

# 脂肪酸单体碳同位素的沉积学记录及其环境意义

刘玉萍<sup>1</sup>, 王延华<sup>1,2</sup>, 杨浩<sup>1,2</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210023)

**摘要:**湖泊/水库沉积物是有机化学领域的重要研究载体, 与其他自然记录比较, 它具有信息丰富、时间分辨率高、记录连续性好和覆盖面广等优点。自20世纪80年代以来, 在古环境/古气候的研究中, 沉积物有机质分子的标志物研究发挥了无可取代的作用。脂肪酸及其单体碳同位素的分布特征与环境意义是目前研究热点。以沉积物为研究载体, 采用文献荟萃的方法, 探讨了脂肪酸及其单体碳同位素技术在有机质溯源、流域内植被的恢复和气候的反演等方面的研究进展。结果表明: 脂类化合物在来源上存在重叠, 脂肪酸的研究可以作为正构烷烃分子标志物研究的补充。与单体碳同位素组成特征的联合应用, 能够准确地对沉积有机质进行溯源, 可以充分揭示保存在陆源脂肪酸中的气候环境信息, 为指示气候和环境变化提供重要的线索。在重建区域性的气候和环境状况方面具有广阔的应用前景。

**关键词:**沉积物; 有机质; 综述; 脂肪酸; 碳同位素

中图分类号: P593

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0376-06

## Fatty Acid Distribution and Compound-Specific Characteristics of Carbon Isotopic Records in the Sediments and Environmental Significance

LIU Yuping<sup>1</sup>, WANG Yanhua<sup>1,2</sup>, YANG Hao<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Key

Laboratory of Pollution Control and Material Circulation, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Lake sediment is an important media for molecular organic chemistry research. It has the advantages such as storing large amount of information, high temporal resolution and wide geographical coverage. Since the 1980s, the sedimentary organic matter molecular geochemistry in the study of paleoclimate has played an irreplaceable role. The investigation of global change has focused on the fatty acid and its compound-specific carbon isotopic distribution. Using the methods of extensive search of literatures and summaries, we discussed the literatures of fatty acid and its compound-specific carbon isotopic distribution for the identification of organic matter resources, reconstruction of vegetation and recovery of paleovegetation and paleoclimate. The result shows that the lipid compound has some superpositions in source. The research of fatty acids can be the supplements of n-alkanes. And the combination with the compound-specific characteristics of carbon isotopic can trace the organic matter accurately. It can not only reveal the climate and environment information stored in the terrestrial fatty acid but also provide important clues to indicate the climate and environmental changes. It has a broad application prospect in the reconstruction of vegetation, regional climate and environmental conditions.

**Keywords:** sediments, organic matter, summary, fatty acid, isotopic carbon

生物标志物具有相对稳定的特性、在地质环境中不容易分解, 并且其是由特定生物产生, 是一类重要的地球化学新指标<sup>[1]</sup>, 可以提供有关成岩状况<sup>[2]</sup>, 生物输入<sup>[3]</sup>, 沉积环境<sup>[4]</sup>等信息, 从而指示某一特定时期内湖泊以及流域气候和环境方面的变化状况<sup>[5]</sup>。

脂肪酸在所有生物体中都有不可忽视的作用。以浮游植物为例, 脂肪酸在其细胞有机质中所占的比例为5%~25%<sup>[6]</sup>。脂肪酸是全新世时期沉积物中, 分

收稿日期: 2016-09-05

修回日期: 2016-11-24

资助项目: 国家自然科学基金“太湖流域氮流特征及其影响机制”(41673107); 国家自然科学基金“滇池流域土壤侵蚀与氮流失的同位素示踪研究”(41273102); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

第一作者: 刘玉萍(1992—), 女, 福建宁德人, 硕士研究生, 主要研究方向: 湖泊生态环境修复。E-mail: liuyuping19920717@163.com

通信作者: 王延华(1978—), 女, 山东烟台人, 教授, 博士, 研究方向: 流域生态环境演变研究。E-mail: wangyanhua@njnu.edu.cn

布最广、含量最高的脂质生物标志物。因为碳骨架结构的差别,包括碳数、支链长度以及不饱和键数量等,因此它们都有各自特定的属性,从而可以对有机质进行溯源。脂肪酸不仅能够指示陆生高等植物、湖泊自身输入,而且能够指示细菌对有机质的贡献量<sup>[7]</sup>。

# 1 脂肪酸及其单体碳同位素对湖泊沉积物有机质溯源

## 1.1 脂肪酸的分布特征指示有机质来源

脂肪酸在活生物体中广泛存在,因为它的生物特征能够作为原核生物、真菌、硅藻等的生物标志物。所有生物体中,脂肪酸碳数分布范围为  $C_{14}$  至  $C_{38}$  之间,并且在所有饱和脂肪酸中, $C_{14}$ ,  $C_{16}$  以及  $C_{18}$  脂肪酸含量比重最大,具有显著的偶碳数优势<sup>[8]</sup>。活体生物中某些特性可以通过沉积物中脂肪酸得以保存,通常情况下,指示细菌源脂肪酸的生物标志物主要是短链脂肪酸、一元不饱和脂肪酸。Gong 和 Hollander<sup>[9]</sup>明确地阐述了  $n_{15:0}$  短链脂肪酸(—27%)是来源于细菌,并主要源于自养细菌。一般情况下,以浮游动物和浮游植物为主要来源的沉积物中含有丰富的  $C_{12:0}$ — $C_{20:0}$  短链饱和脂肪酸<sup>[10]</sup>;短链多不饱和脂肪酸表明有机质主要源自绿藻<sup>[11]</sup>,而长链多不饱和脂肪酸则指示海洋硅藻和甲藻输入<sup>[12]</sup>;高等植物中有含量很高的  $C_{22:0}$ — $C_{34:0}$  长链脂肪酸<sup>[13-14]</sup>,所以沉积物中脂肪酸组成能够很好地判断有机质的来源。可以通过不同来源脂肪酸特征来研究湖泊沉积物中有机质的来源<sup>[12,15-19]</sup>见表 1。

表 1 脂肪酸来源分类

脂类化合物	潜在来源	参考文献
LCFA	陆生高等植物源	Tulloch <sup>[15]</sup> ;
USFA- $C_{18:1n7}$	微藻源	Volkman 等 <sup>[16]</sup> ;
Iso-FA& anteiso-FA		Volkman 等 <sup>[12]</sup> ;
BRFA		Keneda <sup>[17]</sup> ;
Odd-SCFA	细菌源	Parker and Taylor <sup>[18]</sup>
$C_{18:1n7}$		
Even-SCFA	混合源	Simoneit <sup>[19]</sup>

注:LCFA-长链饱和脂肪酸;Even-SCFA 偶碳短链饱和脂肪酸;Odd-SCFA-奇碳数短链饱和脂肪酸;BRFA 支链脂肪酸;Iso-and anteiso-FA 异构、反异构脂肪酸;USFA 不饱和脂肪酸。

脂肪酸的气相色谱图,能够区别以陆生高等植物来源为主要输入的高碳数脂肪酸以及以水生生物为主要来源的低碳数脂肪酸。如果脂肪酸的分布呈现出双峰型,其中一组是以  $C_{24}$  或  $C_{26}$  为主峰的高碳数脂肪酸,另外一组是以  $C_{16}$  或  $C_{18}$  为最大峰度的低碳数脂肪酸,而且两组峰都具有明显偶碳优势,这说明沉积物多以水生生物为主并伴随陆生高等植物碎屑

输入特征。藻类和低等浮游生物来源的沉积物中脂肪酸以单组峰形分布,其特点是碳数主要以  $C_{12}$ — $C_{20}$  脂肪酸为主,主峰是  $C_{16}$  或  $C_{18}$ ,而含有少量的高碳数脂肪酸,存在明显的偶数碳优势<sup>[20]</sup>。通常,不饱和脂肪酸  $C_{16:1}$ ,  $C_{18:1}$  是细菌的产物,以细菌为主要来源的脂肪酸碳数分布主要集中在  $C_8$ — $C_{11}$  之间。一般情况下,如果湖泊的营养程度越高,那么陆生高等植物是沉积物有机质主要来源的概率越大,而与此同时,细菌和浮游植物对有机质的贡献也不容忽视,因此气相色谱图大都表现为双峰型<sup>[21]</sup>。

目前,国内外开展的根据脂肪酸的结构、分布特点来对有机质进行溯源的研究有很多。比如,通过分析圣塔莫尼卡海盆沉积物中脂肪酸的结构特点,表明浮游生物和细菌对有机质均有贡献,但是,相比较来说,细菌源脂肪酸的贡献更加明显<sup>[22]</sup>。巴西的坎普斯盆地沉积物中初级生产和浮游动物脂肪酸的含量占绝对优势,说明该盆地沉积物有机质以自生为主<sup>[23]</sup>。通过研究东海赤潮高发区沉积物,得出脂肪酸主要来自于海洋微藻,陆地输入源脂肪酸比例低,说明该区域脂肪酸主要来源于海洋自生生物<sup>[3]</sup>。Volkman<sup>[12]</sup>对潮间带沉积物中的脂肪酸所占的比重以及生源问题进行探讨;Brassell<sup>[24]</sup>和 Venkatesan<sup>[25]</sup>探讨海洋沉积物中脂肪酸的组成和分布特征进而识别有机质来源。因此,脂肪酸在某种程度可以指示有机质的来源。

## 1.2 脂肪酸单体碳同位素识别有机质的来源

最近几年,由于色谱—同位素比值质谱仪的广泛应用,脂肪酸单体碳同位素技术在示踪沉积物中有机质来源、区别植被类型属于  $C_3$  还是  $C_4$  等研究中起到了很重要的作用。

虽然脂肪酸的分布特点不仅能够对湖泊沉积物中有机质进行溯源,还在反演古气候和重建古环境方面起着非常重要作用,但其存在的争议也是不容忽视的。首先由于大多数脂肪酸没有明显的特性,而且,在这些脂肪酸中不饱和脂肪酸所占比重很大,稳定性差,不容易在自然界得到比较完整的保存,因此沉积物中尤其是沉积柱芯中的脂肪酸主要用来研究有机质是来源于陆地还是湖泊自生,不能从更精密的角度对有机质进行溯源<sup>[26]</sup>。但是,有研究<sup>[27]</sup>指出偶碳数脂肪酸经过脱羧反应形成奇数碳的正构烷烃,这表明正构烷烃较脂肪酸稳定,且二者存在关联性,因此脂肪酸的研究可以作为正构烷烃分子标志物研究的补充。其次由于脂肪酸、正构烷烃等脂类化合物在来源上也不是独立的,因此存在重叠的部分,而且母质中的脂类化合物都经过了一定的降解作用再进入沉积

物中,要比较精确地溯源仅仅依据生物化学知识是没有足够说服力的<sup>[28]</sup>。

湖泊沉积物不同生物的脂肪酸单体碳同位素都有各自分布范围,所以该研究在一定程度上增加了脂肪酸的分布特点对有机质进行溯源的相对确定性<sup>[29]</sup>。脂肪酸单体碳同位素能够较精确地对有机质溯源。Shi<sup>[30]</sup>通过对 Altamaha 河口进行研究,分析结果表明河口短链脂肪酸  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-25\%$ ,从而得出海洋自生生物是脂肪酸的主要来源,另一方面,靠近岸边的沉积物内长链脂肪酸  $\delta^{13}\text{C}$  值是  $-35\% \sim -30\%$ ,指示陆生植物来源。Naraoka 和 Ishiwatari<sup>[31]</sup>研究发现在西太平洋的表层沉积中,  $n_{20:0} - n_{26:0}$  饱和脂肪酸的同位素值为  $-25\%$  到  $-28\%$ ,认为属于混合来源输入;段毅等<sup>[32]</sup>通过分析南沙现代海洋沉积物,得出脂肪酸主要来自低纬度海洋浮游生物的结论,甘南沼泽长链饱和脂肪酸均值为  $-33.5\%$ ,其碳同位素组成表明陆生高等植物来源。

对湖泊沉积物有机质进行溯源有重大意义。首先可以对湖泊中浮游生物、藻类和陆生高等植物的生长状况以及其所处的环境有一定程度的了解;其次,在了解有机质的来源之后,能够预防和治理水体富营养化;最后还可以改善陆生植被以及对湖泊的可持续发展也有重要的意义。

## 2 脂肪酸以及单体碳同位素指示流域内气候的变化

### 2.1 脂肪酸的分布特征指示气候环境的变化

湖泊沉积物中脂肪酸的分布特征不仅能够指示有机质来源,同时在反演流域内的气候和环境的变化也有重要的作用。

研究表明藻类和细菌在较低的温度、较低浓度的氧含量以及较高的盐浓度更容易形成更多的不饱和脂肪酸,因此不饱和脂肪酸的相对含量能够用来恢复古温度变化状况<sup>[33]</sup>。Kawamura 等<sup>[34]</sup>通过对日本琵琶湖沉积物的分析结果表明,不饱和脂肪酸  $C_{18:2}/C_{18:0}$  比值和剖面孢粉特点具有某种程度的对应关系,并且根据这个对应关系指出湖泊古温度指标  $C_{18:2}/C_{18:0}$ ,这个指标能够对湖泊古温度进行定性恢复。生物体细胞内不饱和脂肪酸会随着温度的下降而增加,这是由于生物体为了适应不同的温度,并且保持细胞膜的流动性和稳定性而做出的生理反应<sup>[35]</sup>。国内许多研究者也将该指标应用于分析古温度的研究中,其结果也得到了长江中下游晚冰期以来孢粉记录的支持,高值分别对应于中、晚仙女木冰阶,

证实了它的准确性和实用性<sup>[36]</sup>。虽然具体的映证关系目前还不确定,但可以说明较高的游离态脂肪酸  $C_{18:2}/C_{18:0}$  比值对应于较低的环境温度。

有研究<sup>[37]</sup>指出在温暖的时期,湖泊内源藻类、细菌类生长旺盛,同时湖泊生产力高。脂肪酸偶碳优势指数( $C_{15} - C_{30}$  碳数范围计算)( $\text{CPI}_A$ )可以表明细菌、浮游生物和陆生高等植物对沉积物中有机质的相对贡献。碳数为  $C_{20} - C_{34}$  的高等植物所产生的奇偶优势要远远低于碳数小于  $C_{18}$  细菌和藻类脂肪酸。所以低  $\text{CPI}_A$  值往往指示有机质输入以陆生高等植物为主<sup>[38]</sup>。营养型湖泊沉积物中脂肪酸的  $\text{CPI}_A$  值相对于贫营养湖泊要高<sup>[39]</sup>。因此,  $\text{CPI}_A$  值高,指示气候温暖湿润,  $\text{CPI}_A$  值低,指示寒冷干燥。

同时,低等细菌藻类生物和陆生高等植物相对变化的脂肪酸轻组分与重组分之比(L/H)和脂肪酸平均碳链长度(ACL)对于重建古气候也有重要指示作用, L/H 下降, ACL 上升,说明该时期内沉积环境周围中陆生高等植物为优势植被,菌藻类低等生物贡献较低,指示气候以干冷为主; L/H 上升, ACL 下降,指示该时期沉积环境内细菌以及藻类等低等生物为主要植物,而陆生高等植物的贡献量较少,指示气候偏温暖湿润<sup>[40]</sup>。因此,脂肪酸的分布状况能够很好地指示流域内气候和温度的变化状况。

### 2.2 脂肪酸单体碳同位素的分布特征指示气候环境的变化

自 20 世纪 60 年代以来,众多研究表明陆生高等植物依照不同的光合作用可以划分为三大类:  $C_3$  植物、 $C_4$  植物和 CAM 植物<sup>[41-42]</sup>。当所处外界环境条件完全相同的情况下,对  $\text{CO}_2$  的利用率从高到低分别是  $C_4$  植物、CAM 植物、 $C_3$  植物<sup>[43]</sup>。  $C_3$  植物喜阴凉湿润且日照不强,而  $C_4$  植物相对偏爱温暖强光的条件,因此  $C_3$  和  $C_4$  植物代表了不同条件的生长环境<sup>[44]</sup>。湖泊沉积物中碳同位素值的变化可以准确地记录周围流域  $C_3$  植物与  $C_4$  植物演替状况,因为植被覆盖变化与古气候息息相关,因此可以在一定程度上重建该流域温度和气候的环境变化状况<sup>[45-46]</sup>。

$C_3$ 、 $C_4$  植物都有其各自的固碳方式,因此这两种植物的碳同位素并不重叠,他们有其相对应的碳同位素分布范围<sup>[47]</sup>。通常情况下,  $C_3$  植物的总有机碳同位素值分布在  $-35\% \sim -22\%$  之间,最高频率在  $-27\%$  附近;而  $C_4$  植物总有机碳同位素值分布在  $-19\% \sim -9\%$  之间,最高频率值出现在  $-14\%$  附近<sup>[48-51]</sup>。端元法是能够比较准确地定量评估  $C_3$ 、 $C_4$  植物相对贡献率的一个最常用的方法。顾兆炎<sup>[52]</sup>等和饶志国<sup>[53]</sup>等通过研究北美大平原和澳大利亚表

土,规定将纯  $C_3$  植物和纯  $C_4$  植物的端元值分别为一24‰和一14‰,当  $C_3$  植物为优势植被时,碳同位素分布范围为:一24‰~一19‰;而当碳同位素介于一19‰到一14‰时, $C_4$  植物为优势植被,据此来估算  $C_3$  植物和  $C_4$  植物的相对贡献量。

研究表明,陆源  $C_4$  类植物在温暖干燥的气候状况下比较繁盛,而在湿冷的气候条件下新陈代谢相对缓慢,合成有机质的能力显著下降<sup>[54]</sup>。 $C_3$  植物的脂肪酸单体碳同位素值与  $C_4$  植物相比较为偏负。通过测定湖泊沉积物中脂肪酸单体碳同位素值可以分辨流域内的优势植被,进而能够通过植被覆盖变化反演流域内气候和环境的变化。如果在某一期间脂肪酸单体碳同位素值较为偏负,表明  $C_3$  植物为主要植被,也就是说该地区这个时期气候特征主要是低温和湿润。同理,若脂肪酸单体碳同位素值较为偏正,说明  $C_4$  植物贡献量较大,指示该期间流域的气候以暖干为主。综上所述,脂肪酸单体碳同位素值的变化能够对应于所在区域气候以及环境变化。

段毅等<sup>[55]</sup>通过对若尔盖沼泽的研究,得出泥炭来源以  $C_4$  植物为主, $C_3$  植物输入较少;对甘南沼泽的研究表明,泥炭中脂肪酸来自草本植物,并且得到其单体碳同位素的映证<sup>[56]</sup>。徐美娜等<sup>[57]</sup>通过研究柴河小流域沉积物,表明有机质主要为藻类与陆生高等植物来源,指示流域内气候变化。滇南小流域沉积物有机质中脂肪酸及其单体碳同位素的分布特征表明在过去一个世纪里,小流域的生态格局由木本植物为主逐渐演变成草本、木本植物共存的植被格局,推出该沉积时段流域内的气候由湿润向干旱过渡<sup>[58]</sup>;王丽芳等<sup>[59]</sup>运用该技术阐述了巢湖近70 a来的富营养化过程;珠江小流域柱状样脂肪酸分布特征表明老爷海泻湖富营养化的范围以及生态环境的演变过程,记录了水体生产力,水华爆发<sup>[60]</sup>。

### 3 脂肪酸及其单体碳同位素技术应用的可行性与局限性

脂肪酸的分布及其单体碳同位素组成特征的联合应用,能够准确地对有机质进行溯源,可以充分揭示保存在陆源脂肪酸中的气候环境信息,为指示气候和环境变化提供重要的线索,从而重建区域性的气候、环境状况,具有广阔的应用前景<sup>[61]</sup>;脂肪酸及其单体碳同位素的研究与正构烷烃及其单体碳同位素相比较,具有稳定性差,易降解等缺点,但是由于其降解后成为了烷烃,这项技术成为了正构烷烃及其单体碳同位素技术的有益补充,可以互相验证<sup>[62]</sup>;并且由于脂肪酸结构的多样性,来源的相对稳定性,是研究

湖泊环境无可取代的有效手段<sup>[63]</sup>。然而该技术也具有一定的局限性,首先研究的载体较少,目前已展开的大部分的研究均以湖泊沉积物和海洋沉积物为载体,这对系统地研究全球植被覆盖变化以及气候变迁具有局限性<sup>[64]</sup>;其次,脂肪酸及其单体碳同位素作为环境指标的研究由于技术手段的限制,起步较晚,发展缓慢,尤其在中国,研究内容集中于示踪来源和沉积环境判别,针对气候变化的研究很少,需要探索的方面还很多<sup>[65]</sup>;再次,由于自然环境的复杂和观测手段的限制,依靠气相色谱与同位素质谱联用仪还不够全面系统,而且仪器测试精度还有待改善<sup>[66]</sup>。此外,由于脂类化合物来源有重叠的可能性,使得脂肪酸及其单体碳同位素在解释植被和气候问题上具有一定的繁杂性和不确定性<sup>[67]</sup>。综上所述,脂肪酸及其单体碳同位素技术在百年尺度生态环境演变研究的应用中虽然具有一定的局限性,但其具有现实的可行性。

### 4 结论

湖泊沉积物中分子标志物是湖泊有机质溯源、植被识别以及反演生物生长环境等研究中的重点。沉积生物标志物以及同位素技术的共同应用,使研究深度向分子层次深入<sup>[68]</sup>。目前,国内外对于脂肪酸单体碳同位素技术的研究,研究载体较少,短时间尺度湖泊/水库沉积物研究还有待完善,因此在反演流域生态环境演变研究中存在局限性。我国在脂肪酸单体碳同位素的研究方面还有大量的基础性工作需要开展,不仅要加进一步开展研究手段,还要根据实际情况选取合适的载体,完善国际生物标志物的研究。而且应该提倡定性向定量、单一化向多元化的发展,由于生态系统的复杂性,单一的研究手段会加大反演环境和气候变化的误差,但是随着研究的深入,测试手段的发展,国内研究载体的逐渐丰富,以后可以开展脂肪酸及其单体碳同位素与其他技术(如氢同位素、氧同位素)的联合应用,这样能够更系统确切地掌握流域内气候和环境的变化状况,继而为改善流域周边环境做出贡献。

#### 参考文献:

- [1] 胡建芳. 3万年来南沙海区古气候、古环境演变:分子有机地球化学研究[D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所,2001.
- [2] 王启军,陈建渝. 油气地球化学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1988.
- [3] 褚宏大,苏荣国,王修林,等. 东海赤潮高发区表层沉积物中部分脂类标记物的分布与来源[J]. 海洋科学,2008,32(10):68-76.
- [4] 蒲阳,张虎才,陈光杰,等. 干旱盆地古湖相沉积物生物标志物分布特征及环境意义:以柴达木盆地为例[J]. 中

- 国沙漠,2013,33(4):1019-1026.
- [5] 杨忠芳,朱立,陈岳龙.现代环境地球化学[M].北京:地质出版社,1999:151-152.
- [6] 刘亚娟.东海赤潮高发区沉积物中脂类生物标记物的分布和指示意义[D].山东青岛:中国海洋大学,2012.
- [7] 李凤.东海赤潮高发区与舟山群岛沉积物中脂类物质的生物地球化学研究[D].山东青岛:中国海洋大学,2014.
- [8] 郑宇,王江涛.5种海洋微藻脂肪酸存在形式的初步研究[J].海洋环境科学,2010,29(1):66-69.
- [9] Gong C, Hollander D J. Different contribution of bacteria to sedimentary organic matter in oxic and anoxic environments, Santa Monica Basin, California [J]. Organic Geochemistry, 1997,26:545-563.
- [10] Teschner M, Bosecker K. Chemical reaction and stability of biomarkers and stable isotope during in vitro biodegradation of petroleum[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(86):463-471.
- [11] Volkman, J K, Jerrey S W, Rogers G I. Fatty acid and lipid composition of 10 species of microalgae used in mariculture[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1989,128:219-240.
- [12] Volkman J K, Johns R B, Gillan F T, et al. Microbial lipids of an intertidal sediments-I. Fatty acids and hydrocarbons [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980,44(8):1133-1143.
- [13] Matsuda H, Koyama T. Early diagenesis of fatty acids in lacustrine sediments- II. A statistical approach to changes in fatty acid composition from recent sediments and some source materials[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1977,41(12):1825-1834.
- [14] Boon A R, Duineveld G C A. Phytopigments and fatty acids as molecular markers for the quality of near bottom particulate organic matter in the North Sea[J]. Journal of Sea Research, 1996,35(4):279-291.
- [15] Tulloch A P. Chemistry of waxes of higher palnts[M] // Kolattukudy P E. Chemistry and Biochemistry of Natural Waxes. Amsterdam:Elsevier, 1976.
- [16] Volkman J K, Maxwell J R. Acyclic isoprenoids as biological markets[M] // Jones R B. Biological Markets in the Sedimentary Record: Method in Geochemistry and Geophysics24. Elsevier, 1984.
- [17] Keneda T. Iso-and anteiso-fatty acids in bacterial; Biosynthesis, function, and taxonomic significance [J]. Microbiology Reviews, 1981,55(2):288-302.
- [18] Park R, Taylor J. The relationship between fatty acids distribution and bacterial respiratory types in contemporary marine sediments[J]. Estuarine, Costal and Shelf Science, 1983,16(2):173-189.
- [19] Simoneit B R T. The organic chemistry of marine sediments[M] // Reily J P, Chester R. Chemical Oceanography7. London:Academic Press, 1978:33-331.
- [20] 杨庶.典型海洋沉积物中脂类生物标志物的形态分布及来源分析[D].山东青岛:中国海洋大学,2009.
- [21] 欧杰,王延华,杨浩,等.湖泊沉积物中正构烷烃和碳同位素的分布特征及其环境意义[J].南京师大学报:自然科学版,2012,35(3):98-105.
- [22] Pelejero C, Grimalt J O, Sarnthein M, et al. Molecular biomarker record of sea surface temperature and climatic change in the South China Sea during the last 140000 years[J]. Marine Geology, 1999,156:109-121.
- [23] Sehouten S, KleinBreteler W C M, Blokker P. et al. Biosynthetic effects on the stable carbon isotopic compositions of algal lipids; implications for deciphering the carbon isotopic biomarker record[J]. Biochemical Journal, 1998,62(8):1397-1406.
- [24] Brassell S C, Eglinton G, maxwell J R. Natural background of Alkanes in the aquatic environment [J]. Aquatic Pollutants, 1978:69-86.
- [25] Volkman J K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter[J]. Organic Geochemistry, 1986,9(2):83-99.
- [26] 欧杰,王延华,杨浩,等.正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究[J].环境科学,2013,34(2):484-493.
- [27] Yamamoto M, Shiraiwa Y. Inonye I. Physiological responses of lipids in *Emiliana huxleyi* and *Gephyrocapsa oceanica*(Haptophyceae)to growth status and their implications for alkenone paleothermometry[J]. Organic Geochemistry, 2000,31:799-811.
- [28] 欧杰.石臼湖地区百年尺度生态环境演变与人类活动关系研究[D].南京:南京师范大学,2013.
- [29] 吴能友,邬黛黛,叶瑛,等.南海东北部东砂海域沉积物烃类有机地球化学研究及其意义[J].南海地质研究, 2007(1):1-14.
- [30] Shi W, Sun M Y, Molina M, et al. Variability in the distribution of lipid biomarkers and their molecular isotopic composition in Altamaha estuarine sediments; Implications for the relative contribution of organic matter from various sources [J]. Organic Geochemistry, 2001,32(4):453-467.
- [31] Naraoka H, Ishiwatari R. Molecular and isotopic abundances of long-chain n-fatty acids in open marine sediments if the western North Pacific[J]. Chemical Geology, 2000,165(1/2):23-36.
- [32] 段毅,文启斌,罗斌杰.南沙海洋和甘南沼泽现代沉积物中单个脂肪酸碳同位素组成及其成因[J].地球化学,1995,24(3):270-276.
- [33] 薛博.漳江口红树林湿地沉积物有机质来源追溯[D].

- 福建厦门:厦门大学,2007.
- [34] Kawamura K, Ishiwatari R. Polyunsaturated fatty acids in a lacustrine sediment as a possible indicator of paleoclimate[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981,45(2):149-155.
- [35] Reddy C M, Eglinton T I, Pali R. Even carbon number predominance of plant wax n-alkanes: A correction [J]. *Organic Geochemistry*, 2000,31(4):331-336.
- [36] 张干,盛国英,傅家谟,等. 固城湖 GS-1 孔 11.87—12.28 m 古环境变更线的分子有机地球化学证据[J]. *科学通报*, 1999,44(7):775-779.
- [37] 沈吉,王苏民,张干. 固城湖沉积物中可溶有机质成分及古气候环境意义[J]. *湖泊科学*, 1998,4(10):63-70.
- [38] Cardoso J N, Eglinton G. The use of hydroxyacids geochemical indicators[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983,47(4):723-730.
- [39] Cranwell P A. Organic geochemistry of Cam Loch (Sutherland) sediments[J]. *Chemical Geology*, 1997, 20:205-221.
- [40] 郑艳红,周卫建,谢树成. 若尔盖高原全新世气候序列的类脂分子化石记录[J]. *第四纪研究*, 2007,1(27):108-113.
- [41] 罗红艺. C<sub>3</sub> 植物、C<sub>4</sub> 植物和 CAM 植物的比较[J]. *高等函授学报:自然科学版*, 2001,14(5):35-38.
- [42] 尤努斯·居玛. 植物光合作用多样性的研究进展[J]. *新疆师范大学学报:自然科学版*, 2009,8(2):58-60,63.
- [43] 牛书丽,蒋高明,李永庚. C<sub>3</sub> 与 C<sub>4</sub> 植物的环境调控[J]. *生态学报*, 2004,24(2):308-314.
- [44] Sehouten S, Hoefs M J L, Damste S S. A molecular and stable isotopic study of lipids in late Quaternary sediments from the Arabian Sea [J]. *Organic Geochemistry*, 2000,31(6):509-521.
- [45] 陈建芳. 古海洋研究中的地球化学新指标[J]. *地球科学进展*, 2002,17(3):402-410.
- [46] Pancost R D, Boot C S. The palaeoclimatic utility of terrestrial biomarkers in marine sediments [J]. *Marine Chemistry*, 2004,92(1):239-261.
- [47] 郭志刚,杨作升,林田,等. 东海泥质区单体正构烷烃的碳同位素醇成及物源分析[J]. *第四纪研究*, 2006,26(3):34-39.
- [48] 房吉敦,吴丰昌,熊永强. 滇池湖泊沉积物中游离类脂物的有机地球化学特征[J]. *地球化学*, 2009,38(1):96-104.
- [49] Wang Y H, Yang H, Zhang J X, et al. Biomarker and stable carbon isotopic signatures for 100—200 year sediment record in the Chaihe catchment in southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 502:266-275.
- [50] Kohn M J. Carbon isotope compositions of terrestrial C<sub>3</sub> plants as indicator of (paleo)ecology and (paleo)climate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010,107(46):19691-19695.
- [51] 王国安. 稳定碳同位素在第四纪古环境研究中的应用[J]. *第四纪研究*, 2003,23(5):471-484.
- [52] 顾兆炎,刘强,许冰,等. 气候变化对黄土高原末次盛冰期以来的 C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> 植物相对丰度的控制[J]. *科学通报*, 2003,48(13):1458-1464.
- [53] 饶志国,陈发虎,曹洁,等. 黄土高原西部地区末次冰期和全新世有机碳同位素变化与 C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> 植被类型转换研究[J]. *第四纪研究*, 2005,25(1):107-114.
- [54] 郑艳红,程鹏,周卫建. 正构烷烃及单体碳同位素的古植被与古气候意[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005,25(1):99-104.
- [55] 段毅. 甘南沼泽沉积脂类生物标志化合物的组成特征[J]. *地球化学*, 2002,31(6):525-531.
- [56] 段毅,张辉,郑朝阳,等. 沼泽沉积环境中植物和沉积脂类单体碳同位素组成特征及其成因关系研究[J]. *地球科学*, 2004,34(12):1151-1156.
- [57] Xu M N, Wang Y H, Yang H, et al. Modern climate and vegetation variability recorded in organic compounds and carbon isotopic compositions in the Dianchi watershed [J]. *Environmental Science Pollution and Research*, 2015,22:14314-14324.
- [58] 徐美娜. 滇南小流域有机质来源的沉积记录[D]. 南京:南京师范大学,2016.
- [59] 王丽芳,熊永强,吴丰昌,等. 巢湖富营养化的沉积记录:结合态脂肪酸及其单体碳同位素特征[J]. *地球与环境*, 2010,38(4):393-401.
- [60] 孙蕴婕. 沉积物中脂类生物标志物的物源示踪及环境演变指示[D]. 上海:华东师范大学,2011.
- [61] 林田,郭志刚,杨作升. 类脂化合物单体碳稳定同位素在古气候环境研究中的意义[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(8):910-914.
- [62] 段毅,王智平. 南沙海洋沉积单体长链正构烷烃成因的碳同位素证据[J]. *科学通报*, 2011,46(23):2003-2006.
- [63] 郭金春,马海州. 湖泊生物标志物与古气候环境变化的研究进展[J]. *盐湖研究*, 2008,16(4):52-57.
- [64] 陶舒琴,赵美训, Timothy Eglinton, 等. 黄河悬浮颗粒物中类脂生物标志物的组成和稳定碳同位素分布特征及来源研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2015,45(7):73-79.
- [65] 苗忠英,郑绵平,张震. 湖相沉积物有机地球化学在古环境研究中的应用[J]. *矿床地质*, 2014,33(5):1108-1116.
- [66] 曾芳,毛治超. 稳定碳同位素分析技术及其在地球化学中的应用[J]. *石油天然气学报*, 2010,32(2):228-231.
- [67] 徐美娜,王延华,杨浩. 近现代沉积物中分子生物标志物对生态环境演变的记录[J]. *南京师大学报:自然科学版*, 2016,39(2):106-111.
- [68] 王延华,杨浩. 正构烷烃单体碳同位素及氢同位素技术在环境变化研究中的应用[J]. *南京师范大学:工程技术版*, 2011,11(4):83-88.