

巢湖柱状沉积物中甘油二烷基甘油四醚脂 (GDGTs) 的组成特征*

王丽芳^{1,2}, 熊永强³, 吴丰昌^{4**}, 房吉敦^{1,2}, 李 芸³

(1: 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

(2: 中国科学院研究生院, 北京, 100049)

(3: 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640)

(4: 中国环境科学研究院湖泊生态环境基地国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012)

摘 要: 甘油二烷基甘油四醚脂 (GDGTs) 是目前生物地球化学研究的热点之一. 与 GDGTs 有关的指标已成功地应用在海洋环境中有关来源辨识和古环境古气候重建的研究, 但是在湖泊环境中的应用目前还比较有限. 通过开展巢湖柱状沉积物中 GDGTs 的组成测定, 为 GDGTs 类脂分子标志物在湖泊系统中的应用提供依据. 研究表明由柱状沉积物中支链 GDGTs 参数计算得到的量化结果与巢湖周围流域的环境温度、pH 等历史记录能较好地吻合; 柱状沉积物中类异戊二烯类 GDGTs 来源的不确定性可能是造成 TEX_{86} 指标的量化结果和实际的水体温度出现较大偏差的重要原因. 另外, 沉积物中 GDGTs 指标和 TOC、C/N、 $\delta^{13}C_{org}$ 、 $\delta^{15}N$ 等传统湖泊总体有机质参数以及其它分子标志物指标相比, 具有高分辨性和抗干扰等特点. 因此, 湖泊中 GDGTs 有望成为湖泊古气候和古环境重建的重要指标.

关键词: GDGTs; 古气候; 古环境; 湖泊沉积物; 巢湖

The composition and characteristics of glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) in core sediment from Lake Chaohu

WANG Lifang^{1,2}, XIONG Yongqiang³, WU Fengchang⁴, FANG Jidun^{1,2} & LI Yun³

(1: State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, P. R. China)

(2: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

(3: State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, P. R. China)

(4: State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control/Research Center of Lake Eco-environments, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P. R. China)

Abstract: Glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) is one of the recent hotspot in biogeochemical study. The proxies from GDGTs have been used successfully to reconstruct paleoenvironment and paleoclimate in many marine environments, however, its application in lacustrine environment is very limited. This study provided a valuable reference for the application of GDGTs in lake systems by analyzing the characteristics of GDGTs in core sediment from Lake Chaohu. Our study suggested that the quantification that was obtained by the proxies from branched GDGTs in core sediment from Lake Chaohu had a good agreement with the historical record including environmental temperature and pH in Chaohu basin. The quantification obtained by the proxies from isoprenoid GDGTs differed from the actual surface water temperature. It was possible that there are different source in sediment core. In addition, compared with the traditional parameters of total organic matter in lake such as TOC, C/N ratios, $\delta^{13}C_{org}$ and $\delta^{15}N$ values,

* 中国科学院重要方向项目 (KZCX2 - YW - 102)、国家重点基础研究发展规划项目 (2008CB418200)、国家自然科学基金项目 (40525011, U0833603, 40873080)、中国环境科学院项目 (2007KYYW01) 和中国科学院有机地球化学国家重点实验室开放基金资助项目 (OGL - 200603) 联合资助. 2009 - 06 - 24 收稿; 2009 - 09 - 03 收修改稿. 王丽芳, 女, 1982 年生, 博士研究生; E-mail: wanglifang1982@hotmail.com.

** 通讯作者; E-mail: wufengchang@vip.skleg.cn.

the proxies from GDGTs had higher resolution and stronger jam proof ability. So GDGTs may be a significant proxy to reconstruct paleoenvironment and paleoclimate.

Keywords: GDGTs; paleoclimate; paleoenvironment; lacustrine sediments; Lake Chaohu

找寻适用于恢复古气候、古环境的分子化石指标是当今分子地层学研究中的前沿课题之一. 近年来, 甘油二烷基甘油四醚脂 (Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers, GDGTs) 以其独特的生物化学性质成为生物地球化学研究的热点之一. 它被发现海洋^[1]、湖泊^[2]、土壤^[3]、泥火山^[4]和冷泉^[5]等各种沉积物中广泛分布. 过去认为 GDGTs 只在嗜热古菌中存在, 现在被证明 GDGTs 也广泛存在于土壤、海洋和湖泊等的非嗜热古菌和厌氧菌中^[6]. 目前 GDGTs 的研究主要包括支链 GDGTs (I-III) 和类异戊二烯 GDGTs (IV-IX) 两部分 (分子结构见图 1). 由于 GDGTs 母源体对环境变化极为敏感, 已成功应用在古环境、古气候重建等方面的研究中^[2,6-8]. Schoutern 等^[6]提出的利用 GDGTs 的有机地球化学指标 TEX_{86} , 已广泛应用在古老地层中作为古海水表面温度的重建. 这种指标与传统的有孔虫氧同位素地球化学与微体古生物转换函数法相比, 不受表层水体的营养状况、碳酸盐浓度、盐度等海水参数的影响, 且能应用于更加广泛的区域 (缺乏有孔虫的沉积物) 和更加古老的地层中. 此外, Weijers 等^[9]基于 134 份土壤样品提出的支链 GDGTs 的环化指标 (CBT) 与土壤 pH 值是密切相关的, 进而通过对甲基化指标 (MBT)、环化指标 (CBT) 和年平均气温 (MAT) 作三维散点图, 发现三者间具有明显的相关性, 因此可以利用 CBT/MBT 重建湖泊流域内的年平均气温.

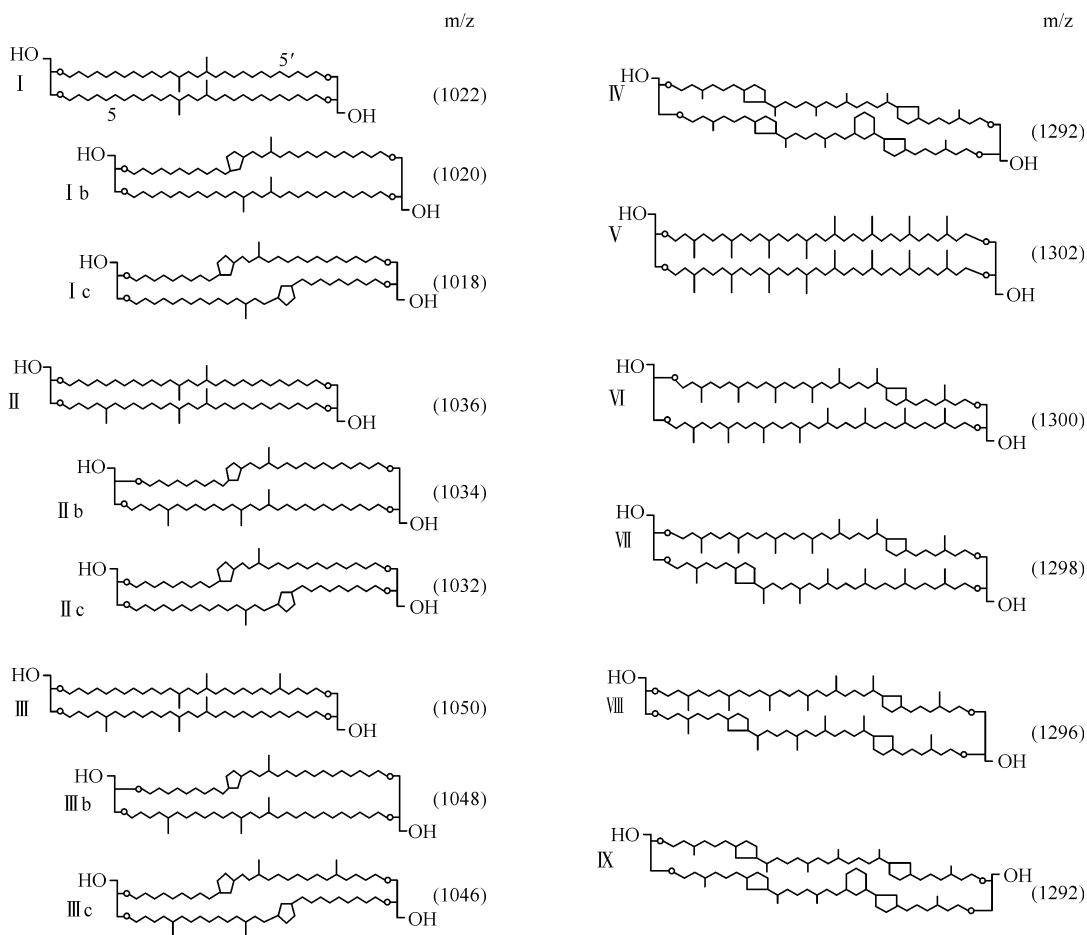


图 1 甘油二烷基甘油四醚脂 (GDGTs) 分子结构 (IV: Crenarchaeol; IX: Crenarchaeol 异构体)

Fig. 1 Structures of GDGTs

湖泊沉积物是陆相古气候古环境研究的重要载体^[10]. 湖泊沉积物中古温度重建一直是第四纪地质地球化学研究的重点, 并且提出各种有效的温度重建指标. GDGTs 已经被应用到湖泊环境中^[2], 但是与海洋沉积物相比, 目前湖泊沉积物中有关 GDGTs 的研究非常有限. 因此, 本文利用巢湖沉积柱中记录的 50 年来 GDGTs 的分布和组成, 利用目前仅有的量化指标得到的计算值和湖泊环境的实测值进行比较, 研究 GDGTs 指标在湖泊沉积物中应用的可行性, 为 GDGTs 在湖泊中的进一步研究提供重要基础.

1 样品和实验

1.1 样品采集

沉积物柱样于 2005 年 5 月采自巢湖. 野外现场按照 1cm 间隔对沉积物柱样进行精细分样, 分别装入 100ml 离心管, 封口胶密封. 样品带回实验室冷冻干燥, 除去植物和贝类等残体, 研磨, 过 100 目(0.149mm)筛, 备用.

1.2 样品预处理

分别取巢湖沉积物表层 2cm, 4cm, 6cm, 7cm, 8cm, 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 18cm 处共 10 个样品进行 GDGTs 测定. 首先用甲醇(3×)、二氯甲烷/甲醇(1:1, V/V)(3×)和二氯甲烷(3×)对沉积物进行超声抽提, 水洗去除水溶性物质, 过无水硫酸钠柱除水, 二氯甲烷作为洗脱液; 对得到的总类脂抽提物(TLE)进行氧化铝柱色谱分离, 正己烷/二氯甲烷(9:1, V/V)冲洗非极性组分, 用二氯甲烷/甲醇(1:1, V/V)冲洗得到含有 GDGTs 的极性组分. GDGTs 组分在氮气下吹干, 重新溶在正己烷/丙醇(99:1, V/V)中, 超声 15min, 取上清液用 0.45 μ m 微孔滤膜进行过滤, 滤液浓缩后采用高压液相色谱-质谱(HPLC-APCI-MS)对完整的 GDGTs 进行分析.

1.3 分析测定

沉积物总有机碳(TOC)、总氮(TN)以及总有机碳的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和总氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 分析在中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室完成, 测定仪器为元素分析仪 CHNS Vario E1III 和 Finnigan Delta Plus XL 同位素比值质谱, 样品测定前用盐酸去除碳酸盐.

GDGTs 分析采用 Agilent Technologies 6410 Triple Quad 高压液相色谱-质谱仪(HPLC-APCI-MS), Prevail Cyano 柱(2.1×150mm, 3 μ m; Alltech, Deerfield, IL, USA). 进样体积 10 μ l, 采用 99% A(正己烷)和 1% B(正丙醇)洗脱 5min, 然后 B 以线性梯度增加到 25min 时的 1.4%, 26min 达到 20%, 36min 时达到 30%. 流速为 0.2ml/min, 每次分析后, 用正己烷/正丙醇(99:1, V/V)平衡 10min. APCI-MS 条件如下: 喷雾器压力 60psi, 温度 400 $^{\circ}\text{C}$, 干燥 N_2 流速 6L/min 和温度 325 $^{\circ}\text{C}$, 毛细管电压 3kV, 电晕电流 5 μ A. 为了提高灵敏度和重现性, 采用单离子检测(Single Ion Monitoring, SIM)方式(m/z 1302(V), 1300(VI), 1298(VII), 1296(VIII), 1292(Crenarchaeol, IV), 1050(III), 1048(IIIb), 1046(IIIc), 1036(II), 1034(IIb), 1032(IIc), 1022(I), 1020(Ib) 和 1018(Ic))进行扫描和峰面积的积分定量.

2 结果和讨论

2.1 巢湖总有机质特征

巢湖位于中国安徽省中部, 属长江下游左岸水系, 是中国五大淡水湖泊之一. 根据姚书春等^[11]测得巢湖平均沉积速率为 0.27cm/a, 因此推算出巢湖 18cm 沉积柱代表 1940 年以来的湖泊沉积记录. 根据总有机碳(TOC)、总氮(TN)、碳氮比(TOC/TN)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的剖面变化特征(图 2), 可以看出巢湖沉积剖面总有机质各参数变化特征明显, 可以 1978 年为界分为两个阶段: 第一阶段(1940-1978 年)总有机质参数比较稳定, 主要变化发生在第二阶段(1978-2005 年).

长江中下游地区湖泊众多, 集中了我国约 2/3 的淡水湖泊. 由于该地区近二十年来经济的高速发展, 湖泊周边城市工业、农业和生活污水源源不断地排入湖泊, 该地区多数湖泊已经富营养化或正在富营养化^[12], 其中巢湖更是富营养化严重的三大湖泊之一^[13]. 总有机碳和总氮从 1978 年以来呈现明显的增加趋势, TOC 和 TN 分别增加 30% 和 50% (图 2). 陆生高等植物 C/N 比一般为 20-30, 甚至是 45-50; 而低等植物如湖泊藻类等浮游生物的 C/N 比值较低, 通常为 5-12, 一般小于 10^[14-15]. 巢湖的 C/N 比值变化在 9.3-11.4, 并且

揭示出 1978 年以来湖泊内源藻类对湖泊沉积物中有机质的贡献有所增加. 沉积物中氮同位素组成能反映有机物质来源. 最直观参考是: 陆源物质 $\delta^{15}\text{N}$ 约为 1‰, 藻类约为 8‰, 外源输入如农业化肥以及城市污染物的输入也可以导致 $\delta^{15}\text{N}$ 升高^[13]. $\delta^{15}\text{N}$ 从 1978 年来从 7‰ 持续增加到 9‰, 表明内源藻类的增多以及人类活动的输入对巢湖沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 的增加都可能具有重要影响 (图 2), 总有机质的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在这个沉积柱中的变化不明显. 由于水体中的藻类 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在 -12‰ 至 -24‰ 之间; 而来自浮游植物和陆源植物一般利用大气中的 CO_2 作为碳源, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏负, 在 -24‰ 至 -30‰^[16]; 此外, 还有一些沉水植物和细菌也是湖泊沉积物中有机碳的来源之一. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值自 1978 年以来变化范围在 -24.8‰ 至 -24.0‰ 之间, 可能是湖泊中有机碳来源复杂的最终体现. 通过上述讨论, 推测巢湖沉积剖面中各种总体有机质的特征在 1978 年以来的显著变化, 可能是由于湖泊富营养化加剧导致的结果.

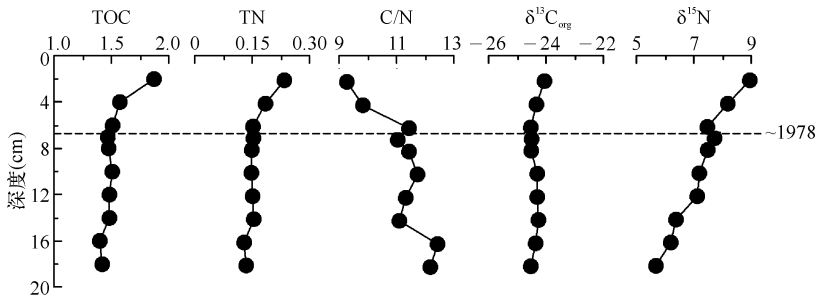


图 2 巢湖沉积剖面总有机质的变化特征

Fig. 2 Down-core variation of TOC, TN, C/N, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ in the Lake Chaohu sediment core

2.2 巢湖沉积物中的类异戊二烯类 GDGTs

类异戊二烯类 GDGTs 被认为是古菌 (archaea) 细胞质膜中特有的, 它主要由类异戊二烯单元通过醚键结合到甘油结构上组成, 因此类异戊二烯类 GDGTs 往往作为古菌存在的生物标志化合物^[17]. 最初认为古菌只能生长在高盐、高温 (60℃ 以上)、强酸和缺氧的极端环境下, 属于嗜热古菌 (thermophilic archaea) 或超嗜热古菌 (hyperthermophilic archaea), 但后来的研究表明在 0–30℃ 的海洋和湖泊中也存在着大量的非嗜热泉古菌^[18–22]. 非嗜热泉古菌和嗜热、超嗜热古菌都能合成类异戊二烯 GDGTs, 非嗜热泉古菌合成的类异戊二烯 GDGTs 包括含有 0–3 个环戊烷 (cyclopentanemioieties) 的 GDGTs V–VIII, crenarchaeol (GDGT IV) 以及 crenarchaeol 的异构体 (GDGT IV')^[23–24], 而嗜热或超嗜热古菌却不能合成 GDGT IV 及其异构体 GDGT IV', 因此认为 GDGT IV 以及 GDGT IV' 的异构体是非嗜热泉古菌的特征指示物. 巢湖沉积物中类异戊二烯类 GDGTs 主要以 GDGT IV 为主, 表明主要来自非嗜热泉古菌的贡献.

研究表明, 沉积物中类异戊二烯类 GDGTs 的组成和古菌所处环境的温度具有很强的相关性. 因此 Schouten 等^[6] 通过分析来自全球多个海洋的沉积物, 提出基于类异戊二烯 GDGTs 组成特征的 TEX_{86} (TetraEther index of lipids with 86 carbons atoms) 温度指标, 定义为: $TEX_{86} = (\text{VII} + \text{VIII} + \text{IV}) / (\text{VI} + \text{VII} + \text{VIII} + \text{IV})$. 结果显示, TEX_{86} 和海洋年平均表层水温 (SST) 线性相关如下: $SST = (TEX_{86} - 0.28) / 0.015$, 相关性系数 $R^2 = 0.92$ ^[6].

本研究利用上述的公式, 计算得出巢湖各深度沉积物中所反映当时的水温 T 值在 15.0–34.2℃ 之间, 平均值为 $23.8 \pm 6^\circ\text{C}$ (表 1 和图 3). 中国湖泊库的数据表明巢湖多年平均水温为 17.3℃, 年际变化很小. 计算值的结果不仅具有较大幅度的波动, 和这一时期记录的湖水实际温度值也相差甚大, 可能由于湖泊环境中 GDGT IV 的丰度比海洋中的低, 而且湖泊通常接受更多的陆源 GDGTs. 最近的研究发现土壤中通常也含有少量类异戊二烯类 GDGTs, 大量陆源物质输入在一定程度上干扰 TEX_{86} 指标对湖水温度的重建. Wuchter 等^[25] 也建议 TEX_{86} 指标要在水体中古菌数量较丰富的情况下使用, 这样可以得到完整的类异戊二烯 GDGTs 组分相对温度变化做出的改变. 而根据 Gabriele Trommer 等^[8] 最新的研究发现, 特殊的地方性泉古菌也可能使 TEX_{86} 和海洋年平均表层水温 (SST) 的线性关系发生大的偏差. 因此, 巢湖的数据表明利用类异戊二烯类

GDGTs 的 TEX_{86} 指标在湖泊沉积物中重建水体温度时应小心谨慎.

表1 巢湖沉积物柱样中 GDGTs 参数特征
Tab.1 Parameters of GDGTs in the Lake Chaohu sediment core

样号	深度(cm)	<i>BIT</i>	<i>MBT</i>	<i>CBT</i>	TEX_{86}	$T^{1)}\text{ }^{\circ}\text{C}$	pH	<i>MAT</i> ($^{\circ}\text{C}$)
CH-4-2	2	0.99	0.45	0.29	0.62	21.9	8.0	13.5
CH-4-4	4	0.98	0.47	0.25	0.52	15.0	8.1	15.3
CH-4-6	6	0.99	0.45	0.30	0.66	24.9	8.0	13.8
CH-4-7	7	0.98	0.48	0.25	0.58	19.2	8.1	15.5
CH-4-8	8	0.98	0.46	0.34	0.80	34.2	7.9	13.8
CH-4-10	10	0.96	0.46	0.35	0.58	19.3	7.9	13.7
CH-4-12	12	0.95	0.47	0.28	0.68	26.1	8.0	14.5
CH-4-14	14	0.95	0.47	0.26	0.56	18.2	8.1	14.8
CH-4-16	16	0.94	0.47	0.29	0.68	26.0	8.0	14.5
CH-4-18	18	0.95	0.46	0.31	0.78	32.9	8.0	13.8

$T^{1)}$: 根据 TEX_{86} 指标计算得到的湖水表面温度.

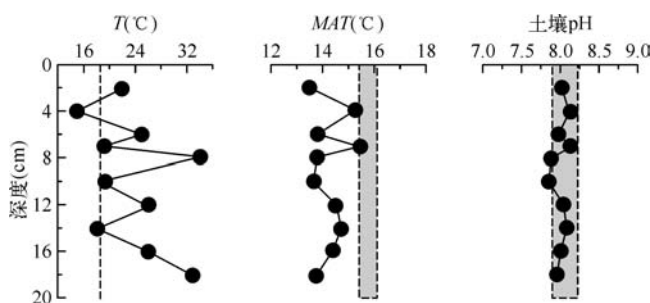


图3 巢湖沉积柱中 GDGTs 记录的计算值和实际值对照图
(其中实线是计算值,虚线是多年平均实际值(区间))

Fig.3 Comparison between calculation value and actual value of T , MAT and soil pH

2.3 巢湖沉积物中的支链 GDGTs

支链 GDGTs(I-III)是指在 GDGTs 碳链的 5 和 5'号位上分别含有 0,1 或 2 个甲基链,GDGTs(I b-III b 和 I c-III c)则分别含有一或两个环戊烷.巢湖沉积物中含有丰富的支链 GDGTs(I-III).按照 Hopmans 等^[26]对陆地土壤和泥炭的研究发现,支链 GDGTs(I-III)在土壤和泥炭中占绝对主导地位,主要来自土壤中的细菌和古菌.巢湖 GDGTs 物源判别指标 BIT (Branched and Isoprenoid Tetraether, $BIT = [I + II + III] / [I + II + III + IV]$) 在 0.95 - 0.99 之间,显示出巢湖沉积物中来自土壤源的支链 GDGTs(I-III)具有绝对的贡献.

Weijers 等^[9]指出,来自土壤中的细菌和古菌可以通过改变支链 GDGTs 中环戊烷的数量来适应周围环境的改变,而进一步的研究发现温度对来自土壤古菌的支链 GDGTs 中环戊烷的数量没有明显影响($R^2 = 0.03$),古菌所处环境的氢离子浓度是影响支链 GDGTs 中环戊烷数量变化的主要因素.因此定义支链类 GDGTs 环化指标 CBT (Cyclisation ratio of Branched Tetraethers); $CBT = -\lg([I b + II b] / [I + II])$,同时给出 CBT 和土壤 pH 值之间的线性关系: $CBT = 3.33 - 0.38 \cdot \text{pH}$ ($R^2 = 0.70$).根据上述公式,从巢湖各深度沉积物中支链 GDGTs 含量计算 pH 值介于 7.9 - 8.1 之间(图 3,表 1).从中国土壤数据库的数据显示,巢湖上游流域内土壤类型主要发育于长江冲积母质,pH 值在 7.8 - 8.5 之间,这与计算结果相吻合.

此外,Weijers 等^[9]的研究还发现温度对来自土壤古菌的支链 GDGTs 中主碳链甲基的数量具有明显的控制因素.定义支链 GDGTs 的甲基化指标 MBT (Methylation Index of Branched Tetraethers); $MBT = [I +$

$Ib + Ic] / [I + Ib + Ic + II + IIb + Iic + III + IIIb + IIIc]$. 进一步通过对 134 份土壤样品 GDGTs 的甲基化指标 *MBT*、环化指标 *CBT* 和年平均气温 *MAT* 作三维散点图, 发现三者间具有明显的相关性, 给出相关的公式: $MBT = 0.122 + 0.187 \cdot CBT + 0.020 \cdot MAT$ ($R^2 = 0.77$). 经验公式计算巢湖沉积物中对应的年平均气温在 13.5 - 15.5°C, 平均值为 14.3°C. 而根据中国湖泊数据库的数据显示, 巢湖流域多年平均气温为 15.5 - 16.1°C^[27], 两者间的差异可能是由于 GDGTs 的分析误差以及计算湖泊流域年平均气温关系式等引入的误差造成的.

上述结果显示, 通过利用来自土壤的模拟数据公式运用在湖泊沉积物中, 沉积物中支链 GDGTs 同样能很好地恢复反映土壤背景下的 pH 值和流域内大气温度.

2.4 巢湖 GDGTs 在湖泊研究中的意义

在过去 50 年来, 巢湖由于受到人为活动的影响, 湖泊环境发生巨大变化, 特别是近二十年来湖泊发生富营养化, 使得湖泊沉积物中有机碳、氮出现明显的增加(图 2)^[28]. 由巢湖总有机质的变化特征(图 2)可以看出, 人为活动的影响会对湖泊沉积物中各种分子化石指标造成一定干扰, 而巢湖沉积柱中支链 GDGTs 的各种参数指标, 能够很好地记录下巢湖周围流域环境气候因素, 并且支链 GDGTs 表现出较强的抗干扰能力, 没有受到湖泊沉积作用和水体化学过程的影响.

传统的碳同位素构建湖泊古温度, 往往反映的只是温度的相对变化趋势, 并且由于碳来源比较复杂, 受控因素多解. 因此到目前为止, 对湖泊沉积物有机质¹³C 的形成机理以及与古温度间的关系问题尚未形成一致的认识. 通过对沉积物中 GDGTs 的定性定量分析就可以定量重建流域古环境古气候, 这是传统碳同位素做不到的.

GDGTs 已成功的应用在海洋、土壤等古环境古气候的重建, 然而由于 GDGTs 指标用于湖泊研究的工作还比较薄弱, 许多基础方面的研究还有待加强, 比如湖泊沉积物中类异戊二烯类 GDGTs 的来源还存在一些不确定因素, 这可能是类异戊二烯类 GDGTs 相关参数 TEX_{86} 应用受到限制的重要原因.

3 结论

(1) 研究结果表明湖泊沉积物有机质中 GDGTs 主要来自陆源有机质. 支链 GDGTs 的 *MBT/CBT* 指标能很好地响应湖泊流域内年平均温度, 可以作为湖泊流域古温度重建的有力指标; 利用环化指标 *CBT* 计算得到的巢湖流域土壤的 pH 值与实际数值很好的吻合. 类异戊二烯类 GDGTs 的 TEX_{86} 参数, 在重建巢湖水体温度时应谨慎.

(2) 与传统的湖泊沉积物古温度研究相比, GDGTs 在湖泊古气候古环境的研究方面具有很多优势, 将可能成为今后湖泊第四纪研究的重要工具之一.

4 参考文献

- [1] Schouten S, Hopmans EC, Pancost RD *et al.* Widespread occurrence of structurally diverse tetraether membrane lipids; evidence for the ubiquitous presence of low-temperature relatives of hyperthermophiles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, **97**: 14421-14426.
- [2] Powers LA, Werne JP, Johnson TC *et al.* Crenarchaeotal membrane lipids in lake sediments: a new paleotemperature proxy for continental paleoclimate reconstruction? *Geology*, 2004, **32**: 613-616.
- [3] Weijers JWH, Schouten S, Spaargaren OC *et al.* Occurrence and distribution of tetraether membrane lipids in soils: implications for the use of the TEX_{86} proxy and the BIT index. *Organic Geochemistry*, 2006, **37**: 1680-1693.
- [4] Stadnitskaia A, Blinova V, Ivanov MK *et al.* Lipid biomarkers in sediments of mud volcanoes from the Sorokin Trough, NE Black Sea: Probable source strata for the erupted material. *Organic Geochemistry*, 2007, **38**: 67-83.
- [5] Pancost RD, Chopmans E, Sinninghe JS. Archaeal lipids in Mediterranean cold-seeps: molecular proxies for anaerobic methane oxidation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, **65**: 1611-1627.
- [6] Schouten S, Hopmans EC, Schefuß E *et al.* Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures? *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **204**: 265-274.
- [7] Francien Peterse, Jung-Hyun Kim, Stefan Schouten *et al.* Constraints on the application of the *MBT/CBT* palaeothermometry.

- eter at high latitude environments (Svalbard, Norway). *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 692-699.
- [8] Gabriele Trommer, Michael Siccha, Marcel TJ *et al.* Distribution of Crenarchaeota tetraether membrane lipids in surface sediments from the Red Sea. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**: 724-731.
- [9] Weijers JWH, Schouten S, van den Donker JC *et al.* Environmental controls on bacterial tetraether membrane lipid distribution in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, **71**: 703-713.
- [10] Meyers PA, shiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, 1993, **20**: 867-900.
- [11] 姚书春, 薛滨, 李世杰等. 长江中下游湖泊沉积速率的测定及环境意义——以洪湖、巢湖、太湖为例. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(5): 569-573.
- [12] 秦伯强. 我国湖泊富营养化及其水环境安全. 科学对社会的影响, 2007, **3**: 17-23.
- [13] 周志华, 刘丛强, 李军等. 巢湖沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 记录的生态环境演化过程. 环境科学, 2007, **28**(6): 1338-1343.
- [14] Krishnamurthy RV, Bhattacharya SK, Sheela K. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa lake sediments. *Nature*, 1986, **323**: 150-152.
- [15] Meyers PA, Shoji H. An organic carbon isotopic of glacial-postglacial change in atmospheric pCO_2 in the sediments of Lake Biwa, Japan. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1993, **105**: 171-178.
- [16] 王秋良, 谢远云, 梅惠. 湖泊沉积物中有机碳同位素特征及其古气候环境意义. 安全与环境工程, 2003, **10**(4): 17-21.
- [17] Hanford MJ, Peoples TL. Archaeal tetraether lipids. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2002, **97**: 45-62.
- [18] Karner MB, DeLong EF, Karl DM. Archaeal dominance in the mesopelagic zone of the Pacific Ocean. *Nature*, 2001, **409**: 507-510.
- [19] DeLong EF, Wu KY, Prezelin PP *et al.* High abundance of Archaea in Antarctic marine picoplankton. *Nature*, 1994, **371**: 695-697.
- [20] Fuhrman JA, McCallum K, Davis AA. Novel major archaeobacterial group from marine plankton. *Nature*, 1992, **356**: 148-149.
- [21] MacGregor BJ, Moser DP, Alm DW *et al.* Crenarchaeota in Lake Michigan sediment. *Applied and Environment Microbiology*, 1997, **63**: 1178-1181.
- [22] Hershberger KL, Barns SM, Reysenbach AL *et al.* Wide diversity of Crenarchaeota. *Nature*, 1996, **384**: 420.
- [23] Schouten S, Hopmans EC, Pancost RD *et al.* Widespread occurrence of structurally diverse tetraether membrane lipids: Evidence for the ubiquitous presence of low temperature relatives of hyperthermophiles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, **97**: 14421-14426.
- [24] Sinninghe Damsté JS, Hopmans EC, Schouten S *et al.* Crenarchaeol: the characteristic core glycerol dibiphytanyl glycerol tetraether membrane lipid of cosmopolitan pelagic Crenarchaeota. *Journal of Lipid Research*, 2002, **43**: 1641-1651.
- [25] Wuchter C, Schouten S, Coolen MJL *et al.* Temperature-dependent variation in the distribution of tetraether membrane lipids of marine Crenarchaeota: implications for TEX_{86} paleothermometry. *Paleoceanography*, 2004, **19**: 1-22.
- [26] Hopmans EC, Weijers JWH, Schefuß E *et al.* A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, **224**: 107-116.
- [27] 黄庆丰, 高健, 吴泽民. 巢湖低丘不同森林类型物种多样性数量特征研究. 安徽农业大学学报, 2003, **30**(2): 163-167.
- [28] 姚书春, 李世杰. 巢湖富营养化过程的沉积记录. 沉积学报, 2004, **22**(2): 343-347.