaceae) และวงศ์กก (Cyperaceae) (ภาพที่ 2) (Maloney, 1996; Kealhofer & Penny, 1998; Penny, 2001; White *et al*., 2004; Penny & Kealhofer, 2005; Rugmai, 2006) ซึ่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายทำให้แปลผลได้ยาก การศึกษาเรณูวิทยาจึงมักแปลผลร่วมกับตัวบ่งชี้อื่น เช่น ฟิโทลิธ (phytolith) (สารประกอบซิลิกาขนาดเล็กที่ตกตะกอนในหรือระหว่างเซลล์พืชโดยเฉพาะในพืชวงศ์หญ้า (Poaceae)) ปริมาณหรือขนาดของเศษถ่านจากการเผาไหม้ (charcoal) (Kealhofer & Penny, 1998; Penny, 2001; Lu *et al*., 2002; Whitlock & Larsen, 2002; Penny & Kealhofer, 2005) หรือแปลผลโดยอาศัยปริมาณของละอองเรณูของพืชที่เจริญเติบโตในสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น ละอองเรณูของพืชสกุลไชยวาน (*Cephalanthus*) สกุลลัดวิเจีย (*Ludwigia*) และสกุลชมพู่หรือหว้า (*Eugenia*) เป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีตามพื้นที่ชุ่มน้ำ หรือละอองเรณูของพืชสกุล *Celtis* สกุลยางนา (*Dipterocarpus*) และสกุลก่อ (*Lithocarpus*) ที่เป็นพืชที่ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี (ภาพที่ 2) การที่พบละอองเรณูของพืชเหล่านี้ในปริมาณมากแสดงสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นหรือแห้งแล้งเป็นต้น

ธรณีเคมีของอินทรียวัตถุที่ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนทะเลสาบ

อินทรียวัตถุที่สะสมตัวอยู่ร่วมกับตะกอนทะเลสาบ ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์จำพวกไขมัน คาร์โบไฮเดรต และโปรตีน รวมถึงอินทรียวัตถุในรูปอื่นที่ได้จากสิ่งมีชีวิต โดยอินทรียวัตถุที่ปะปนกับตะกอนในทะเลสาบส่วนมาก มาจากพืชพันธุ์ที่กระจายตัวอยู่โดยรอบหรือเติบโตอยู่ในทะเลสาบ ครอบคลุมตั้งแต่สาหร่ายจนถึงต้นไม้ขนาดใหญ่ ทั้งพืชไม่มีท่อลำเลียง (non-vascular plant) และพืชที่มีท่อลำเลียง (vascular plant) สำหรับอินทรียวัตถุที่มาจากสัตว์พบในปริมาณน้อยเพียงประมาณ 10% เท่านั้น (Meyers & Teranes, 2001) อินทรียวัตถุจะถูกแปรสภาพและย่อยสลายโดยการทำงานของจุลินทรีย์ทั้งก่อนและหลังจากที่ถูกพัดพามาสะสมตัวร่วมกับตะกอนในทะเลสาบอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามอินทรียวัตถุที่พบยังคงสามารถนำมาใช้ประเมินความหนาแน่นของพืชพรรณ แหล่งที่มา ตลอดจนกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับอินทรียวัตถุก่อนที่จะมาตกสะสมตัว สัมพันธ์กับระดับน้ำ ปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำฝนที่ตกโดยรอบทะเลสาบ

ตัวบ่งชี้ทางธรณีเคมีของอินทรียวัตถุที่นำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมโดยรอบและภายในทะเลสาบ ได้แก่ ค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total Organic Carbon หรือ TOC) อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C/N ratio) อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอน ($\delta^{13}C$) และอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรไนโตรเจน ($\delta^{15}N$) โดยตัวบ่งชี้เหล่านี้มักที่จะถูกนำมาพิจารณาร่วมกันเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (Wohlfarth *et al*., 2012; Chawchai *et al*., 2013)

- **ค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total Organic Carbon หรือ TOC)**

ค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม คือ ปริมาณธาตุคาร์บอนในอินทรียวัตถุที่สะสมตัวร่วมกับตะกอน แสดงปริมาณของอินทรียวัตถุและมักจะนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความหนาแน่นของพืชพรรณโดยรอบและภายในทะเลสาบ นอกจากนี้แล้วค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมยังสามารถนำมาใช้ในการประเมินกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับอินทรียวัตถุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เนื่องจากการย่อยสลายอินทรียวัตถุที่ผุพังและถูกพัดพาจากแหล่งกำเนิดมาสะสมตัวที่ทะเลสาบจะเกิดมากในชั้นน้ำที่มีออกซิเจนหรือชั้นน้ำเหนือชั้นอุณหภูมิผกกลับ (inversion temperature) ในทะเลสาบหรือ ชั้นเอพิลิมเนียน (epilimnion) ดังนั้นในขณะที่ปริมาณน้ำฝนหรือน้ำท่าลดลงทำให้ระดับน้ำในทะเลสาบตื้น ช่วงเวลาที่อินทรียวัตถุใช้ในการตกตะกอนสั้นและอัตราการถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ลดลง จึงอาจพบว่ามีค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมในชั้นตะกอนนั้นสูง (Meyers & Teranes, 2001; Wohlfarth *et al*., 2012; Chawchai *et al*., 2013)

อย่างไรก็ตามการแปลความหมายจากค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมเพียงตัวแปรเดียวมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากทะเลสาบแต่ละแห่งต่างก็มีต้นกำเนิดของอินทรียวัตถุ และกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอินทรีวัตถุต่างกัน ทำให้อินทรียวัตถุที่ปะปนอยู่กับตะกอนทะเลสาบแต่ละแห่งต่างก็มีลักษณะเฉพาะของตัวเอง นอกจากนั้นอินทรียวัตถุที่ตกตะกอนสะสมตัวที่พื้นทะเลสาบอาจถูกทำให้ฟุ้งกระจายขึ้นมาในชั้นน้ำได้อีกผ่านความปั่นป่วนของชั้นน้ำที่พื้นทะเลสาบ ทำให้อินทรียวัตถุถูกย่อยสลายซ้ำและค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมในชั้นตะกอนลดลง และการเลือกย่อยสลายของจุลินทรีย์ (selective degradation) เช่น พืชน้ำจะถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าพืชที่ถูกพัดพามาจากบนบก หรือสารประกอบกรดอะมิโนและคาร์โบไฮเดรตถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าสารฮิวมิก (humic substance) และไลปิด (lipid) ทำให้พบอินทรียวัตถุที่ไม่ถูกเลือกย่อยสลายในปริมาณมาก (Meyers & Teranes, 2001)

- **อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C/N ratios)**

ค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการจำแนกที่มาของอินทรีวัตถุที่ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนทะเลสาบ เนื่องจากพืชที่เจริญเติบโตในน้ำส่วนมากเป็นพืชที่ไม่มีท่อลำเลียงและมีค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนต่ำประมาณ 4-10 ในขณะที่พืชที่เจริญเติบโตบนบกมักจะเป็นมีพืชที่มีท่อลำเลียง ซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบทำให้มีค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนสูงถึงประมาณ 20 หรือมากกว่า อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนของอินทรียวัตถุ จึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของของแหล่งที่มาของอินทรียวัตถุและระดับน้ำในทะเลสาบได้ (Meyers & Teranes, 2001)

อย่างไรก็ตามตะกอนทะเลสาบส่วนมากจะพบอินทรียวัตถุที่มีต้นกำเนิดที่หลากหลายปะปนกัน ทำให้ไม่สามารถใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนในการจำแนกที่มาของอินทรียวัตถุได้อย่างชัดเจน (Wohlfarth *et al*., 2012)

นอกจากนั้นกระบวนการเลือกย่อยสลายของจุลินทรีย์ซึ่งมักที่จะย่อยสลายคาร์บอนมากกว่าไนโตรเจนทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนสูงขึ้น (Meyers & Teranes, 2001)

- **อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอน** (the carbon isotope ratio **หรือ** $\delta^{13}C$)

ไอโซโทปเสถียรคาร์บอนในธรรมชาติส่วนมาก ได้แก่ คาร์บอน-12 (^{12}C) และคาร์บอน-13 (^{13}C) ซึ่งมีเสถียรภาพในธรรมชาติในอัตราส่วน 99 ต่อ 1 และคาร์บอน-14 (^{14}C) ที่ได้จากการสลายตัวของธาตุไนโตรเจนเนื่องจากรังสีคอสมิก (cosmic ray) การวิเคราะห์ค่าไอโซโทปเสถียรคาร์บอนจะใช้การเปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณของคาร์บอน-13 ต่อคาร์บอน-12 ในตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์กับค่ามาตรฐานดังสมการ (1)

$$\delta^{13}C = \left[\frac{\left[\frac{^{13}C}{^{12}C}\right]_{sample}}{\left[\frac{^{13}C}{^{12}C}\right]_{standard}} - 1 \right] \times 1000‰ \qquad (1)$$

กำหนดให้ $\left[\frac{^{13}C}{^{12}C}\right]_{sample}$ และ $\left[\frac{^{13}C}{^{12}C}\right]_{standard}$ คือ อัตราส่วนระหว่าง คาร์บอน-13 ต่อคาร์บอน-12 ของตัวอย่างที่วิเคราะห์และค่ามาตรฐานที่ใช้จากพีดีเบเลมไนท์ (Pee Dee Belemnite หรือ PDB) ซึ่งได้การวัดค่าคาร์บอน-13 ในซากบรรพชีวิน *Belemnitella americana* ที่พบในหมวดหินพีดี (Pee Dee formation) บริเวณรัฐเซาท์แคโรไลนา (south Carolina) สหรัฐอเมริกา

อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนสามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ที่มาของอินทรียวัตถุ อาศัยหลักการที่พืชใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงที่แตกต่างกัน โดยพืชที่สังเคราะห์แสงแล้วสร้างสารประกอบที่มีธาตุคาร์บอน 3 ตัว (C3 Calvin pathway) หรือพืช C3 ซึ่งส่วนมากเป็นพืชไม้ยืนต้นหรือไม้พุ่ม และพืชที่สังเคราะห์แสงแล้วสร้างสารประกอบที่มีธาตุคาร์บอน 4 ตัว (C4 Hatch-Slack pathway) หรือพืช C4 ซึ่งส่วนมากเป็นพืชวงศ์หญ้า ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช C4 จะตรึงคาร์บอน-13 ที่ปะปนอยู่ในบรรยากาศเข้ามาสร้างเป็นอินทรียวัตถุมากกว่าพืช C3 ทำให้อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนของพืช C4 มักสูงกว่าพืช C3 โดยอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนของพืช C3 มีค่าประมาณ -22‰–-33‰ ในขณะที่พืช C4 มีอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนระหว่าง -8‰–-22‰ การที่มีอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนสูงจึงอาจแสดงถึงการขยายตัวของทุ่งหญ้าอันเนื่องจากสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้ง (Meyers & Teranes, 2001)

นอกจากนี้อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนยังอาจนำมาใช้ในการประเมินความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำในอดีตได้ เนื่องจากอินทรีวัตถุที่มีต้นกำเนิดจากในทะเลสาบเอง เช่น สาหร่าย มักที่จะเลือกใช้คาร์บอนที่ละลายอยู่ในน้ำคือคาร์บอน-12 ไปใช้ ถ้าในทะเลสาบมีความอุดมสมบูรณ์สูงจะเกิดการแย่งกันใช้คาร์บอน-12 ซึ่งมีปริมาณจำกัด ทำให้จำเป็นต้องนำเอาคาร์บอน-13 ไปใช้ในการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้อินทรียวัตถุที่มีต้นกำเนิดจากในทะเลสาบมีอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนสูงขึ้น และโดยอาศัยหลักการเดียวกันอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนยังสามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณสารอาหาร

ที่ถูกพัดพามาสะสมตัวในทะเลสาบ เนื่องจากปริมาณสารอาหารที่สูงขึ้นทำให้เกิดการขยายตัวของสาหร่ายในทะเลสาบพร้อมๆ กับการตรึงคาร์บอน-12 ไปใช้มากขึ้นและส่งผลให้อัตราส่วนคาร์บอนไอโซโทปสูงขึ้นตามไปด้วย (Meyers & Teranes, 2001)

เช่นเดียวกับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนอินทรียวัตถุที่ปะปนอยู่ในตะกอนทะเลสาบมีต้นกำเนิดที่หลากหลาย ทำให้ไม่สามารถจำแนกพืช C3 และ C4 ออกจากกันได้อย่างชัดเจนโดยใช้อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้กระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ยังอาจทำให้อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนของอินทรียวัตถุในตะกอนทะเลสาบเปลี่ยนไป เนื่องจากจุลินทรีย์เลือกย่อยสลายคาร์บอน-12 ก่อน ทำให้เหลือคาร์บอน-13 ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนในทะเลสาบมากกว่า ส่งผลให้สัญญานบ่งชี้ถึงต้นกำเนิดของอินทรียวัตถุเปลี่ยนไป

อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนมักที่จะถูกนำมาพิจารณาร่วมกับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอน และไนโตรเจนในการจำแนกต้นกำเนิดของอินทรียวัตถุ จากผลการศึกษาของ Meyers & Ishiwatari (1993) และ Meyers & Teranes (2001) พืช C4 ที่มีต้นกำเนิดจากบนบกจะมีอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนระหว่าง -10‰–14‰ และมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนมากกว่า 25 พืช C3 และสาหร่ายในทะเลสาบมีอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนใกล้เคียงกันระหว่าง –25‰ –-30‰ แต่สาหร่ายในทะเลสาบมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนน้อยกว่า 10 ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนในพืช C3 ที่มาจากบนบกจะมีค่ามากกว่า 15 (Meyers & Teranes, 2001)

- **อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรไนโตรเจน** (the nitrogen isotope ratio **หรือ** δ^{15}N)

ไอโซโทปเสถียรไนโตรเจนที่พบโดยทั่วไปในธรรมชาติประกอบด้วย ไนโตรเจน-14 (^{14}N) และไนโตรเจน-15 (^{15}N) ในอัตราส่วน 99.6 ต่อ 0.4% ในธรรมชาติ ค่าไอโซโทปไนโตรเจนสามารถคำนวนได้ดังสมการ (2)

$$\boldsymbol{\delta^{15}N = \left[\frac{\left[\frac{^{15}N}{^{14}N}\right]_{sample}}{\left[\frac{^{15}N}{^{14}N}\right]_{standard}} - 1\right] \times 1000‰} \quad (2)$$

กำหนดให้ $\left[\frac{^{15}N}{^{14}N}\right]_{sample}$ และ $\left[\frac{^{15}N}{^{14}N}\right]_{standard}$ คือ อัตราส่วนระหว่าง ไนโตรเจน-15 ต่อไนโตรเจน-14 ของตัวอย่างที่วิเคราะห์และค่ามาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบโดยวัดจากไนโตรเจนในบรรยากาศ

การใช้อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรไนโตรเจนในการจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทำได้ยาก เนื่องจากไนโตรเจนสามารถเข้าสู่ทะเลสาบได้หลายวิธี เช่น การทำละลายไนโตรเจนในบรรยากาศโดยน้ำฝน การทำละลายของน้ำบาดาลที่ไหลผ่านแร่กลุ่มไนเตรท การผุพังของหินหรือการย่อยสลายซากพืชหรือซากสัตว์เอง กิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ทำให้การแปลความหมายจากอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรไนโตรเจนมีความซับซ้อน โดยส่วนมากมักนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำร่วมกับอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอน (Meyers & Teranes, 2001)

สรุป อภิปรายและเสนอแนะ

ตัวบ่งชี้ที่ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนทะเลสาบเป็นข้อมูลโดยอ้อมที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินสภาพแวดล้อม และสภาพภูมิอากาศในอดีต การแปลความหมายการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศมักที่จะนำผลการจำลองสภาพภูมิอากาศในแต่ละช่วงมาเปรียบเทียบกันในแต่ละพื้นที่ศึกษา เพื่อลดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมอื่น แล้วนำเสนอในเชิงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของตัวแปรสภาพภูมิอากาศต่างๆ เช่น ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นหรือลดลง อุณหภูมิอบอุ่นขึ้นหรือเย็นลง อันจะช่วยให้สามารถทำความเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นในปัจจุบันและอนาคต ตัวบ่งชี้ที่มีการนำมาศึกษาจากทะเลสาบในบริเวณประเทศไทย ได้แก่ ตัวบ่งชี้ทางเรณูวิทยาและธรณีเคมีของอินทรียวัตถุ

การวิเคราะห์ตัวบ่งชี้ทางเรณูวิทยาสามารถแสดงการกระจายตัวตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของพันธุ์พืช ร่วมกับสภาพแวดล้อมโดยรอบทะเลสาบ แต่เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีการผลิตละอองเรณูและสปอร์เข้าสู่สิ่งแวดล้อมไม่เท่ากัน การจำแนกและระบุพันธุ์พืชที่ผลิตละอองเรณูและสปอร์ทำได้ยาก (Brewer *et al*., 2013)

สำหรับตัวอย่างตะกอนทะเลสาบในประเทศไทยบ่อยครั้งที่มักพบละอองเรณูของพืชบางชนิดที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น พืชสกุลสน (*Pinus*) และวงศ์หญ้า (Poaceae) ในปริมาณมาก ทำให้การแปลความหมายโดยอ้างอิงจากละอองเรณูเพียงอย่างเดียวทำได้ยาก นอกจากนั้นในรายงานของ Penny (1998) พบว่ามีกลุ่มของหญ้าและกกที่รากของมันสานตัวกันอย่างหนาแน่นลอยอยู่เหนือผิวน้ำ (floating mat) เช่น หนองหานกุมภาวาปีซึ่งมีกลุ่มของหญ้าและกกที่ลอยตัวปกคลุมผิวน้ำมากกว่า 50% ในปัจจุบัน ในขณะที่หนองปะโคซึ่งมีขนาดเล็กกว่าหนองหานกุมภาวาปีเคยมีกลุ่มพืชเหล่านี้ปกคลุมผิวน้ำเกือบทั้งหมดก่อนที่จะมีการลอกออกไปในปัจจุบัน หญ้าและกกที่ลอยตัวปกคลุมผิวน้ำอาจเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้พบละอองเรณูของพืชวงศ์หญ้า (Poaceae) และวงศ์กก (Cyperaceae) ปะปนอยู่ในตะกอนทะเลสาบเป็นจำนวนมาก แต่มีเพียงการศึกษาของ Kealhofer & Penny (1998) เท่านั้นที่มีการอภิปรายถึง ในขณะที่ผลการศึกษาของ Penny (2001) และ Burke (2014) ไม่ได้มีการกล่าวถึงกลุ่มของพืชที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำนี้ แต่พยายามอธิบายถึงพืชวงศ์หญ้า (Poaceae) และวงศ์กก (Cyperaceae) ในเชิงของพืชที่ปกคลุมอยู่โดยรอบหนองน้ำ

ตัวบ่งชี้ทางธรณีเคมีของอินทรียวัตถุ ได้แก่ ค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอน และอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรไนโตรเจน สามารถนำมาใช้ในการประเมินความหนาแน่นของพืชพันธุ์โดยรอบทะเลสาบ แหล่งที่มาของอินทรียวัตถุและความอุดมสมบูรณ์ของทะเลสาบ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำท่าที่ไหลเข้าสู่ทะเลสาบและระดับน้ำในทะเลสาบ แต่เนื่องจากทะเลสาบแต่ละแห่งต่างก็มีลักษณะเฉพาะรวมถึงตลอดระยะเวลาตั้งแต่การผลิต ถูกพัดพาจนกระทั่งมาสะสมตัวอยู่ในแอ่งสะสมตะกอนทะเลสาบ อินทรียวัตถุจะถูกแปรสภาพไปตลอดเวลาจากการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้การแปลความหมายจากตัวบ่งชี้ทางธรณีเคมีของอินทรียวัตถุมีความซับซ้อน (Meyers & Teranes, 2001)

การจำลองการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมบรรพกาลโดยใช้ตัวบ่งชี้ธรณีเคมีของอินทรียวัตถุจากตะกอนทะเลสาบที่ศึกษาในประเทศไทย เช่น หนองปะโค พบว่ามีค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมสูงมากตลอดทั้งแท่งตะกอน (Chawchai *et al.,* 2015) จนไม่สามารถที่จะนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ใดๆได้ ในขณะที่แท่งตะกอนทะเลสาบจากหนองหานกุมภาวาปี (Wohlfarth *et al.,* 2012 และ Chawchai *et al*., 2013) ค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบเนื่องจากการแปลความหมายจากค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมมีตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมัน การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน และอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนสัมพันธ์กับกลุ่มพืชต้นกำเนิดของอินทรียวัตถุตามการ

จำแนกของ Meyers & Teranes (2001) จึงมักถูกนำมาใช้เป็นหลัก แต่เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างนำตะกอนทั้งหมด (bulk sediment) มาใช้ ซึ่งในตะกอนทั้งหมดมีส่วนผสมของพืชต้นกำเนิดของอินทรียวัตถุหลายชนิดปะปนกัน ค่าที่ได้จากทั้งอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน และอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนไม่สามารถนำมาใช้ชี้เฉพาะลงไปได้ว่ามีอินทรียวัตถุมีต้นกำเนิดมาจากพืชกลุ่มไหน (Wohlfarth *et al*., 2012; Chawchai *et al.,* 2013 และ Chawchai *et al*., 2015) จึงใช้การแปลผลในเชิงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของพืช C3 และ C4 หรือพืชบกและพืชน้ำในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตามรายงานของ Liu *et al*. (2005) เสนอว่าพืช C3 บางชนิดมีพฤติกรรมเหมือนพืช C4 ในขณะที่มีปริมาณน้ำฝนจำกัด การจำลองสภาพภูมิอากาศโดยอาศัยตัวบ่งชี้ธรณีเคมีของอินทรียวัตถุจึงควรระมัดระวังในข้อนี้ด้วย นอกจากนั้นในบทความของ Wohlfarth *et al*. (2012) Chawchai *et al*. (2013) และ Chawchai *et al*. (2015) ต่างก็ไม่ได้อภิปรายถึงอิทธิพลของกลุ่มของหญ้าและกกที่ลอยตัวปกคลุมผิวน้ำ ซึ่งทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวกรองตะกอนจากภายนอกที่จะมาสะสมตัวในทะเลสาบและเป็นต้นกำเนิดหลักของอินทรียวัตถุที่ปะปนอยู่ในตะกอนทะเลสาบ

ดังได้อภิปรายไปแล้วข้างต้นการจำลองสภาพภูมิอากาศโดยใช้ตัวบ่งชี้ทั้งละอองเรณูและธรณีเคมีของอินทรียวัตถุต่างก็มีข้อจำกัดหลายอย่าง จึงจำเป็นที่จะต้องอาศัยการศึกษาตัวบ่งชี้อื่นควบคู่กันไปด้วย โดยทำการแปลความหมายอย่างเป็นอิสระต่อกันเพื่อเป็นการสอบเทียบและทำให้การแปลความหมายมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด นอกจากนั้นควรทำความเข้าใจสภาพแวดล้อมในปัจจุบันของทะเลสาบที่ต้องการจะศึกษาก่อน เพื่อเป็นตัวอ้างอิงถึงกระบวนการ ตลอดจนปัจจัยต่างๆ ที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในอดีตทั้งภายในและโดยรอบทะเลสาบ

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง ประจำปีงบประมาณ 2558 กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คลัสเตอร์วิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและจัดการภัยพิบัติ เลขที่โครงการ CU-58-065-CC

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ บาร์บาร่า เวิฮ์ลฟาร์ต (Prof. Barbara Wohlfarth) ที่เป็นผู้ผลักดันและสนับสนุนให้ผู้เขียนสนใจศึกษาสภาพภูมิอากาศบรรพกาล ผศ.ดร. สันติ ภัยหลบลี้ น.ส. นันทนัช เหล่านิยมไทย และ น.ส. อัสสุมา สายนาคำ ที่ช่วยอ่านและให้คำแนะนำในการเขียนบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

Australasian Pollen and Spore Atlas members. (2007). The Australasian Pollen and Spore Atlas V1.0. Australian National University, Canberra. Retrieved August 16, 2016, from http://apsa.anu.edu.au/.

Bennett, K.D. & Willis, K.J. (2001). “Pollen.” In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M., Bradley, R.S., & Alverson, K. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators* (pp. 5-32). Dordrecht: Springer Netherlands.

Brewer, S., Guiot, J., Barboni, D., Elias, S.A., & Mock, C.J. (2013). “Pollen methods and studies | Use of pollen as climate proxies.” In: Elias, S.A. (Eds.), *Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition)* (pp. 805-815). Amsterdam: Elsevier.

Burke, L. 2014. The vegetation history of Northeast Thailand. M.Phil. Thesis. Queen's University Belfast, UK, 126 pp.

Chabangborn, A., Brandefelt, J., & Wohlfarth, B. (2014). Asian monsoon climate during the Last Glacial Maximum: palaeo-data–model comparisons. *Boreas*, *43*, 220-242.

Chabangborn, A., & Wohlfarth, B. (2014). Climate over mainland Southeast Asia 10.5–5 ka. *Journal of Quaternary Science*, *29*, 445-454.

Chawchai, S., Chabangborn, A., Kylander, M., Löwemark, L., Mörth, C.M., Blaauw, M., Klubseang, W., Reimer, P.J., Fritz, S.C., & Wohlfarth, B. (2013). Lake Kumphawapi – an archive of Holocene palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes in northeast Thailand. *Quaternary Science Reviews*, *68*, 59-75.

Chawchai, S., Chabangborn, A., Fritz, S., Väliranta, M., Mörth, C.-M., Blaauw, M., Reimer, P.J., Krusic, P.J., Löwemark, & L., Wohlfarth, B., (2015). Hydroclimatic shifts in northeast Thailand during the last two millennia – the record of Lake Pa Kho. Quaternary Science Reviews *111*, 62-71.

Cook, C.G., & Jones, R.T. (2012). Palaeoclimate dynamics in continental Southeast Asia over the last ~ 30,000 Cal yrs BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 339–341, 1-11.

Cruz, R.V., Harasawa, H., Lal, M., Wu, S., Anokhin, Y., Punsalmaa, B., Honda, Y., Jafari, M., Li, C., & Huu Ninh, N. (2007). "Asia." In: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, & C.E. Hanson (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 469-506), Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2012). "Summary for policymakers. In: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation." In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.K., Allen, S.K., Tignor, M., & Midgley, P.M. (Eds.), *A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 1-19), Cambridge: Cambridge University Press.

Kealhofer, L., & Penny, D. (1998). A combined pollen and phytolith record for fourteen thousand years of vegetation change in northeastern Thailand. *Review of Palaeobotany and Palynology*, *103*, 83-93.

Last, W.M. & Smol, J.P. (2001). An Introduction to Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques Used in Paleolimnology, in: Last, W.M., Smol, J.P. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques* (pp. 1-5). Dordrecht: Springer Netherlands.

Liu, W., Xiahong, Feng, Y., Ning, Q., Zhang, Y., Cao, Z., & An, N. (2005). $\delta^{13}C$ variation of C3 and C4 plants across an Asian monsoon rainfall gradient in arid northwestern China. Global Change Biology *11*, 1094-1100.

Lu, H., Liu, Z., Wu, N., BernÉ, S., Saito, Y., Liu, B. & Wang, L.U.O. (2002). Rice domestication and climatic change: phytolith evidence from East China. *Boreas*, *31*, 378-385.

Maloney, B.K. (1996). A 10,600 year pollen record from Nong Thale Song Hong, Trang Province, South Thailand. *Indo-Pacific Prehistory Association Bulletin*, *18*, 129-137.

Meyers, P.A., & Ishiwatari, R. (1993). Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, *20*, 867-900.

Meyers, P.A., & Teranes, J.L. (2001). "Sediment Organic Matter." In: Last, W.M., Smol, J.P. (Ed.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Physical and Geochemical Methods* (pp. 239-269). Dordrecht: Springer Netherlands.

Penny, D., (1998). Late Quaternary palaeoenvironments in the Sakon Nakhon basin, north-east Thailand. Unpublished PhD thesis. School of Geography and Environmental Science, Monash university, Melbourne, Australia, 260 pp.

Penny, D. (2001). A 40,000 year palynological record from north-east Thailand; implications for biogeography and palaeo-environmental reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *171*, 97-128.

Penny, D., & Kealhofer, L. (2005). Microfossil evidence of land-use intensification in north Thailand. *Journal of Archaeological Science*, *32,* 69-82.

Rugmai W. (2006). The paleoenvironmental and vegetation change during the late Quaternary period of southern Thailand from the palynological record. PhD Thesis, Department of Environmental Biology, Suranaree University of Technology, Thailand.

Verellen, J.E.F., Dessein, S., Razafimandimbison, S.G., Smets, E., & Huysmans, S., 2007. Pollen morphology of the tribes Naucleeae and Hymenodictyeae (Rubiaceae – Cinchonoideae) and its phylogenetic significance. *Botanical Journal of the Linnean Society*, *153*, 329-341.

White, J.C., Penny, D., Kealhofer, L., & Maloney, B., 2004. Vegetation changes from the late Pleistocene through the Holocene from three areas of archaeological significance in Thailand. *Quaternary International*, *113*, 111-132.

Whitlock, C. & Larsen, C. (2001). Charcoal as a Fire Proxy, in: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M., Bradley, R.S., Alverson, K. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators* (pp. 75-97). Dordrecht: Springer Netherlands.

Wohlfarth, B., Klubseang, W., Inthongkaew, S., Fritz, S.C., Blaauw, M., Reimer, P.J., Chabangborn, A., Löwemark, L., & Chawchai, S. (2012). Holocene environmental changes in northeast Thailand as reconstructed from a tropical wetland. *Global and Planetary Change*, 92–93, 148-161.