

近现代沉积物中分子生物标志物 对生态环境演变的记录

徐美娜^{1,2}, 王延华^{1,2}, 杨 浩^{1,2}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 近年来, 生物标志物技术是全球变化研究中最热门的研究手段之一. 本文以水体沉积物为研究载体, 总结了正构烷烃、脂肪酸及碳同位素技术在生态环境演变研究中的应用, 着重叙述了在有机质输入源的识别、植被类型的重建以及古气候的反演等方面的研究动态. 以滇池以南小流域为研究靶区开展应用研究, 结果表明生物标志物技术可以进行退化小流域百年尺度的生态环境演变研究. 沉积物中生物标志物的研究丰富了生态环境演变预测研究.

[关键词] 沉积物, 环境演变, 正构烷烃, 脂肪酸, 碳同位素

[中图分类号] P593 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2016)02-0106-06

Modern Ecological Evolution Recorded in Biomarkers from Lacustrine Sediments

Xu Meina^{1,2}, Wang Yanhua^{1,2}, Yang Hao^{1,2}

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction of Jiangsu Province, Nanjing 210023, China)

Abstract: Hydrocarbon biomarkers have been one of the most popular measures for global change in recent years. *N*-alkanes, fatty acid and stable carbon isotope compositions from the sediments could provide the continuous and high-resolution information about sources of organic matter, reconstruction of past vegetation, variability of historical climate and influence of human activities on local ecosystems. Sediments from the south of Dianchi watershed are implicated for modern climate and vegetation variations by the distribution and compound-specific characteristic of aliphatic hydrocarbon biomarkers. It is concluded that the application hydrocarbon biomarkers of the sediment could be introduced in predicting the ecological environment change.

Key words: sediment, environmental changes, *n*-alkanes, fatty acid, stable carbon isotope

近年来, 各种尺度的湖/库沉积学研究逐渐成为领域热点. 为了摸清环境指标与生源要素间的定量关系, 重塑古环境和古气候, 判别历史时期人为活动的影响, 生物标志物(biomarker)技术逐渐被研究者广泛采用^[1-2]. 其主要包括正构烷烃(*n*-alkanes)、脂肪酸(fatty acids)、正构醇(*n*-alkanol)、甾醇类(sterols)和长链烷基二醇类(long-chain alkyl diols)等. 由于能很好地保留源物质的生化特征, 生物标志物可以作为一项反映生态环境状况的有效指标. 本文将重点阐述正构烷烃和脂肪酸技术在有机质来源示踪研究中的应用, 并从生物标志物和同位素联合示踪的角度, 以滇池小流域生态环境演变研究为例, 探讨重建小流域百年尺度气候和生态环境的可行性.

收稿日期: 2015-09-09.

基金项目: 国家自然科学基金(41273102)、中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室开放课题基金(SKLEC-RA20130FP06)、南京师范大学青蓝工程优秀青年骨干教师项目(184080H102187).

通讯联系人: 王延华, 博士, 副教授, 研究方向: 生态环境修复. E-mail: wangyanhua@njnu.edu.cn

1 我国内陆流域环境演变的沉积记录研究现状

我国古湖泊数据库(CLSDB)的建立尚未成熟,多数研究基于长时间尺度(万年、千年)、不同区域的比较^[3-4].而全球湖泊数据库(GLDB)成功的应用,对我国内陆流域利用特征时期古气候要素建立模型、恢复晚第四纪以来的环境与气候具有重要的借鉴意义.为了定量分析内陆流域的环境演变过程,建立高分辨率(百年、十年尺度)的时间序列是十分必要的,这也要求现有技术更精确地定年.低纬度地区放射性同位素¹³⁷Cs的比活度会随时间衰减,需要在地质和环境提供更多的支撑^[5].风浪及人为扰动等活动会对表层沉积物产生影响,利用²¹⁰Pb定年时对采样要求较高,需选择连续的沉积柱芯^[6].目前,¹³⁷Cs、²¹⁰Pb联合示踪已被广泛应用到近现代的沉积定年与沉积通量的估算.我国在利用现代孢粉模型、介形类壳体氧同位素建立环境指标与气候转换函数方面也做了大量尝试^[7-8].由于分辨率不统一、采用的环境指标各异,研究环境演化空间分异规律的道路上困难重重.孢粉虽可以量化植被的生长环境,但其研究缺乏系统分析,分辨率模糊,对气候变化规律的响应也较为滞后^[7].古生物指标介形类壳体氧同位素特征往往能反映水体的盐碱度及水位的波动情况^[8].这一指标的定量分析必须建立在大量湖泊系统调查和研究之上,才能有效阐明湖泊过去的气候与环境变化.可见,湖泊沉积记录与气候因子、环境指标之间定量转换函数可靠性及精确性还存在一定问题,需要进一步研究.在风浪作用、水流搬运、人类干扰等因素的影响下,我国内陆流域的沉积过程极不稳定,给研究营养盐吸附与释放、有机质迁移机制等内容带来很大的难度^[9-10].为了揭示内陆流域环境演变过程,力求在环境因子与沉积指标的定量关系方面取得突破,满足流域间的对比要求,生物标志物技术和同位素技术的联合应用为湖/库学研究提供了有力的科学依据.

2 有机质来源的生物标志物示踪研究

2.1 正构烷烃技术的应用

在目前的生物标志物研究中,烃类化合物运用较为广泛.正构烷烃来自不同的生物源,其分布特征略有不同^[11-14].主碳峰(C_{max})和碳优势指数(CPI)可表征不同来源的有机质贡献^[12].长链正构烷烃($>nC_{25}$)多以 nC_{27} 、 nC_{29} 或 nC_{31} 为主峰,呈明显的奇偶优势,其CPI指数一般高于5,表征陆源高等植物贡献^[13].其中,主峰为 nC_{27} 、 nC_{29} 时,被认为主要来源于木本植物, nC_{31} 时则主要来源于草本植物^[14].值得注意的是,挺水植物的正构烷烃分布与陆生高等植物的分布相似.而沉水/浮叶植物的正构烷烃是中等碳链长度的,碳数范围一般在 nC_{20} – nC_{25} ,以 nC_{21} 、 nC_{23} 或 nC_{25} 为主峰^[15].短链正构烷烃(nC_{15} – nC_{20})多数来源于水生藻类/浮游细菌,以 nC_{17} (或 nC_{16} , nC_{19})正构烷烃为主的单峰型分布,无明显的奇偶优势^[16].

对于陆生高等植物来说,正构烷烃 $(nC_{27}+nC_{29})/(nC_{31}+nC_{33})$ 、 nC_{27}/nC_{31} 比值变化反映了木本与草本植物的相对变化关系^[17],当比值增大,指示草本植物向木本植物更替演化,比值减小,则反向演替. $\Sigma nC_{20}/\Sigma nC_{21}^+$ 值(L/H)可以大致推算低等生物与高等植物的相对变化^[18],水生藻类短链正构烷烃和陆生植物长链正构烷烃的比值 $(nC_{15}+nC_{17}+nC_{19})/(nC_{27}+nC_{29}+nC_{31})$ 用来估算内源与外源有机质的相对贡献量^[17-18].为了区分沉水/浮叶植物相对挺水植物与陆生高等植物的比值,研究者提出计算公式: $P_{aq}=(nC_{23}+nC_{25})/(nC_{23}+nC_{25}+nC_{29}+nC_{31})$ ^[19].当 P_{aq} 值小于0.1时,主要是陆生高等植物的输入;当 P_{aq} 值在0.1~0.4时,则挺水植物占优势;当 P_{aq} 值在0.4~1时,生物源主要来自沉水/浮叶植物^[11,19].此外,链状支链烷烃姥鲛烷(P_i)和植烷(P_h),一般被认为主要来源于植物的叶绿素.根据 P_i/P_h 值可以判断沉积环境氧化还原性.咸水湖泊生油岩及原油中 $P_i/P_h<0.5$,表示强还原沉积环境.一般湖相沉积环境总体上属于弱还原弱氧化环境, P_i/P_h 值在1.0~3.0.当 $P_i/P_h>3.0$ 指示氧化环境,多发生在河流、沼泽或泥岩中.根据湖泊沉积环境的氧化还原状况可以间接确定湖泊的水深,初步判断气候的干湿情况.长链正构烷烃的平均链长(ACL_{27-33})也可以用来指示流域内气候和环境的变化.当温度有明显的变化时,来源于高等植物叶片表皮蜡质的正构烷烃有相应的响应,例如流域温度升高时,长链正构烷烃链长加长, ACL_{27-33} 值增大;气温降低, ACL_{27-33} 值则会减小^[20].前提是,沉积环境或气候变化的程度不足以引起物源变化.否则, ACL_{27-33} 仅能提供植被变化的信息.

由于不同类型生物体的正构烷烃组成可能相同或相似,而埋藏过程中又可能会遭到降解过程破坏,使其生物源辨认存在一定困难.真菌孢子正构烷烃的范围在 nC_{14} – nC_{37} ,主峰碳数多为 nC_{27} 、 nC_{29} 或 nC_{31} ^[21].

正构烷烃的单体碳同位素恰恰可以弥补这些不足. 沉积物中部分水生生物所用碳源主要是溶解在水中的 CO_2 , 相对富集碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)^[22], 这样就导致一些藻类和水生植物的正构烷烃单体碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$)值较陆生高等植物的偏重. 当 $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ 值很低时被认为来自甲烷自养细菌, 化学自养细菌的 $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ 值一般为 $-33.4\text{‰} \sim -39.0\text{‰}$, 甲烷自养细菌 $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ 值的范围在 $-38.4\text{‰} \sim -46.3\text{‰}$ 之间^[23]. 来源于藻类长链正构烷烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -30.5‰ , 比高等 C_3 植物的长链正构烷烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值重 4.5‰ ^[24]. 因此, 分子水平的碳同位素分析在有机质精准溯源方面有着巨大的潜力, 能够直接提供准确的生物源输入信息. 通过识别沉积物中的有机质来源, 可以反演一定时期流域内水生菌藻类、挺水/非挺水植物以及陆生高等植物的植被情况, 重塑历史时期流域的生态环境和气候变化.

2.2 脂肪酸技术的应用

脂肪酸是现代沉积物中分布较为丰富的生物标志物之一. 沉积物中脂肪酸的类型和分布特征与有机质类型密切相关^[23-24]. 通常, 不饱和脂肪酸 $\text{C}_{16:1}$ 、 $\text{C}_{18:1}$ 是细菌的产物, 藻类的脂肪酸主要来源于 $\text{C}_{16:0}$ 和 $\text{C}_{18:0}$, 浮游植物的 $\text{C}_{18:1\omega7}/\text{C}_{18:1\omega9}$ 比值通常小于或接近 1, 正反异构脂肪酸 $i\text{-C}_{15:0}$ 、 $\alpha\text{-C}_{15:0}$ 来自厌氧甲烷菌^[25]. 短链脂肪酸($\text{C}_{12}\text{--}\text{C}_{20}$)一般认为来源于浮游生物和细菌, 长链脂肪酸($\text{C}_{21}\text{--}\text{C}_{34}$)主要来自陆生高等植物^[26].

沉积物多以水生生物为主并具有陆生高等植物碎屑输入特征, 脂肪酸因此呈双峰型分布, 偶奇优势明显, 以一元脂肪酸为主, 高碳数峰群占优势, 还有少量二元脂肪酸存在^[25]. 若一元正构饱和脂肪酸呈单峰型分布, 碳数范围集中在 $\text{C}_{12}\text{--}\text{C}_{20}$, 以 C_{16} (主要来源于低等菌藻生物) 为主峰, 则指示了细菌和浮游植物等湖泊微生物是有机质的主要贡献者^[24-26]. 研究者利用 $\Sigma n\text{C}_{20}^+/\Sigma n\text{C}_{21}^+$ 值(L/H_{FA})可用于沉积物中有机质来源的判别, $\text{TAR}_{FA} = (nC_{24} + nC_{26} + nC_{28}) / (nC_{12} + nC_{14} + nC_{16})$, 用来区分陆源和水生生物源的贡献^[27]. 低碳数脂肪酸($<\text{C}_{18}$)偶奇优势明显表征来源于菌藻类, 高碳数脂肪酸($>\text{C}_{20}$)奇偶优势明显则表示高等植物, 所以高 CPI_A 值一般指示菌藻类有机质是主要输入^[28-29]. 作为生物细胞膜的重要组成部分, 脂肪酸为了维持其流动性, 在温度较低的情况下将合成更多的不饱和脂肪酸^[30]. 对比日本琵琶湖和我国固城湖的研究, 较高的游离态脂肪酸 $\text{C}_{18:2}/\text{C}_{18:0}$ 比值对应于较低的环境温度^[31-32]. 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. $\text{C}_{18:2}/\text{C}_{18:0}$ 比值异常波动, 证明了区域气候系统缺乏稳定性, 同时具有短期突变特征.

脂肪酸的碳同位素组成一般与沉积有机质中脂类相似, 不同环境下生长的生物具有不同的碳同位素组成. 低纬度地区, 海洋沉积物中低碳数 $\text{C}_{16:0}$ 和高碳数 $\text{C}_{26:0}$ 饱和脂肪酸的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值相差 -0.3‰ , 指示了浮游生物是其主要生物源^[28]. 大多数的短链($\text{C}_{16}\text{--}\text{C}_{20}$)不饱和脂肪酸可能来自于细菌, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值比长链正构脂肪酸($\text{C}_{20}\text{--}\text{C}_{26}$)的 $\delta^{13}\text{C}$ 轻 $1\text{‰} \sim 3\text{‰}$, 而相同样本中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 分布范围在 $-27.2\text{‰} \sim -27.3\text{‰}$ ^[33]. 脂肪酸作为一类沉积物中含量较丰富的生物标志物能较直接地反映地质年代中初级生产力的变化, 指示陆源、微藻和细菌等不同的来源, 为研究长时间尺度生态环境变化提供了可能. 由于脂肪酸保存机制尚不明确, 且容易受到早期成岩作用的影响, 了解其垂直分布并对比历史记录, 才能有效地研究一定时期内生产力的变化^[34].

3 植被演化序列的碳同位素重建研究

综前所述, 类脂化合物单体碳同位素技术的研究使 ^{13}C 在沉积物有机质来源识别中的应用达到分子级水平. 20 世纪 80 年代末期, 随着气相色谱/碳同位素比值质谱(GC-MS)在线分析技术的问世, 单体碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)技术可以为恢复过去植被变化、重建古气候环境提供了良好的依据^[35]. 根据植物在光合作用过程中对 ^{13}C 不同的分馏作用, 陆生高等植物可划分为 C_3 植物、 C_4 植物和 CAM 植物 3 类^[36-38]. 不同光合途径的分馏程度不一样. 在同外界环境条件下, C_4 植物利用大气中的 CO_2 的效率比 C_3 植物高, 正构烷烃单体碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$)值就可以反映这种特异性. 研究表明, C_3 植物产生的 $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ 值通常比 C_4 植物重 $7\text{‰} \sim 8\text{‰}$ ^[37-38]. 随着碳数的增加, C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ 值一般偏负, 而 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ 值则几乎不变^[39].

应用二元模式可估算陆生高等植物中 C_3 植物和 C_4 植物的相对输入量. 由于碳同位素的组成会因为植物生存的环境以及埋藏地质过程的变化而改变, C_3 和 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ 端元值则被确定为 -34‰ 和 -23‰ ^[36-37]. 公式如下:

$$X = \frac{\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_4}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3} - \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_4}},$$

其中, X 表示 C_3 植物的贡献量, $\delta^{13}C_{n-alkanes}$ 为长链正构烷烃单体碳同位素加权平均值, $\delta^{13}C_{C_3}$ 值为 $-34‰$, $\delta^{13}C_{C_4}$ 值为 $-23‰$. C_3 和 C_4 植物优势临界点则以 $-28.5‰$ 为准, 即 $-28.5‰ \sim -34‰$ 范围内 C_3 植物占优势; $-23‰ \sim -28.5‰$ 范围内 C_4 植物占优势.

环境条件决定着不同光合作用类型植物的分布. C_3 植物多分布在中高纬度高海拔地区, 适应阴凉、日照不强和湿润的气候环境. C_4 植物则分布于低纬度低海拔的环境, 喜高温、强光和干旱. 来自不同生物源的 $\delta^{13}C$ 值可能会有很显著的差异, 利用这种差异可以重建以 C_3 、 C_4 为主要植物类型的生态系统历史格局. 现代 C_3 和 C_4 植物的总有机碳同位素值 ($\delta^{13}C_{org}$) 分别分布在 $-20‰ \sim -34‰$ (平均值为 $-27‰$) 和 $-9‰ \sim -19‰$ (平均值为 $-13‰$)^[38-39]. 沉积物中 $\delta^{13}C_{org}$ 和 $\delta^{13}C_{n-alkanes}$ 值在一定程度上都能够用来确定陆生高等植物的植被类型, 但是用 $\delta^{13}C_{n-alkanes}$ 确定 C_3 、 C_4 植物的相对丰度更加准确和科学. 当 $\delta^{13}C_{n-alkanes}$ 值偏重, 通常以 C_3 植物为主, 说明这段时期流域内冷湿气候占主导地位. 而 $\delta^{13}C_{n-alkanes}$ 值偏轻, 说明以 C_4 植物为主, 气候条件多表现为高温、干旱. 近年来, C_4 植被的扩张被归因为流域内温度和湿度的变化. 低纬度地区的湖泊沉积物研究发现, $\delta^{13}C_{n-alkanes}$ 组成特征明确了 C_3 、 C_4 植物的相对贡献, 同时灵敏地记录了冰期-间冰期温度的变化导致 C_4 植被逐渐在生态格局中占主导地位^[40].

但是, 利用植被类型反演气候和环境变化信息的准确性还存在一定的问题. 在雨量较为充沛的低纬地区发现了部分 C_3 植物, 而 C_4 植物也能适应中纬度温度偏低、气候干旱的环境. 因此, 运用这一技术时要综合考虑各方面的环境因素, 才能真实记录流域内的植被和气候变化状况, 从而为今后流域内气候和生态的改善提供合理的科学依据.

4 生物标志物技术在滇池小流域研究中的应用

4.1 滇池流域概况

滇池是滇池流域主要的水域, 对于改善城市温湿状况、涵养水源、防洪、航运、维持生态平衡有着不可替代的作用. 20 世纪 80 年代以来, 随着滇池流域城市化进程和社会经济的迅猛发展, 大量的污染物质通过入湖河流输入滇池. 滇池生态系统在不断增加的环境压力下, 自我调节功能已经超负荷运作. 2009 年, 总氮(TN)和总磷(TP)浓度分别达到 16.8 mg/L 和 1.4 mg/L, 远远超过国际普遍认定的富营养化浓度参考阈值^[41]. 滇池南部是典型的农业小流域, 化肥应用强度已达到 864 kg/hm², 超过发达国家安全标准的 4 倍之多^[42]. 2009 年, 滇池南部入湖河道水质已经降为 V 类(云南省统计局, 2009). 此外, 由于人类活动影响, 该小流域区域性植被由常绿阔叶林向云南松林(*Yunnan Pinus*)发生次生演替, 一定程度上反映了生态系统由湿润向干旱的逆向演替^[43].

4.2 生物标志物技术指示滇池小流域环境演变的可行性

近年来利用 ^{210}Pb 同位素年代学计算滇池沉积速率的研究较多^[5-6, 13-14, 44], 滇池过去百年间的平均沉积速率为 0.33 cm/a, 南部流域相对沉积较快, 沉积速率一般为 0.63 cm/a(表 1).

表 1 滇池流域沉积速率比较

Table 1 Statistics of sedimentation rate in Dianchi watershed

采样时间	样点位置	沉积速率		参考文献
		^{137}Cs	^{210}Pb	
2011 年	滇池流域南部	—	0.62 cm/a	[13]
		—	0.64 cm/a	[14]
2007 年	滇池中部	—	0.022 g·cm ⁻² ·a ⁻¹	[6]
2003 年	滇池湖心区	0.138 g·cm ⁻² ·a ⁻¹	—	[5]
1988 年	滇池北部	—	0.36 cm/a~0.41 cm/a	[44]

通过沉积物中正构烷烃和脂肪酸的分布特征, 得出滇池流域有机质的来源主要是以水生菌藻类和陆生高等植物混合输入为主^[14, 19]. 其中, 陆源输入的贡献相对大一些. 根据二元模式及碳同位素值计算陆生高等植物中 C_3 、 C_4 植物的贡献量, 得出结论: 在过去的一个世纪里, C_3 (木本) 植物在滇池流域的生态格局中所占比例达到 68.6%. 但进入 21 世纪以来, 由于消极的人类活动影响导致区域内原始生境的变化, C_4 植物(禾本或水生藻类)相对更适应这种变化, C_3 植物则逐渐退化, 由此形成了 C_3 、 C_4 植物共存的植被格

局. 可以推断,该沉积时段流域内的气候由湿润向干旱过渡.

20世纪60年代,大量的营养元素输入,总氮(TN)、总磷(TP)在该深度富集较为明显,这与当时新兴水利政策相吻合,结果也得到两种分子标志物的分布特征的支持^[14,19]. 综上所述,滇池南部小流域近百年来来的生态环境出现明显的退化状态,运用多种生物标志物示踪流域内小尺度气候和环境方面的变化是可行的.

5 结语

目前,环境指标与区域环境要素间的定量化研究还处于发展阶段,常用指标存在一定的复杂性和不确定性,如沉积物磁化率的形成和变化机理尚不明确;孢粉传播广、易扩散,只有少量能保存于沉积物中;对植物硅酸体的形态及来源也较难判断.

多种生物标志物技术和同位素技术的联合应用刚好弥补了上述手段的缺陷,在准确记录沉积环境、识别沉积物中生物来源、构建流域内 C₃ 和 C₄ 植物生态格局以及响应源区气候变化等方面也取得了一定的成果^[45-46]. 现阶段国内外大量的研究主要集中于湖泊、海洋、沼泽沉积物等长时间大尺度方面,对于百年尺度生物标志物的运用还存在一定的争议. 为了准确地提供植被和气候方面的信息,强调环境演变中人类活动的影响机制,生物标志物仍需与物理、化学、生物的多指标比较,注重学科交叉、综合判识,才能完善中国第四纪湖泊数据,全面精确地研究全球植被和气候的变迁,进而为改善各地区各流域的环境做出贡献.

[参考文献]

- [1] IZART A, PALHOL F, GLEIXER G, et al. Palaeoclimate reconstruction from biomarker geochemistry and stable isotopes of *n*-alkanes from carboniferous and early permian humic coals and limnic sediments in western and eastern Europe[J]. Organic geochemistry, 2012, 43(2): 125-149.
- [2] COCKERTON H E, STREE P F A, BARKER P A, et al. Orbital forcing of glacial/interglacial variations in chemical weathering and silicon cycling within the upper White Nile basin, East Africa: stable-isotope and biomarker evidence from Lakes Victoria and Edward[J]. Quaternary science reviews, 2015, 130: 57-71.
- [3] 王苏民, 薛滨, 沈吉, 等. 我国湖泊环境演变及其成因机制研究现状[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 141-148.
- [4] 刘亚生. 云南湖泊沉积与环境演变研究进展[J]. 吉林水利, 2015(1): 1-3.
- [5] 张燕, 彭补拙, 陈捷, 等. 借助 ¹³⁷Cs 估算滇池沉积量[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 71-78.
- [6] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 等. 云南滇池近现代沉积速率及气候干湿变化的粒度记录[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 161-171.
- [7] 吴立, 王心源, 张广胜, 等. 安徽巢湖湖泊沉积物孢粉-炭屑组合记录的全新世以来植被与气候演变[J]. 古地理学报, 2008, 10(2): 183-192.
- [8] 方艳, 刘煜, 张海春, 等. 川东中侏罗统新田沟组介形类化石壳体方解石化特征及元素成分初步分析[J]. 古生物学报, 2012, 51(1): 96-101.
- [9] 韩美, 李艳红, 张维英, 等. 近 30 年来我国湖泊沉积研究的进展[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2003, 18(3): 52-59.
- [10] 李文静, 常凤琴. 过去 2ka 湖泊沉积记录及所揭示的气候环境变化研究进展[J]. 气候变化研究快报, 2014(3): 95-106.
- [11] 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义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 99-104.
- [12] WANG Y H, YANG H, CHEN X, et al. Molecular biomarkers for sources of organic matter in lacustrine sediments in a subtropical lake in China[J]. Environmental pollution, 2013, 176(5): 284-291.
- [13] WANG Y H, YANG H, ZHANG J X, et al. Characterization of *n*-alkanes and their carbon isotopic composition in sediments from a small catchment of the Dianchi watershed[J]. Chemosphere, 2014, 119: 1 346-1 352.
- [14] WANG Y H, YANG H, ZHANG J X, et al. Biomarker and stable carbon isotopic signatures for 100 year-200 year sediment record in the Chaihe catchment in southwest China[J]. Science of the total environment, 2015, 502(502): 266-275.
- [15] MEYERS P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes[J]. Organic geochemistry, 2003, 34(2): 261-289.
- [16] FICKEN K J, LI B, SWAIN D L, et al. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes[J]. Organic geochemistry, 2000, 31(7/8): 745-749.
- [17] FANG D J, WU F C, XIONG Y Q, et al. Source characterization of sedimentary organic matter using molecular and stable car-

- bon isotopic composition of *n*-alkanes and fatty acids in sediment core from Lake Dianchi, China[J]. Science of the total environment, 2014, 473/474(3): 410–421.
- [18] 谢树成, 梁斌, 郭建秋, 等. 生物标志化合物与相关的全球变化[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 521–528.
- [19] 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 and pollution research, 2015, 22(18): 14 314–14 324.
- [20] 蒲阳, 张虎才, 王永莉, 等. 青藏高原冰蚀湖沉积物正构烷烃记录的气候和环境变化信息: 以希门错为例[J]. 科学通报, 2011, 56(14): 1 132–1 139.
- [21] DAI J, SUN M Y. Organic matter sources and their use by bacteria in the sediments of the altamaha estuary during high and low discharge periods[J]. Organic geochemistry, 2007, 38(1): 1–15.
- [22] 段毅, 文启彬, 罗斌杰. 沼泽沉积物中单体正构烷烃碳同位素研究[J]. 科学通报, 1995, 40(19): 1 791–1 794.
- [23] BOVEE R J, PEARSON A. Strong influence of the littoral zone on sedimentary lipid biomarkers in a meromictic lake[J]. Geobiology, 2014, 12(6): 529–541.
- [24] WATERSON E J, CANUEL E A. Sources of sedimentary organic matter in the Mississippi River and adjacent Gulf of Mexico as revealed by lipid biomarker and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ analyses[J]. Organic geochemistry, 2008, 39(4): 422–439.
- [25] 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.
- [26] GIREESHKUMAR T R, DEEPULA P M, CHANDEAMOHANAKUMAR N. Distribution and sources of aliphatic hydrocarbons and fatty acids in surficial sediments of a tropical estuary south west coast of India (Cochin estuary)[J]. Environmental monitoring and assessment, 2015, 187(3): 1–17.
- [27] BAAS M, PANCOST R, GEEL B, et al. A comparative study of lipids in Sphagnum species[J]. Organic geochemistry, 2000, 31(6): 535–541.
- [28] 薛博, 严重玲, 傅强. 水体沉积物中有机碳和有机分子碳稳定同位素研究进展[J]. 海洋科学, 2007, 31(6): 87–91.
- [29] MARR A G, INGRAHAM J L. Effect of temperature on the composition of fatty acids in *Escherichia Coli*[J]. Japanese journal of tropical agriculture, 1962, 84(6): 1 260–1 267.
- [30] 张干, 盛国英, 傅家谟, 等. 固城湖 GS-1 孔 11.87 m–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.
- [31] 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.
- [32] NARAOKA H, ISHIWATARI R. Molecular and isotopic abundances of long-chain *n*-fatty acids in open marine sediments of the western North Pacific[J]. Chemical geology, 2000, 165(1/2): 23–26.
- [33] 向明菊, 史继扬, 周友平, 等. 不同类型沉积物中脂肪酸的分布、演化和生烃意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 84–88.
- [34] 刘亚娟, 王江涛, 贺行良. 东海赤潮高发区沉积物中脂肪酸分布及物源指示意义[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(6): 803–807.
- [35] 郭金春, 刘清浩, 马海洲, 等. 察尔汗盐湖正构烷烃和单体碳同位素分布特征及其古植被意义[J]. 地球化学, 2010, 39(6): 566–573.
- [36] 王延华, 杨浩. 正构烷烃单体碳及氢同位素技术在环境变化研究中的应用[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2011, 11(4): 83–88.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 牛书丽, 蒋高明, 李永庚. C_3 与 C_4 植物的环境调控[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 308–314.
- [40] HUANG Y S, CLEMENS S C, LIU W G, et al. Large-scale hydrological change drove the late miocene C_4 plant expansion in the Himalayan Foreland and Arabian Peninsula[J]. Geology, 2007, 35(6): 531–534.
- [41] 孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 滇池水质时空特征及与流域人类活动的关系[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 347–354.
- [42] 和兰娣, 毕金, 杨赵. 滇池流域典型小流域农业种植情况调查[J]. 环境科学导刊, 2012(5): 38–41.
- [43] 孙湘君, 吴玉书. 云南滇池表层沉积物中花粉和藻类的分布规律及数量特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(4): 81–92.
- [44] 程致远, 梁卓成, 林瑞芬, 等. 云南滇池现代沉积物 ^{210}Pb 法的 CF 模式年龄研究[J]. 地球化学, 1990(4): 327–332.
- [45] CORTES J E, RINCON J M, JARAMILLO J M, et al. Biomarkers and compound-specific stable carbon isotope of *n*-alkanes in crude oils from Eastern Llanos Basin, Colombia[J]. Journal of South American earth sciences, 2010, 29(2): 198–213.
- [46] PAGÈS A, GRICE K, WELSH D, et al. Lipid biomarker and isotopic study of community distribution and biomarker preservation in a laminated microbial mat from Shark Bay, Western Australia[J]. Microbial ecology, 2015, 70(2): 459–472.