

Note

멕시코만 코어 퇴적물(ODP 625B)의 식물왁스 탄화수소(*n*-alkanes)와 지방산(*n*-alkanoic acids)의 생성기원 비교 연구

서연지\*

한국해양과학기술원 대양자원연구센터  
(49111) 부산광역시 영도구 해양로 385

Contrasting Sources of Plant Wax *n*-alkanes and *n*-alkanoic Acids in Gulf of Mexico Sediments (ODP 625B)

Yeon Jee Suh\*

Global Ocean Research Center, KIOST  
Busan 49111, Korea

**Abstract :** Long chain plant waxes (*n*-alkanes, *n*-alkanoic acids, and *n*-alcohols) and their carbon isotopic compositions ( $\delta^{13}\text{C}$ ) in geologic archives are valuable tools for paleovegetation reconstruction. However, the sensitivity of different plant wax constituents to vegetation shift is not well understood. This study explores controls on the variation in  $\delta^{13}\text{C}$  values of long-chain *n*-alkanes ( $\text{C}_{27}$  to  $\text{C}_{33}$ ) and *n*-alkanoic acids ( $\text{C}_{26}$ – $\text{C}_{30}$ ) in the Gulf of Mexico core sediments (ODP 625B) near the Mississippi River delta. *n*-Alkanoic acids'  $\delta^{13}\text{C}$  values were higher than those of *n*-alkanes by 1–2‰ on average and such a pattern is the opposite from their isotope fractionation observed in living plants: 1–2‰ smaller in *n*-alkanes than *n*-alkanoic acids. We attribute this offset to contributions from aquatic plants or microbes that produce high concentrations of  $^{13}\text{C}$ -enriched long-chain *n*-alkanoic acids. The sensitivity of *n*-alkanes and *n*-alkanoic acids to vegetation and climate varied among chain lengths. The *n*- $\text{C}_{33}$  alkanes were most sensitive to  $\text{C}_4$  grassland expansion among *n*-alkane homologues, while no specific trend was observed in *n*-alkanoic acids. This is due to the similarity in *n*-alkanoic acid concentrations between  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  plants by homologues and low terrestrial plant-derived *n*-alkanoic acid contributions to the sediments. The results of this study suggest that long chain *n*-alkanoic acids'  $\delta^{13}\text{C}$  values in sediments may be influenced by contributions from different sources such as aquatic plants or microbial inputs and therefore interpretations regarding this matter should be cautiously formulated. We suggest that there is a need for further studies on characterizing long-chain *n*-alkanoic acids ( $\text{C}_{26}$ – $\text{C}_{34}$ ) in aquatic plants and microbes from various climates and environments in order to investigate their production and integration into sedimentary archives.

**Key words :**  $\text{C}_3$  plant,  $\text{C}_4$  plant, compound-specific stable isotope analysis, paleovegetation, paleoclimate, Mississippi River Basin

1. 서론

식물왁스(plant wax 또는 *n*-alkyl lipid)는 육상식물 잎

의 표면에 발달하는 큐티클 층에서 생성되는 지질성분으로, 수분 손실을 억제하고 병원균 침투와 자외선으로부터 식물을 보호하는 역할을 한다(Eglinton et al. 1962; Eglinton and Hamilton 1967). 식물왁스의 탄소 안정동위 원소비( $\delta^{13}\text{C}$ ) 및 성분 분포는 과거에 서식했던 식생과 환

\*Corresponding author. E-mail : yjsuh@kiost.ac.kr

경에 대한 정보를 효과적으로 보존하고 있다는 점에서, 고식생 고기후와 탄소순환 연구를 위한 유용한 지표로 활용되고 있다(Castañeda et al. 2016; Freeman and Pancost 2014; Kirby et al. 2013; Suh and Hyun 2018; Tipple and Pagani 2010). 식물왁스의  $\delta^{13}\text{C}$  값은 광합성과 지질합성이라는 두 가지 과정에서 일어나는 동위원소비의 조성변화 즉 분별작용을 반영한다.

우선 광합성에 의한 분별작용( $\Delta_{\text{leaf}}$  또는  $\epsilon_{\text{leaf-CO}_2}$ )은 대기 중 이산화탄소와 식물 잎의  $\delta^{13}\text{C}$  값 차이를 일컬으며, 식물의 광합성 경로 및 강우량에 따라 달라진다(Farquhar et al. 1989; O'Leary 1981). 일례로 육상식물은 광합성 경로에 따라  $\text{C}_3$  식물,  $\text{C}_4$  식물, CAM 식물로 구분된다. 이 세 가지 식물의  $\Delta_{\text{leaf}}$  값은 합성기작의 차이에 의해 달라지는데, 그에 따라  $\delta^{13}\text{C}$  값 역시 뚜렷이 구분된다. 대부분의 수목류를 차지하는  $\text{C}_3$  식물은 일반적으로 기온이 낮고 수분이 충분한 지역에 서식하며, 탄소 안정동위원소의 분별작용은  $20 \pm 2\%$ 로 큰 편이다(Diefendorf and Freimuth 2017). 반면 대부분 초본류로 이루어진  $\text{C}_4$  식물은 고온 건조한 기후와 높은 광량, 낮은  $\text{CO}_2$  농도에 적응한 식물로, 탄소 안정동위원소의 분별작용은  $\text{C}_3$  식물에 비해 낮은 3.5%로 나타난다(Lloyd and Farquhar 1994). 특히  $\text{C}_3$  식물의 분별작용은 연평균 강우량에 따라 달라지는데, 기후가 건조할수록  $\delta^{13}\text{C}$  값이 높아진다(Diefendorf et al. 2010).

다음으로 지질합성 과정에서 일어나는 탄소의 분별작용은 잎과 지질성분의  $\delta^{13}\text{C}$  값 차이( $\epsilon_{\text{wax-leaf}}$ )를 뜻한다. 식물은 초산 생성경로(acetogenic pathway)를 통해 장족형 탄화수소(*n*-alkane,  $\text{C}_{25}\text{-C}_{35}$ ), 지방산(*n*-alkanoic acid,  $\text{C}_{26}\text{-C}_{36}$ ), 알코올(*n*-alkanol,  $\text{C}_{26}\text{-C}_{36}$ ) 등의 식물왁스를 합성하는데, 이들은 모두 동일한 전구체인 acetyl coenzyme-A (acetyl CoA)로부터 생성된다(Chikaraishi 2014; Freeman and Pancost 2014). 이중 가장 일반적으로 사용되는 것은 고식생 프록시인 장족형 탄화수소이다(Suh and Diefendorf 2018). 하지만 분석의 용이함 또는 해석의 정확성 향상을 위해, 장족형 탄화수소 대신 지방산과 알코올 분석으로 대체하거나 이들을 병행하기도 한다(Feakins et al. 2019; Kirby et al. 2013).

식물왁스 성분의 생산량은 식물의 종에 따라 다르다(Diefendorf and Freimuth 2017; Freimuth et al. 2017). 일례로  $\text{C}_4$  초본류가  $\text{C}_{33}$  탄화수소를 많이 생성한다면  $\text{C}_3$  수목류는  $\text{C}_{29}$  탄화수소의 생산량이 높다(Garcin et al. 2014; Rommerskirchen et al. 2006; Vogts et al. 2009). 반면 지방산의 경우 사슬길이에 따른 육상식물 간 농도 차이가 뚜렷하지 않다(Chikaraishi and Naraoka 2007). 따라서 식생과 강우량의 변화에 대한 식물왁스의 민감도는 그 성분과 사슬길이에 따라 상이하게 나타날 것으로 판단된다(Chikaraishi and Naraoka 2007; Diefendorf et al. 2011;

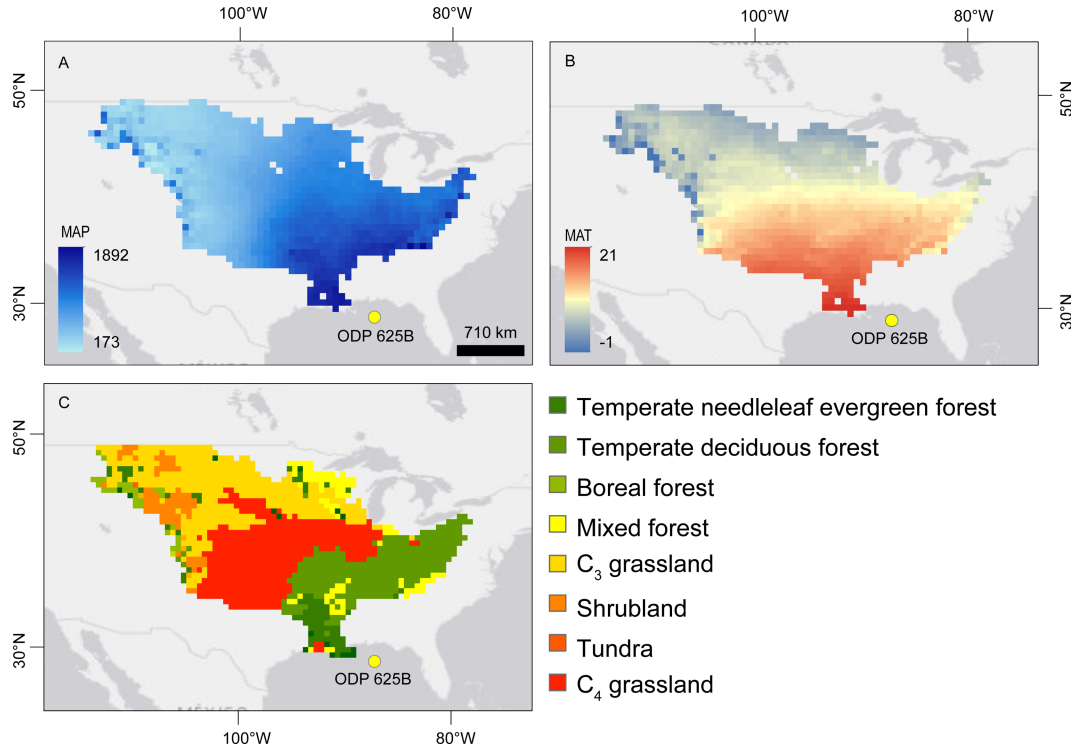
Hemingway et al. 2016; Rommerskirchen et al. 2006). 뿐만 아니라 퇴적환경에 따라 식물왁스 성분의 보존을 역시 달라지는데(Meyers and Eadie 1993; van Dongen et al. 2008), 이는 퇴적물의 식물왁스 성분분포 및 안정동위원소비 해석에 영향을 미칠 수 있다(Gao et al. 2011). 그럼에도 불구하고 식물왁스의 성분별 생산량 및 보존을 차이가 퇴적물을 활용한 식물왁스 기반의 고환경 해석에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다(Makou et al. 2018; Naraoka and Ishiwatari 1999). 이에 본 연구는 미시시피강 하구에 위치한 ODP 625B 코어 퇴적물에 보존되어 있는 장족형 탄화수소와 지방산의  $\delta^{13}\text{C}$  값( $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 와  $\delta^{13}\text{C}_{\text{acid}}$ )을 비교 분석함으로써, 과거 15만 년 동안의 고식생에 대한 해석에서 발생하는 차이점을 밝히는 데 목적을 두었다.

최종빙기와 최종간빙기를 포함하는 과거 15만 년은 환경적으로 현재 시기와 밀접한 관련이 있다. 현재 다양한 식생( $\text{C}_3$  식물,  $\text{C}_4$  식물)과 환경이 존재하는 미시시피강 유역은 과거 지질시대 동안 지구의 기후변화에 따라 식생변이를 겪어왔다(Delcourt et al. 1980; Harrington and Harman 1991; Royall et al. 1991; Tipple and Pagani 2010). 따라서 본 연구에서는 장족형 탄화수소와 지방산 두 가지 지질성분의 비교 분석을 통해, 미시시피강 유역 식생변화의 민감도뿐만 아니라 식물왁스의 기원 및 보존을 차이에 대해서도 고찰해보고자 한다. 본 연구의 결과는 식물왁스 성분을 활용한 고식생, 고환경 해석의 정확성을 제고하기 위한 자료로 제공되는 데 의의가 있다.

## 2. 연구지역 및 ODP 625B 코어

미국에서 가장 큰 수계인 미시시피강에는 다양한 기후와 식생이 분포한다(Kammerer 1987). 미시시피강 유역의 연평균 강수량은 800 mm인데, 서부는 140 mm로 낮은 반면 동부는 2300 mm로 매우 높다(Fig. 1A; <http://prism.oregonstate.edu>). 이러한 동서 지역간 강수량의 차이는 식생분포와의 연관성을 보여준다(Harrington and Harman 1991). 즉 서부는 대평원(Great Plains)이라 불리는 온대 초원지대라면 동부는 대부분 삼림지대라는 차이점이 강수량의 차이를 야기한다.

Ramankutty and Foley (2010)는 인간활동이 배제된 자연의 식생분포를 예측한 연구 결과를 보고하였다. 그 결과에 의하면 미시시피강 유역은 초원이 55%, 온대 낙엽림 23%, 온대 침엽림 및 상록수림 6%, 혼합림 6%, 관목림 6%, 북방수림 2%, 툰드라 1%로 구성되었다(Fig. 1C). 연평균 기온은 11°C인데, 남부지역은 평균 23°C로 높은 반면 북서지역은 -4°C로 낮은 편이다(Fig. 1B). 한편 남북의 기온 차 및 강수 시기는 대평원의  $\text{C}_3$ 와  $\text{C}_4$  초목류 분포에



**Fig. 1.** (A) 30-year average mean annual precipitation (MAP), (B) mean annual temperature (MAP; prism.oregonstate.edu) in the MRB, (C) spatial distribution of biomes for current climate without human alteration (Ramankutty and Foley 2010 with modification). Yellow dot indicates location of the ODP 625B core used in this study

영향을 준다. 기온 교차 접근법(temperature crossover approach)을 이용하여(Still et al. 2003) 전체면적의 55%를 차지하는 대평원의 C<sub>3</sub>와 C<sub>4</sub> 초본류 분포를 추정할 결과, 북방형 C<sub>3</sub> 목초는 26%를 그리고 남방형 C<sub>4</sub> 목초는 29%를 차지하는 것으로 나타났다(Suh et al. 2019).

ODP 625B 코어는 미시시피강 하구로부터 약 200 km 떨어진 멕시코만 북동쪽 해역(북위 28.82°, 서경 87.15°) 수심 889 m에서 획득되었다(Fig. 1). 코어 연대는 상부 98 cm에서 3개의 방사성 탄소 동위원소 분석과 그 외 구간에서 유공충 산소 동위원소 결과로부터 정립된 기존의 연구결과를 활용하였다(Dowsett 1999; Joyce et al. 1990, 1993; Limoges et al. 2014). 본 연구에서는 과거 15만년에 해당하는 상부 16.5 m 지점에서 총 32개의 퇴적물 시료를 채취하여 지질추출과 탄소안정 안정동위원소 분석을 실시하였다. 퇴빙기에 결층(Hiatus)이 발견되었다는 기존 연구 결과가 있으나, 정확한 연대는 아직 보고된 바 없다(Limoges et al. 2014).

### 3. 연구방법

퇴적물 시료를 동결 건조 후 분쇄기를 사용하여 균질화

하였다. 약 20 g의 퇴적물 시료를 가속 용매 추출기(Dionex 200)를 이용하여 지질성분을 추출하였다. 이때 사용된 혼합 유기용매는 CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>:MeOH (2 : 1, v/v)이며, 압력은 ~1100 psi, 온도는 100°C로 설정하여 총 3번에 걸쳐서 추출하였다. 추출된 시료에 0.5N KOH in MeOH/H<sub>2</sub>O (3 : 1, v/v) 3 mL을 첨가하여 75°C에서 2시간 동안 가열하였다. 상온에서 열을 식힌 후, NaCl 2.5 mL을 첨가하고 6N HCl로 산성화하였다. 혼합 유기용매 Hexanes/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> (4 : 1, v/v)을 첨가하고 잘 흔들어 준 후 상층액을 새 용기에 옮겨 담고, 5% NaHCO<sub>3</sub>를 첨가하여 중성화 하였다. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 첨가하여 수분을 제거하였다.

아미노 프로필이 결합된 실리카겔 컬럼을 이용하여 중성지방(탄화수소)과 극성지방(지방산)을 분리하였다. 탄화수소는 4 mL hexane, 케톤은 8 mL hexanes/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> (6 : 1, v/v), 알코올은 8 mL CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/acetone (9 : 1, v/v), 지방산은 8 mL CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/85% formic acid (49 : 1, v/v)를 컬럼에 용리시켜 분리하였다. 지방산은 탄소 안정동위원소비를 미리 측정해둔 95 : 5 MeOH/12 N HCl (v/v)을 1.5 mL 첨가하여 70°C에 12-18시간 가열하여 유도체화하였다. Hexane으로 지방산 메틸에스테르를 추출하고 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 첨가하여 수분을 제거하였다.

탄화수소와 지방산 메틸에스테르는 electron-impact ionization(70 eV)과 quadrupole mass selective detector (MSD, Agilent 5975C)가 연결된 GC-MS 및 FID(gas chromatography-mass spectrometer 및 flame ionization detector, Agilent 7890A)를 사용하여 분리, 분석하였다. 분석에 사용된 컬럼은 DB-5(길이 30 m, 직경 0.25 mm, 필름두께 25  $\mu\text{m}$ ; Agilent J & W)이고, 보호 컬럼은 Restek Rxi(길이 5 m, 직경 0.32 mm)를 사용하였다. 이동상 가스는 헬륨을 사용하였으며, 온도조건은 1분 동안 60°C 유지 후, 6°C/분 속도로 320°C까지 증가하고, 그 이후 15분간 320°C에서 온도를 유지하였다. 탄화수소와 지방산은 표준물질, 라이브러리 데이터베이스(NIST 2008), 스펙트럼 라이브러리 및 retention time을 이용하여 정성 분석되었다.

$\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  분석에 앞서, 5% 질산이 침윤된 실리카겔 컬럼에 hexane과 ethyl acetate를 각각 4 mL 용리하여 포화 및 불포화 탄화수소를 분리하였다. 분리된 포화 탄화수소는 Thermo Trace GC Ultra를 부착한 Thermo Electron Delta V Advantage 안정동위원소 질량 분석기를 사용하여 분석되었다. GC 온도는 탄화수소 정량 분석할 때와 동일하게 하고 온도 증가 속도를 8°C/분으로 설정하였다. 표준물질로 Mix A5(인디애나 대학의 Arndt Schimmelmann,  $n\text{-C}_{16}$ - $n\text{-C}_{30}$ )가 사용되었고, 국제표준물질 VPDB에 대한  $\delta$ 값으로 환산하였다(Coplen 2011; Coplen et al. 2006).  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  분석의 정확도와 정밀도는 각각 0.1‰( $n = 78$ ) 및 -0.1‰( $n = 78$ )이다. 지방산은 미리 알려진 표준물질 phthalic acid(인디애나 대학의 A. Schimmelmann)의 동위원소비와 유도된 methyl phthalate를 이용하여 치환된 탄소의 안정동위원소비를 계산하였다(Polissar and D'Andrea 2014). 제4기동안 겪은 대기 중 이산화탄소  $\delta^{13}\text{C}$  값의 변동을 감안하기 위해 탄화수소와 지방산  $\delta^{13}\text{C}$  값은 빙하코어에 기록된 대기 중 이산화탄소  $\delta^{13}\text{C}$  비를 활용하여 보정되었다(Tipple et al. 2010).

#### 4. 결과 및 토의

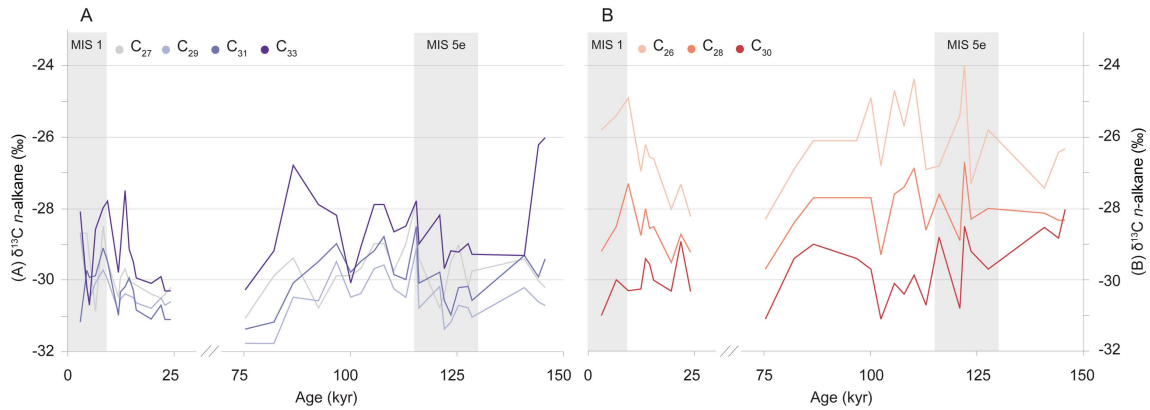
탄화수소는 초산 생성경로를 통해 Acetyl coA로부터 생성된 짧은 사슬 지방산의 연장(elongation) 및 탈탄산화(decarboxylation) 과정에서 형성되는 합성물질이다(Eglinton and Hamilton 1967; Kunst and Samuels 2003). 탈탄산화 과정에서 카르보닐 탄소를 잃게 되면서(carboxyl carbon), 탄화수소는 짝수보다 홀수의 탄화수소가 우세한 분포를 띠게 된다. 반대로 지방산은 홀수보다 짝수의 탄화수소가 우세한 분포를 띤다. 이는 육상식물 기원 왁스성분의 탄소사슬 길이 분포의 특징으로, 탄소선호지수(Carbon Preference Index, CPI)를 통해 그 분포를 파악할 수 있다

(Bray and Evans 1961). CPI 값이 높을수록(> 1) 열 성숙 작용을 받지 않은 식물왁스의 기여도가 높다는 것을 나타낸다면, 값이 낮을수록(< 1) 열적 진화과정에 영향을 받은 것을 의미한다. 분석결과 ODP 625B 코어의 탄화수소 CPI 값은 2.6-11.2로 나타났는데, 이는 열 성숙도가 낮은 육상식물 기원 유기물이 유입된 사실을 증명해준다.

$\text{C}_4$  식물은  $n\text{-C}_{33}$ ,  $n\text{-C}_{35}$ 와 같이 탄소사슬 길이가 긴 탄화수소를 많이 생성하는 반면,  $\text{C}_3$  식물은  $n\text{-C}_{29}$ 와  $n\text{-C}_{31}$ 을 주로 생성한다(Garcin et al. 2014; Rommerskirchen et al. 2006; Vogts et al. 2009). 이러한 생산량 차이로 인해  $n\text{-C}_{33}$ 은  $\text{C}_4$  식물 분포변화에 한층 민감하다(Suh et al. 2019). 따라서  $n\text{-C}_{33}$ 의  $\delta^{13}\text{C}$  값이 높을수록 초목류가 증가하거나 기후가 건조해진 것을 나타내며, 낮을수록 수목류가 증가하거나 환경이 다습하였음을 의미한다.

가장 최근의 간빙기인 최종간빙기 최온난기(Marine Isotope Stage 또는 MIS 5e; 130-115 kyr)는 현재에 비해 지구 평균기온은 2°C 가량 높았지만 빙하 규모는 낮았다(Otto-Bliesner et al. 2013; Shackleton 1969). MIS 5e 초기의  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  값은 ~31‰로 비교적 낮았지만 말기로 갈수록 ~2‰ 가량 상승하였다. 이는 MIS 5e 초기에서 말기로 갈수록 기후가 건조해지고 초본류가 확장하였음을 의미한다(Fig. 2). 이러한 건조한 기후는 MIS 5c 시기까지 지속되다가 그 이후  $\text{C}_3$  식물이 우세하게 나타나는 한랭한 기후로 전환되었다. 반면 최종빙기 동안에는  $\text{C}_3$  식물이 우세하였지만, 홀로세로 접어들면서  $\text{C}_4$  식물이 증가하였고 기후도 점차 건조해졌다. 이러한 결과는 미대륙 중심부 기반 코어 퇴적물에 대한 화분분석 결과와 일치한다. 즉 최종빙기에는 아한대 침엽수와 온대 낙엽수림이 우세하였다면, 홀로세로 갈수록 온대 낙엽수림과  $\text{C}_4$  초본류가 증가하는 환경으로 전환되었음을 증명해준다(Delcourt et al. 1980; Harrington and Harman 1991; Royall et al. 1991). 그 이유는 기후가 온난해지고 여름철 강수량이 증가하면서  $\text{C}_4$  식물 생장에 유리한 환경으로 바뀌었기 때문이다(Epstein et al. 1997; Paruelo and Lauenroth 1996).

한편,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{acid}}$ 비는  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  결과와 유사하게 빙기에는 낮은 값을 보인 반면 간빙기에는 높은 값을 보였다(Fig. 2). 이는 빙기에는  $\text{C}_3$  식물이 우세하게 나타났지만 간빙기에는  $\text{C}_4$  식물이 확장하였음을 의미한다. 다만 두 지질성분은 시기별로 약간의 차이를 보여준다. 즉  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  값은 MIS 5e 초기에서 말기로 갈수록  $\text{C}_4$  식물이 점차 확장하고 기후가 건조해졌음을 나타낸다. 반면  $\delta^{13}\text{C}_{\text{acid}}$  값은 MIS 5e 동안 식생 및 기후의 변동이 컸고, 12.2만년 전에는  $\text{C}_4$  식물이 과거 15만년 중 최대치로 확장하였음을 나타낸다.  $\text{C}_4$  식물은 특히 최종빙기에서 홀로세로 넘어오면서 증가하였다. 이는 탄화수소 기반 분석결과와 동일한 결과로 기온이 온난 건조해졌음을 의미한다. 이와 같이 두



**Fig. 2.** Temporal changes in (A)  $\delta^{13}C_{alk}$  values (%) for  $C_{27}$ ,  $C_{29}$ ,  $C_{31}$ , and  $C_{33}$ , (B)  $\delta^{13}C_{acid}$  values (%) for  $C_{26}$ ,  $C_{28}$ , and  $C_{30}$  from Gulf of Mexico sediments (ODP 625B) during the last 150 kyr

가지 지질성분에 반영된 수천 년 규모의  $C_4$  식물 확장/축소 행태는 유사하였지만, 식생과 기후 변화의 정도 및 정확한 시기는 차이가 있었다. 시간적 변화에 따른 보다 정확한 해석을 내리기 위해서는 고해상도 분석이 요구된다.

두 지질성분의  $\delta^{13}C$  값 차이는 다음 네 가지에서 기인한다. 즉 1) 지질합성 과정에서 발생하는 분별작용의 차이, 2) 미시시피강 유역에 서식하는 다양한 생물군집의 식물왁스 생산량 및 이동량 차이, 3) 장죽형 왁스성분을 생성하거나 포함하는 육상식물 외 유기물질의 유입, 4) 보존률 차이 등으로 유추해볼 수 있다. 초산 생성경로를 통한 지질합성 과정의 분별작용은 2.4–9.9‰ 정도이다. 탄화수소는 지방산에 비해 평균  $1.4 \pm 1.1\%$  적게 일어나  $\delta^{13}C$  값은 조금 높은 편이다(Chikaraishi and Naraoka, 2007). 두 가지 지질성분 간에 분별작용의 차이가 생기는 이유는 탈탄산화 과정에서 탄화수소가 생성될 때 가벼운 탄소 ( $^{12}C$ )가 우선적으로 제거되기 때문이다(Chikaraishi and Naraoka 2007). 본 연구에서는 ODP 625B 코어에 대한 탄화수소( $C_{27}$ ,  $C_{29}$ )와 지방산( $C_{28}$ ,  $C_{30}$ )의  $\delta^{13}C$  값을 비교하기 위해, 아래 식을 이용하여 동일한 사슬길이에 해당하는 두 값의 차이를 계산하였다(Chikaraishi and Naraoka 2007).

$$\epsilon_{alk-acid} = 1000[(\delta^{13}C_{alk} + 1000)/(\delta^{13}C_{acid} + 1000)]$$

그 결과  $n-C_{28}$  지방산은  $n-C_{27}$  탄화수소에 비해 평균  $1.7 \pm 0.8\%$ ( $\epsilon_{alk-acid}$  range = -3.8–0.5‰) 높았고,  $n-C_{30}$  지방산은  $n-C_{29}$  탄화수소에 비해 평균  $0.7 \pm 1.2\%$ ( $\epsilon_{alk-acid}$  range = -3.0–2.4‰) 높았다. 이는 현생식물에서 탄화수소가 지방산에 비해 1.4‰ 높은 것과 상반되는 결과이다. 퇴적물에서의  $\delta^{13}C_{alk}$ 비와  $\delta^{13}C_{acid}$ 비를 분석한 기존 연구결과들 역시 본 연구결과와 동일하게 지방산이 탄화수소에 비해 높게 나타났다. Naraoka and Ishiwatari (1999)는 일

본 오쓰치강에서부터 북태평양 연안과 외양에 걸쳐 표층 퇴적물을 채집하여 식물왁스  $\delta^{13}C$  값의 공간적 분포 변화를 분석하였다. 그 결과 하천퇴적물에서는 탄화수소  $\delta^{13}C$  값이 0–3.9‰ 높게 나타난 반면, 해양으로 갈수록 지방산의  $\delta^{13}C$  값이 0–5.5‰ 더 높게 나타났다. 뿐만 아니라 북동대서양 해양 퇴적물의 분석결과에서도  $\delta^{13}C_{acid}$ 가  $\delta^{13}C_{alk}$ 에 비해 높게 나타났다(Huang et al. 2000).

호수퇴적물 또는 해양퇴적물에서  $\delta^{13}C_{acid}$ 가  $\delta^{13}C_{alk}$ 에 비해 높게 나타난 원인은 분별작용의 차이 때문이 아니라, 장죽형 식물왁스 성분을 가진 유기물질(수생식물, 미세조류, 미생물)이 유입되었거나 탄화수소와 지방산 간에 분해율 차이가 나타났기 때문으로 보인다(Makou et al. 2018). 일반적으로 장죽형 지방산( $>C_{26}$ )은 육상 고등식물의 기원으로 알려져 있지만 일부 수생식물, 미세조류, 미생물 역시 장죽형 지방산을 생산한다(Ficken et al. 2000; Gelpi et al. 1970; Liu and Liu 2016; Makou et al. 2018). 수생식물 군집도가 높은 호수퇴적물에서는  $C_{26}$ 과  $C_{28}$  농도가 높게 검출되었고(Ishiwatari et al. 2006; Zhang et al. 2017), 미생물 생물량이 높은 부분순환호 퇴적물에서는 미생물 기원 장죽형 지방산의 농도가 높게 나타났다(Makou et al. 2018). 육상식물은 탄화수소를 지방산에 비해 1.5–20배가량 높게 생산한 반면(Freimuth et al. 2017), 수생식물의 지방산 총 농도( $C_{20}$ – $C_{32}$ )는 탄화수소 총 농도( $C_{21}$ – $C_{33}$ )에 비해 2–110배 높았다(Ficken et al. 2000; Gao et al. 2011; Volkman et al. 1998; Zhang et al. 2019; Zhang et al. 2017). 수생식물의 장죽형 지방산  $\delta^{13}C$  값 역시 -22.0–-27.5‰로 육상식물에 비해 10–15‰ 높았다(Chikaraishi et al. 2004).

이와 같이 ODP 625B 코어 퇴적물의 지방산  $\delta^{13}C$  값이 탄화수소에 비해 높은 것은 수생식물 기원 지방산이 유입된 결과로 추정된다. 따라서 보다 구체적인 장죽형 지방산

기원을 분별하기 위해서는 미시시피강 유역과 멕시코만에 서식하는 수생식물, 미세조류, 미생물의  $\delta^{13}\text{C}$  값 및 농도를 분석할 필요가 있다. 즉 지방산의 탄소사슬 길이에 따라  $\delta^{13}\text{C}$  변화 정도가 달라졌는데, 빙기/간빙기 순환시기 동안  $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_{30} \text{ acid}}$ 의 변화는  $\text{C}_{26}$ 과  $\text{C}_{28}$ 의 변화에 비해 뚜렷하지 않았다(Fig. 2). 이는 장족형 지방산의 탄소사슬 길이에 따라 유기물 기원에 차이가 있다는 것을 의미한다.

한편 바이오마커 보존율 또한 고환경 해석에 영향을 주는 중요한 요소이다. 식물왁스는 퇴적물에 저장되어 있는 동안 또는 강을 통해 이동하는 과정에서 분해와 속성작용을 겪게 된다. 탄소와 수소로만 이루어진 유기 화합물인 장족형 탄화수소는 퇴적물 속성 변질작용에 대한 저항력이 크고 보존율도 높은 편이다(Meyers and Eadie 1993; van Dongen et al. 2008). 그에 비해 지방산과 알코올처럼 산소를 포함하는 작용기를 갖거나 이중결합을 함유하는 유기화합물은 미생물에 취약할 수 있다. 미생물에 의한 분해가 식물왁스  $\delta^{13}\text{C}$  값에 미치는 영향 및 그 정도에 대해서는 아직 논쟁의 여지가 있다. 미생물에 의한 분해로  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  값이 1~4‰ 증가한다는 연구도 있지만(Li et al. 2017; Nguyen Tu et al. 2004; Wu et al. 2019) 그 영향이 미미하다고 보고된 연구도 존재한다(Tu et al. 2011; Wang et al. 2014; Zech et al. 2011). 이러한 결과 차이는 퇴적물의 지화학적 특성 및 미생물 군집 차이 때문으로 생각된다. 이는 식물의 종, 미생물 군집, 퇴적환경 등에 따른 식물왁스 성분의 분해 및  $\delta^{13}\text{C}$  변화에 대한 심도 있는 연구가 필요함을 제기한다.

퇴적물 식물왁스의 연대 측정 및 열 성숙도 분석은 유기물 분해 정도 또는 재동 퇴적물 유입을 예측하는 방법 중 하나이다. Wakeham et al. (2009)의 미시시피강 하부 표층퇴적물 지방산의 방사성 탄소 동위원소( $^{14}\text{C}$ ) 연대를 측정된 결과, 715~2,150 yr BP로 나타났다. 이러한 결과는 대부분의 표층퇴적물이 비교적 최근에 합성된 지질성분으로 구성되었으며, 따라서 미시시피강 하부에 퇴적되기까지 약 1~2천 년이 걸린다는 것을 보여준다. 이 정도의 지연현상은 15만 년에 걸친 기록을 해석하는 데 큰 문제가 없다. 미생물에 의한 분해에 따른  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  값의 증가를 배제할 수는 없지만, 열적 진화과정이나 재동된 퇴적물에 의한 영향은 낮을 것으로 예상된다. 그 이유는 앞서 언급한 바와 같이 ODP 625B 코어의 CPI 값이 높았고 홀수 우세성이 뚜렷하게 나타났기 때문이다.

## 5. 결 론

본 연구는 ODP 625B 코어에 보존된 장족형 탄화수소의  $\delta^{13}\text{C}$  값과 지방산의  $\delta^{13}\text{C}$  값을 비교하여 고식생 해석에서 발생하는 차이점을 분석하였다. 기존 연구결과에 따

르면 현생식물의 탄화수소는 지방산에 비해 지질합성 과정 분별작용이 평균 1.4‰ 가량 적어  $\delta^{13}\text{C}$  값이 높게 나타났다. 반면 해양퇴적물을 분석한 본 연구결과 등에 따르면, 대체로 지방산의  $\delta^{13}\text{C}$  값은 탄화수소의  $\delta^{13}\text{C}$  값에 비해 높게 나타났다. 이는 지질합성 과정 분별작용의 차이 때문이 아니라, 수생식물과 같이 장족형 지방산의 농도 및  $\delta^{13}\text{C}$  값이 높은 유기물이 유입되었을 가능성을 제시해준다. 또한 탄화수소에 비해 지방산의 보존율이 낮다는 점에서, 지방산의  $\delta^{13}\text{C}$  값을 활용한 고환경 해석에 있어 수생식물 기원 유기물의 유입 및 지방산 보존율을 고려하는 것이 필요함을 보여준다. 따라서 다양한 환경에서 서식하는 수생식물의 지방산 생산량 및  $\delta^{13}\text{C}$  값에 대한 연구와 함께, 퇴적환경과 미생물 군집에 따른 식물왁스 보존율과 그에 따른  $\delta^{13}\text{C}$  값 변화에 대한 연구가 요구된다.

한편 탄화수소와 지방산은 사슬길이에 따라 변화패턴이 달랐는데, 이는 식생과 기후변화에 대한 민감도 차이를 야기한다. 예를 들어  $\text{C}_4$  식물 확장에 대해서는 탄화수소  $\text{C}_{33}$ 의 민감도가 가장 높은 반면 지방산  $\text{C}_{30}$ 의 민감도는 낮았다. 이는 육상식물 기원 지방산의 농도 및 유입량이 낮고, 탄소사슬 길이에 따른  $\text{C}_3$  식물과  $\text{C}_4$  식물의 생산량 차이가 적기 때문이다. 이러한 결과는 ODP 625B 코어에서 탄화수소가 고식생 고기후 변화에 민감하며, 따라서 육상식생과 기후변화 지표로 보다 적합하다는 것을 의미한다. 향후 연구에서는 다양한 환경조건과 식생에서 기원한 퇴적물 속의 식물왁스와 현생식물의 식물왁스를 비교하여 성분별 차이점을 연구하는 것이 필요하다. 특히 본 연구에서 분석하지 못한  $\text{C}_{32}$ 와  $\text{C}_{34}$ 와 같이 긴 사슬 지방산의  $\delta^{13}\text{C}$  값을 비교 분석할 필요가 있다.

## 사 사

ODP625B 코어 시료를 제공해주신 IODP 사업단과 시료 전처리와 분석에 도움을 주신 Lindsay Sommer씨와 식물왁스의 탄소동위원소 분석에 도움을 주신 Aaron Diefendorf 교수님께 감사 드립니다. 본 연구는 한국해양과학기술원이 수행하는 국제해저지각시추사업(K-IODP, PM60920)의 지원을 받았고, 자료해석과 논문작성에 필요한 인건비를 대양사업과제(PE99724)와 국제기구대응과제(20160099)로부터 지원받았습니다. 초고를 검토 해주신 주세종 박사님과 익명의 심사위원님들께도 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

Bray E, Evans E (1961) Distribution of n-paraffins as a clue to recognition of source beds. *Geochim Cosmochim Acta*

- 22:2–15
- Castañeda IS, Caley T, Dupont L, Kim J-H, Malaizé B, Schouten S (2016) Middle to late pleistocene vegetation and climate change in subtropical southern East Africa. *Earth Planet Sc Lett* **450**:306–316
- Chikaraishi Y (2014)  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  signatures in plants and algae. In: Holland HD, Turekian KK (eds) *Treatise on geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp 95–123
- Chikaraishi Y, Naraoka H (2007)  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta\text{D}$  relationships among three *n*-alkyl compound classes (*n*-alkanoic acid, *n*-alkane and *n*-alkanol) of terrestrial higher plants. *Org Geochem* **38**:198–215
- Chikaraishi Y, Naraoka H, Poulson SR (2004) Hydrogen and carbon isotopic fractionations of lipid biosynthesis among terrestrial (C3, C4 and CAM) and aquatic plants. *Phytochemistry* **65**:1369–1381
- Delcourt PA, Delcourt HR, Brister RC, Lackey LE (1980) Quaternary vegetation history of the Mississippi embayment. *Quaternary Res* **13**:111–132
- Diefendorf AF, Freeman KH, Wing SL, Graham HV (2011) Production of *n*-alkyl lipids in living plants and implications for the geologic past. *Geochim Cosmochim Ac* **75**:7472–7485
- Diefendorf AF, Freimuth EJ (2017) Extracting the most from terrestrial plant-derived *n*-alkyl lipids and their carbon isotopes from the sedimentary record: a review. *Org Geochem* **103**:1–21
- Diefendorf AF, Mueller KE, Wing SL, Koch PL, Freeman KH (2010) Global patterns in leaf  $^{13}\text{C}$  discrimination and implications for studies of past and future climate. *P Natl A Sci USA* **107**:5738–5743
- Dowsett HJ (1999) Sediment color and reflectance record from Ocean Drilling Program Hole 625B, Gulf of Mexico (marine isotope stage 5 interval). US Department of the Interior, US Geological Survey, Open-File Report 99-413, 19 p
- Eglinton G, Gonzalez AG, Hamilton RJ, Raphael RA (1962) Hydrocarbon constituents of the wax coatings of plant leaves: a taxonomic survey. *Phytochemistry* **1**:89–102
- Eglinton G, Hamilton RJ (1967) Leaf epicuticular waxes. *Science* **156**:1322–1335
- Epstein HE, Lauenroth WK, Burke IC, Coffin DP (1997) Productivity patterns of C3 and C4 functional types in the U.S. Great Plains. *Ecology* **78**:722–731
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989) Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu Rev Plant Biol* **40**:503–537
- Feakins SJ, Wu MS, Ponton C, Tierney JE (2019) Biomarkers reveal abrupt switches in hydroclimate during the last glacial in southern California. *Earth Planet Sc Lett* **515**:164–172
- Ficken KJ, Li B, Swain DL, Eglinton G (2000) An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Org Geochem* **31**:745–749
- Freeman KH, Pancost RD (2014) Biomarkers for terrestrial plants and climate. *Treatise Geochem* **22**(12):395–416
- Freimuth EJ, Diefendorf AF, Lowell TV (2017) Hydrogen isotopes of *n*-alkanes and *n*-alkanoic acids as tracers of precipitation in a temperate forest and implications for paleorecords. *Geochim Cosmochim Ac* **206**:166–183
- Gao L, Hou J, Toney J, MacDonald D, Huang Y (2011) Mathematical modeling of the aquatic macrophyte inputs of mid-chain *n*-alkyl lipids to lake sediments: implications for interpreting compound specific hydrogen isotopic records. *Geochim Cosmochim Ac* **75**:3781–3791
- Garcin Y, Schefuß E, Schwab VF, Garreta V, Gleixner G, Vincens A, Todou G, Séné O, Onana J-M, Achoundong G, Sachse D (2014) Reconstructing C3 and C4 vegetation cover using *n*-alkane carbon isotope ratios in recent lake sediments from Cameroon, Western Central Africa. *Geochim Cosmochim Ac* **142**:482–500
- Garzanti E, Vezzoli G, Andò S, Lavé J, Attal M, France-Lanord C, DeCelles P (2007) Quantifying sand provenance and erosion (Marsyandi River, Nepal Himalaya). *Earth Planet Sc Lett* **258**:500–515
- Gelpi E, Schneider H, Mann J, Oró J (1970) Hydrocarbons of geochemical significance in microscopic algae. *Phytochemistry* **9**:603–612
- Harrington JA, Harman JR (1991) Climate and vegetation in central North America: natural patterns and human alterations. *Great Plains Quart* **11**(2):103–112
- Hemingway JD, Schefuß E, Dinga BJ, Pryer H, Galy VV (2016) Multiple plant-wax compounds record differential sources and ecosystem structure in large river catchments. *Geochim Cosmochim Ac* **184**:20–40
- Hoffmann B, Feakins SJ, Bookhagen B, Olen SM, Adhikari DP, Mainali J, Sachse D (2016) Climatic and geomorphic drivers of plant organic matter transport in the Arun River, E Nepal. *Earth Planet Sc Lett* **452**:104–114
- Huang Y, Dupont L, Sarnthein M, Hayes JM, Eglinton G (2000) Mapping of C4 plant input from North West Africa into North East Atlantic sediments. *Geochim Cosmochim Ac* **64**:3505–3513
- Ishiwatari R, Yamamoto S, Shinoyama S (2006) Lignin and fatty acid records in Lake Baikal sediments over the last 130 kyr: a comparison with pollen records. *Org Geochem* **37**:1787–1802



- Joyce JE, Tjalsma LR, Prutzman JM (1993) North American glacial meltwater history for the past 2.3 my: oxygen isotope evidence from the Gulf of Mexico. *Geology* **21**:483–486
- Joyce JE, Tjalsma LRC, Prutzman JM (1990) High-resolution planktic stable isotope record and spectral analysis for the last 5.35 M.Y.: Ocean Drilling Program Site 625 northeast Gulf of Mexico. *Paleoceanography* **5**:507–529
- Just J, Schefuß E, Kuhlmann H, Stuut J-BW, Pätzold J (2014) Climate induced sub-basin source-area shifts of Zambezi River sediments over the past 17 ka. *Palaeogeogr Palaeoclimatol* **410**:190–199
- Kammerer JC (1987) Largest rivers in the United States. US Department of the Interior, US Geological Survey, Open-File Report 87-242, 2 p
- Kirby ME, Feakins SJ, Bonuso N, Fantozzi JM, Hiner CA (2013) Latest pleistocene to Holocene hydroclimates from Lake Elsinore, California. *Quaternary Sci Rev* **76**:1–15
- Kunst L, Samuels AL (2003) Biosynthesis and secretion of plant cuticular wax. *Prog Lipid Res* **42**:51–80
- Li R, Fan J, Xue J, Meyers PA (2017) Effects of early diagenesis on molecular distributions and carbon isotopic compositions of leaf wax long chain biomarker n-alkanes: comparison of two one-year-long burial experiments. *Org Geochem* **104**:8–18
- Limoges A, de Vernal A, Van Nieuwenhove N (2014) Long-term hydrological changes in the northeastern Gulf of Mexico (ODP-625B) during the Holocene and late Pleistocene inferred from organic-walled dinoflagellate cysts. *Palaeogeogr Palaeoclimatol* **414**:178–191
- Liu H, Liu W (2016) n-Alkane distributions and concentrations in algae, submerged plants and terrestrial plants from the Qinghai-Tibetan Plateau. *Org Geochem* **99**:10–22
- Lloyd J, Farquhar GD (1994)  $^{13}\text{C}$  discrimination during  $\text{CO}_2$  assimilation by the terrestrial biosphere. *Oecologia* **99**: 201–215
- Makou M, Eglinton T, McIntyre C, Montluçon D, Antheaume I, Grossi V (2018) Plant wax n-alkane and n-alkanoic acid signatures overprinted by microbial contributions and old carbon in meromictic lake sediments. *Geophys Res Lett* **45**:1049–1057
- Meckler A, Schubert C, Hochuli P, Plessen B, Birgel D, Flower B, Hinrichs K-U, Haug G (2008) Glacial to Holocene terrigenous organic matter input to sediments from Orca Basin, Gulf of Mexico: a combined optical and biomarker approach. *Earth Planet Sc Lett* **272**:251–263
- Meyers PA, Eadie BJ (1993) Sources, degradation and recycling of organic matter associated with sinking particles in Lake Michigan. *Org Geochem* **20**:47–56
- Naraoka H, Ishiwatari R (1999) Carbon isotopic compositions of individual long-chain n-fatty acids and n-alkanes in sediments from river to open ocean: multiple origins for their occurrence. *Geochem J* **33**:215–235
- Nguyen Tu TT, Derenne S, Largeau C, Bardoux G, Mariotti A (2004) Diagenesis effects on specific carbon isotope composition of plant n-alkanes. *Org Geochem* **35**:317–329
- NIST (2008) Mass Spectral Library (NIST/EPA/NIH). <https://chemdata.nist.gov> Accessed 15 Jan 2019
- O'Leary MH (1981) Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry* **20**:553–567
- Otto-Bliesner BL, Rosenbloom N, Stone EJ, McKay NP, Lunt DJ, Brady EC, Overpeck JT (2013) How warm was the last interglacial? New model-data comparisons. *Philos T Roy Soc A* **371**:20130097. doi:10.1098/rsta.2013.0097
- Paruelo JM, Lauenroth WK (1996) Relative abundance of plant functional types in grasslands and shrublands of North America. *Ecol Appl* **6**:1212–1224
- Polissar PJ, D'Andrea WJ (2014) Uncertainty in paleohydrologic reconstructions from molecular  $\delta\text{D}$  values. *Geochim Cosmochim Acta* **129**:146–156
- Ramankutty N, Foley J (2010) ISLSCP II Potential natural vegetation cover. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/961>. Accessed October 2017
- Rommerskirchen F, Plader A, Eglinton G, Chikaraishi Y, Rullkötter J (2006) Chemotaxonomic significance of distribution and stable carbon isotopic composition of long-chain alkanes and alkan-1-ols in  $\text{C}_4$  grass waxes. *Org Geochem* **37**:1303–1332
- Royall PD, Delcourt PA, Delcourt HR (1991) Late quaternary paleoecology and paleoenvironments of the Central Mississippi Alluvial Valley. *GSA Bull* **103**:157–170
- Shackleton NJ (1969) The last interglacial in the marine and terrestrial records. *P Roy Soc Lond B Bio* **174**:135–154
- Still CJ, Berry JA, Collatz GJ, DeFries RS (2003) Global distribution of  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  vegetation: carbon cycle implications. *Global Biogeochem Cy* **17**:6–1
- Suh YJ, Diefendorf AF (2018) Seasonal and canopy height variation in n-alkanes and their carbon isotopes in a temperate forest. *Org Geochem* **116**:23–34
- Suh YJ, Diefendorf AF, Bowen GJ, Cotton JM, Ju S-J (2019) Plant wax integration and transport from the Mississippi River Basin to the Gulf of Mexico inferred from GIS-enabled isoscapes and mixing models.



- Geochim Cosmochim Acta **257**:131–149
- Suh YJ, Hyun S (2018) Paleovegetation and paleoclimate changes in southeastern part of the Korean peninsula over the last 30 kyr inferred from plant wax carbon isotopes. *Ocean Polar Res* **40**:289–297
- Tipple BJ, Meyers SR, Pagani M (2010) Carbon isotope ratio of Cenozoic CO<sub>2</sub>: a comparative evaluation of available geochemical proxies. *Paleoceanography* **25**:PA3202. doi:10.1029/2009PA001851
- Tipple BJ, Pagani M (2010) A 35 Myr North American leaf-wax compound-specific carbon and hydrogen isotope record: Implications for C<sub>4</sub> grasslands and hydrologic cycle dynamics. *Earth Planet Sc Lett* **299**:250–262
- Tu TTN, Egasse C, Zeller B, Bardoux G, Biron P, Ponge J-F, David B, Derenne S (2011) Early degradation of plant alkanes in soils: A litterbag experiment using <sup>13</sup>C-labelled leaves. *Soil Biol Biochem* **43**:2222–2228
- van Dongen BE, Zencak Z, Gustafsson Ö (2008) Differential transport and degradation of bulk organic carbon and specific terrestrial biomarkers in the surface waters of a sub-arctic brackish bay mixing zone. *Mar Chem* **112**:203–214
- Vogts A, Moossen H, Rommerskirchen F, Rullkötter J (2009) Distribution patterns and stable carbon isotopic composition of alkanes and alkan-1-ols from plant waxes of African rain forest and savanna C<sub>3</sub> species. *Org Geochem* **40**:1037–1054
- Volkman JK, Barrett SM, Blackburn SI, Mansour MP, Sikes EL, Gelin F (1998) Microalgal biomarkers: a review of recent research developments. *Org Geochem* **29**:1163–1179
- Wakeham SG, Canuel EA, Lerberg EJ, Mason P, Sampere TP, Bianchi TS (2009) Partitioning of organic matter in continental margin sediments among density fractions. *Mar Chem* **115**:211–225
- Wang G, Zhang L, Zhang X, Wang Y, Xu Y (2014) Chemical and carbon isotopic dynamics of grass organic matter during litter decompositions: a litterbag experiment. *Org Geochem* **69**:106–113
- Wu MS, West AJ, Feakins SJ (2019) Tropical soil profiles reveal the fate of plant wax biomarkers during soil storage. *Org Geochem* **128**:1–15
- Zech M, Pedentchouk N, Buggle B, Leiber K, Kalbitz K, Marković SB, Glaser B (2011) Effect of leaf litter degradation and seasonality on D/H isotope ratios of *n*-alkane biomarkers. *Geochim Cosmochim Acta* **75**:4917–4928
- Zhang Y, Su Y, Liu Z, Du Y, Yu J, Jin M (2019) Fatty acid and alcohol compositions in lacustrine sediments as indicators of environment and ecosystem of lakes in Eastern China. *Ecol Indic* **97**:290–300
- Zhang Y, Su Y, Liu Z, Yu J, Jin M (2017) Lipid biomarker evidence for determining the origin and distribution of organic matter in surface sediments of Lake Taihu, Eastern China. *Ecol Indic* **77**:397–408

---

*Received May 15, 2019*

*Revised Jun. 3, 2019*

*Accepted Jun. 11, 2019*