论文

生物有机指标在气候和环境变化研究中的应用进展专题

中国东海过去 1.4 万年以来的沉积演化: 基于脂类标记物的古环境重建

葛黄敏^{①②}, 张传伦^{①*}, Gerard J. M. VERSTEEGH^③, 陈玲玲^①, 范代读^①, 董良^①, 刘晶晶^①

① 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

② 上海海洋大学深渊科学技术研究中心, 上海深渊科学技术研究中心, 上海 201306;

③ Heisenberg group on Marine Kerogen, Center for Marine Environmental Sciences (MARUM), Bremen University, D 28359, Germany

* 通讯作者, E-mail: archaeazhang_1@tongji.edu.cn

收稿日期: 2015-07-13; 接受日期: 2015-09-14; 网络版发表日期: 2016-01-28

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2013CB955703)、中国地质调查项目(编号: GZH201100203)、国家自然科学基金项目(批准号: 91028005)、中央高校基础科研项目(编号: 2013CB429701)、同济大学海洋地质国家重点实验室千人计划项目、德意志研究联合会黑森堡项目(编号: VE486/2-2)和上海深渊科学技术研究中心筹建项目(编号: 14DZ2250900)资助

摘要 中国东海自末次冰消期以来, 经历了多次海平面快速上升的气候事件, 为了解这种频繁的海侵过程对中国东部大陆架海域的影响, 本文利用有机地球化学方法分析了位于长江口水下三角洲的柱状岩芯样品, 并据此重建了该区域过去 1.4 万年以来的沉积环境演化. 本次记录反映了两种不同的沉积环境, 阶段 I (13.8~8 cal ka BP)以陆相环境为主, 具体表现在细菌支链甘油二烷基甘油四醚(缩写为 brGDGTs, 平均浓度值约 143 ng/g 沉积物干重, GDGT 浓度单位缩写为 ng/g dsw)的浓度明显高于古菌类异戊二烯甘油二烷基甘油四醚(缩写为 iso-GDGTs, 平均浓度值约 36 ng/g dsw), 陆源输入指标值(BIT)接近陆相端元(>0.78), 同时 GDGT-0/crenarchaeol (R_{05})的比值也在高值区间剧烈波动(0.52~3.81). 阶段 I 还出现了短暂的气候变化事件, 分别跟新仙女木事件(YD, 12.9~12.2 cal ka BP)和北半球冰融水事件(MWP-1B, 11.5~11.1 cal ka BP)相对应. 各项环境指标在 8~7.9 cal ka BP 均发生了显著的变化, 以 BIT 值的快速下降(<0.4)和海洋古菌标志物 crenarchaeol 的优势丰度为特征, 进入海相沉积的阶段 II. 此后, 各项参数保持相对平稳, 暗示该阶段处于稳定的高海平面的现代海洋沉积环境. BIT 指标在本次工作中得到极好的应用, 可以准确区分陆相和海相环境. 鉴于阶段 I 陆相环境的 BIT 高值, 由 TEX₈₆(TetraEther Index of tetraethers consisting of 86 carbons)衍生的表层海水温度指标 TEX₈₆-SST 在阶段 I 未能真实地反映表层海水温度信息, 该指标在阶段 II ((21.6±0.9)°C, $n=49$)则反应了年平均表层海水温度. 基于 MBT'/CBT(Methylation of Branched Tetraethers)/Cyclization of Branched Tetraethers)的平均大气温度(MAT)在整个记录中呈现出缓慢下降的趋势((14.3±0.6)°C, $n=68$), 跟长江流域中下游的年平均大气温度一致, 证实了 MBT'/CBT-MAT 在该海域的适用性.

中文引用格式: 葛黄敏, 张传伦, Versteegh G J M, 陈玲玲, 范代读, 董良, 刘晶晶. 2016. 中国东海过去 1.4 万年以来的沉积演化: 基于脂类标记物的古环境重建. 中国科学: 地球科学, 46: 127~140, doi: 10.1360/07SCES-2015-0119

英文引用格式: Ge H M, Zhang C L, Versteegh G J M, Chen L L, Fan D D, Dong L, Liu J J. 2016. Evolution of the East China Sea sedimentary environment in the past 14 kyr: Insights from tetraethers-based proxies. Sci China Earth Sci, doi: 10.1007/s11430-015-5229-9

关键词 GDGTs指标, 沉积环境演化, 全新世, 中国东海

1 引言

河流输入会带来丰富的陆源物质, 大陆架边缘海因此有着地球系统中最为复杂的沉积过程. 除了物源多样性, 大陆架边缘海还面临着海平面变化和海岸带活跃的环流系统的影响, 使得重建其沉积史困难重重, 需要综合考虑多种因素的影响, 例如, 快速海平面上升会导致海洋的沉积中心向海推进, 导致沉积物供应不足, 而海平面缓慢下降则对应着三角洲沉积相的形成(Liu等, 2007; Stanley和Warne, 1994; Stanley和Chen, 1996).

中国东部海域(包括渤海、黄海和东海)是典型的受控于大型河流输入影响的大陆架边缘海体系, 从长江和黄河接收了丰富的陆源输入(Liu等, 2007). 关于该海域的沉积物来源和古环境重建等方面的研究工作很多, 研究手段也多种多样, 包括地震剖面和岩相学(Chen和Stanley, 1993; Chen等, 2000; Li等, 2002; Liu等, 2007), 粒度分析(Xiao等, 2006), 有孔虫种属分析和壳体稳定同位素(Xu和Oda, 1999), 以及矿物学分析(Dou等, 2010)等. 但是, 关于长江口三角洲和东海的沉积演化仍然存在问题, 如海平面上升过程对应着哪些环境参数的演变, 仍需要更深入的研究.

GDGTs作为古菌和细菌膜脂结构的主要成分之一, 其丰度、分布及衍生的相关环境指标除了用来了解现代生物过程, 也成为重建古环境和古气候的重要手段(参考Pearson和Ingalls, 2013; Schouten等, 2013). 近年来, 基于iso-GDGT的TEX₈₆(TetraEther Index of tetraethers consisting of 86 carbons)成为重建年平均表层海水温度(Sea Surface Temperature, SST)的新兴指标(例如, Schouten等, 2002, 2013; Kim等, 2008, 2010; Brochier-Armanet等, 2008; Spang等, 2010; Pearson和Ingalls, 2013), 广泛用于开放性大洋(例如, Huguet等, 2006b, 2011; Seki等, 2009; Biton等, 2010; Shintani等, 2011). 陆源输入指标BIT(Branched vs. Isoprenoidal Tetraether)用于指示来源于陆地土壤的有机物对水体环境的贡献量(例如, Hopmans等, 2004; Herfort等, 2006a; Huguet等, 2007, 2008; Walsh等, 2008; Zhu等, 2011; Zhang等, 2012; Schouten等,

2013; Ge等, 2014). 基于brGDGT的环化指标CBT(Cyclization of Branched Tetraethers)和甲基化指标MBT/MBT'(Methylation of Branched Tetraethers)则分别用于指示土壤的pH和年平均大气温度变化(Weijers等, 2007a; Peterse等, 2012), 广泛应用于陆地环境, 以及受陆源输入影响显著的边缘海(例如, Weijers等, 2007b, 2007c; Schouten等, 2008; Rueda等, 2009; Peterse等, 2009a; Bendle等, 2010; Keating-Bitonti等, 2011; Strong等, 2012; Ge等, 2014). 每种指标都有其优势, 但也存在不足, 综合利用多种指标, 从不同角度解析研究对象和对应的科学问题, 是当下的发展趋势. 例如, Zhu等(2011)通过研究长江口至东海的表层沉积物, 发现TEX₈₆可以很好地反映年平均SST, 而brGDGT及其环境指标BIT和MBT'/CBT则因为显著的降解作用及水体自生brGDGT的影响, 未能准确指示长江流域的环境变化. Nakanishi等(2012)通过研究东海不同水层悬浮颗粒物的GDGTs, 发现在水深74~99 m的悬浮颗粒物中, TEX₈₆^H-SST跟实测的水体温度相一致(~15℃), 而在表层水(0~20 m)的悬浮颗粒物中, TEX₈₆^L-SST更接近于实测的水体温度(~20℃). 最近, Ge等(2014)对南黄海的柱状岩芯进行GDGTs分析, 重建了过去8.8千年的沉积记录, 结果显示BIT指标未能真实地反映南黄海陆源输入情况, 而基于iso-GDGT的TEX₈₆海水温度和基于brGDGT的MBT'/CBT大气温度记录则显示了明显的反相特征, 与东亚冬季风密切相关. 除了全球性的经验校正公式, Lü等(2014)通过分析东海和黄海表层沉积物中的GDGTs分布与不同环境参数的相关性, 发现夏季温度对这一生物群落的影响最大, 由此提出区域性的经验校正公式. Zhou等(2014)也对中国近岸和开放大洋表层沉积物的GDGTs分布特征及其指标应用进行了研究, 结果表明黄海的brGDGTs主要来源于长江下游的土壤环境, 而东海近岸的brGDGTs则主要来自海相自生环境. 上述研究结果的不一致性对全面检验GDGTs相关环境指标在中国东部陆架海古环境重建上的适用性提出了迫切需求.

本次工作利用GDGTs相关指标重建末次冰消期

以来(14 cal ka BP)海平面频繁变化背景下长江口的沉积演化和区域性气候变化, 主要目的: 第一, 从时空角度重建末次冰消期以来长江水下三角洲的沉积历史; 第二, 评估GDGTs相关环境指标在中国边缘海的适用性(TEX₈₆, BIT和MBT'/CBT).

2 区域概况

东海横跨21°54'~33°17'N, 117°05'~131°03'E之间, 是西太平洋唯一以陆架区(长约640 km, 水深72 m)为主的边缘海, 北接黄海, 东南临西太平洋. 中国第一大河长江为东海提供了可观的泥沙和水流量输入(年均 $8.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$)(Milliman和Meade, 1983; Liu等, 2010), 70%的年平均水流量和87%的年平均沉积物输入量均发生于夏季风盛行时. 位于亚热带的长江流域受典型的东亚季风影响, 年平均大气温度约4~18℃, 从西向东依次变暖, 夏季温暖湿润, 冬季寒冷潮湿(Yao等, 2007), 流域土壤因农业活动一般呈弱酸性(pH<6.5)(Larssen和Carmichael, 2000).

长江三角洲是典型的潮控型三角洲, 形成于全新世最大海泛面之后(8.5~8 cal ka BP)(Hori等, 2002; Hori和Saito, 2007), 总体面积约40000 km², 趋势西高东低, 原始坡降约万分之一. 考虑到物质的来源和组成, 通常将长江三角洲划分为陆上三角洲平原和下水三角洲平原, 其中陆上三角洲平原又分为上三角洲平原和下三角洲平原. 长江水下三角洲平原位于低潮线至水深55 m一带. 按其形态特征, 水下三角洲平原由-15 m的平台和水深15~20 m或30 m的前缘斜坡带、水深20 m或30~55 m的前三角洲带三部分组成(Chen等, 2000; Hori等, 2002). 全新世期间, 长江累计输入了 $1.2 \times 10^{12} \text{ t}$ 沉积物到该三角洲体, 为研究高分辨率气候变化提供了绝佳材料(Chen等, 2003, 2005; Yi等, 2003, 2006; Xiao等, 2006; Liu等, 2007; Wang和Yang, 2013).

受大洋环流和太平洋潮流的共同影响, 东海海流系统复杂(图1), 对陆架沉积物的输送、沉积及现代地貌的改造起着重要作用. 其中, 黑潮是西北太平洋一支强而稳定的边界流, 具有流速强、流量大和高温高盐等特点, 黑潮水的分支随季节的变化从台湾岛

南部和北部进入东海陆架. 台湾暖流出现在长江口以南、台湾海峡以北, 是浙闽近海的一支比较稳定的海流, 东北流向, 也具有高温、高盐特征, 对长江冲淡水向东北扩展起到一定的顶托作用, 与西侧的东海沿岸流之间温、盐梯度差十分明显, 构成的极陡锋面阻挡了沿岸流所携带的泥沙向外海扩散. 东海沿岸流主要由长江、钱塘江、甌江和闽江等河流的入海径流与附近海水混合而成, 其特点是盐度低, 水温随季节变化大, 水色混浊, 如前所述与黑潮形成明显边界. 东海沿岸流的路径具有季节性变化, 夏季, 东南季风盛行, 沿岸流向北流动与长江、钱塘江淡水汇合; 冬季, 偏北季风盛行, 长江冲淡水作为沿岸流的一部分向南运移, 影响可达台湾海峡南部, 东海沿岸流对浙闽泥质区的形成具有重要的作用(参考Liu等, 2010).

已有的研究表明, 从长江河口三角洲到东海, 经历了复杂的沉积过程和环境演变, 一些全球性的快速气候变化事件在该区域也得到反映, 并与东亚季风密切相关. 例如, Liu等(2007)利用地震剖面 and 柱状岩芯重建了东海水下三角洲泥质堆积体的形成历史, 并将地震层序上的主要海进反射面与最先发现于Barbados珊瑚, 之后在西太平洋也证实的北半球短期冰融水事件MWP-1A(ca. 14.2~13.8 cal ka BP)和MWP-1B(ca. 11.5~11.1 cal ka BP)相联系(参考Fairbanks, 1989; Bard等, 1996; Hanebuth等, 2000; Liu和Milliman, 2004; Liu等, 2004).

3 材料与方法

本次工作的沉积物柱状样于2009年5月采自东海(参考陈玲玲, 2014), 所有样品的处理和测试工作均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成.

3.1 研究材料

沉积柱YD0903(30°53'54.285"N, 122°54'33.004"E)位于长江口水下三角洲的泥质沉积区(图1), 站点水深36 m, 钻孔进尺约60 m, 其中0~44 m为连续取芯. 沉积柱在进行实验分析前一直保存于4℃的岩芯库, 本次工作分析了68个沉积物样品, 取自该沉积柱上部的40 m(以~50 cm的间隔取样).

图 1 中国东海地形图及海流分布

蓝色星标即研究站位 YD0903, 陆地及不同水深的海洋区域分别用不同的颜色标注. 缩写说明: YSWC, 黄海暖流; YSCC, 黄海沿岸流; CDW, 长江冲淡水; KC, 黑潮; TWC, 台湾暖流; SSCC, 南山东半岛沿岸流; NJCC, 北江苏沿岸流; ECSCC, 东海沿岸流. 改自 Liu 等(2010)

3.2 年龄框架

准确的地层年代框架是古气候研究的前提条件, 该钻孔的年龄数据来自陈玲玲(2014), 具体测年方法为: 选取贝壳与沉积物作为测年材料, 利用 Accelerator Mass Spectrometry(AMS) ^{14}C 方法进行测年, 再比较不同材料所得结果, 排除过老与过年轻的, 以及出现明显倒转的测年点, 然后从所得结果中尽量选取贝壳材料, 确定最终用于建立年龄框架的控制点. 本次工作利用 CALIB6.1 软件中 Marine09 校正公式对前 40 m 的 6 个年龄控制点进行日历年龄校正 (cal BP), 每个控制点年龄选取置信区间范围最大的区间中值作为该控制点的年龄代表 (Stuiver 和 Reimer, 1993; Reimer 等, 2009)(表 1), 最后通过内插法获取其他深度的年龄数据, 建立了跨度约 1.4 万年的年龄框架.

3.3 脂类提取

将冷冻干燥后的沉积物样品研磨均匀, 称取一定量 (~10 g) 于 TLF 离心管中, 加入 30 μL 内标 (C_{46} GDGT, 974 ng; Huguet 等, 2006a), 利用超声法进行萃取, 包括 5 遍甲醇: 二氯甲烷 (v/v, 1/3) 和 1 遍甲醇. 具体的萃取步骤是: 加入萃取液, 拧紧瓶盖, 充分摇匀 (确保所有样品浸泡于萃取液), 经水相超声仪超声 (15 min)、离心分离 (3000 r/min, 3 min) 后, 再将收集到的上清液保存在 40 mL 玻璃瓶中, 重复操作 5~6 次, 保证有机质提取尽量完全 (确保最后两遍提取时萃取液颜色透明). 将总抽提液在氮吹仪下吹干 (水域加热低于 40 $^{\circ}\text{C}$), 然后溶于 3 mL 正己烷: 异丙醇 (v/v, 99/1), 并抽提其中的 1 mL 用 0.45 μm PFTE 滤膜过滤, 之后用正己烷: 异丙醇 (v/v, 99/1) 反复冲洗滤膜 (少量多次), 保证样品尽可能的冲淋到收集瓶, 并再次在氮

表 1 本次工作选取的东海 YD0903 孔年龄控制点^{a)}

深度(cm)	¹⁴ C年龄 (cal a BP)	$\Delta^{14}\text{C}$ 年龄	Marine 09 (Reimer等, 2009)		材料	年龄控制点 (a BP)
			1 σ	2 σ		
248	235	30	196 (292~96)	/	贝壳	196
714	2500	37	2164~2339(1.0)	2081~2467(1.0)	贝壳	2274
959	3200	35	3039~3244(1.0)	2942~3326(1.0)	贝壳	3134
1855	6020	40	6460~6632(1.0)	6382~6722(1.0)	贝壳	6552
2252	7400	40	7869~8024(1.0)	7810~8133(1.0)	贝壳	7972
3493	11350	60	12822~13081(1.0)	12689~13116(1.0)	贝壳	12903

a) 陈玲玲, 2014

吹仪下吹干. 吹干后的总提取物再次溶于300 μL 的正己烷:异丙醇(v/v, 99/1), 超声1 min后, 抽取其中的5 μL 准备上机.

3.4 仪器分析和指标计算

上述待测总脂利用配备了大气压化学电离源APCI离子源的液相色谱-串联三重四级杆质谱(Agilent 6460 Triple Quad HPLC-MS)进行分析, 方法改自Hopmans等(2004)和Schouten等(2007). 具体定量分析方法为: 使用Prevail Cyano色谱柱(2.1 $\times$ 150 mm, 3 μm ; Alltech, Deerfield, Illinois, USA), 柱温维持在40 $^{\circ}\text{C}$, 并设置进样量为5 μL . 色谱分析的初始5 min, 流动相为正己烷/异丙醇(v/v, 99/1), 在随后的5~45 min内, 异丙醇以0.2 mL/min的流速线性增加至1.8%. 之后正己烷/异丙醇(v/v, 99/1)以0.2 mL/min的流速冲洗色谱柱10 min, 再以正己烷/异丙醇(v/v, 99/1)平衡10 min. 应用APCI源进行化合物离子化, 质谱检测模式为选择性离子扫描(SIM), 控制条件如下: 雾化压力60 psi, 雾化温度400 $^{\circ}\text{C}$; 氮气流速6 L/min, 温度200 $^{\circ}\text{C}$; 毛细管电压-3.5 kV; 电流5 μA (~3.2 kV). 目标GDGTs化合物荷质比(m/z)分别为1302, 1300, 1298, 1296, 1292, 1050, 1048, 1046, 1036, 1034, 1032, 1022, 1020, 1018(其中1048和1046在大部分样品中都低于检测标准, 所以最后统一放弃计算这两类化合物), 而标样C₄₆ GDGT的荷质比为744(网络版附录1(<http://earth.scichina.com>)). 通过各化合物离子峰(M+H)的面积与加入内标的面积的比值来对GDGTs各组分进行定量分析, 分别得到iso-GDGTs和brGDGTs的丰度.

本次工作用到的环境指标包括:

(1) TEX₈₆(Schouten 等, 2002) 及 TEX₈₆-SST (TEX₈₆^H 是TEX₈₆的对数形式, Kim等, 2010):

$$\text{TEX}_{86} = (\text{GDGT-2} + \text{GDGT-3} + \text{Cren}') / (\text{GDGT-1} + \text{GDGT-2} + \text{GDGT-3} + \text{Cren}'), \quad (1)$$

$$\text{SST} = 68.4 * \text{TEX}_{86}^H + 38.6. \quad (2)$$

(2) BIT(Hopmans等, 2004):

$$\text{BIT} = (\text{I} + \text{II} + \text{III}) / (\text{I} + \text{II} + \text{III} + \text{Cren}). \quad (3)$$

(3) MBT', CBT 及 MBT'/CBT-MAT(Weijers 等, 2007a; Peterse等, 2012):

$$\text{MBT}' = (\text{I} + \text{Ib} + \text{Ic}) / (\text{I} + \text{Ib} + \text{Ic} + \text{II} + \text{IIb} + \text{IIc} + \text{III}), \quad (4)$$

$$\text{CBT} = -\text{LOG}[(\text{Ib} + \text{IIb}) / (\text{I} + \text{II})], \quad (5)$$

$$\text{MAT} = 0.81 - 5.67 * \text{CBT} + 31.0 * \text{MBT}', \quad (6)$$

$$\text{pH} = 7.9 - 1.97 * \text{CBT}. \quad (7)$$

东海研究区域的年平均及季节性SST来源于Schlitzer R, Ocean Data View提供的World Ocean Atlas 2009(<http://odv.awi.de>, 2010), 其中年平均SST约18 $^{\circ}\text{C}$, 冬季SST约10 $^{\circ}\text{C}$, 春季SST约16 $^{\circ}\text{C}$, 夏季SST约27 $^{\circ}\text{C}$, 秋季SST约20 $^{\circ}\text{C}$.

4 结果

根据测得的GDGTs丰度和分布特征, 及其相关指标的变化趋势, 我们将该研究站位过去1.4万年以来的沉积记录分成了两个阶段(图2和图3), 阶段I (13.8~8 cal ka BP)为陆相环境, 以低浓度的iso-GDGTs(平均值约36 ng/g dsw)、高浓度的brGDGTs(平均值约143 ng/g dsw)、iso-GDGTs/brGDGTs低值(R_{Ib} , 平均值(0.23 $\pm$ 0.07), $n=19$)、GDGT-0/crenarchaeol($R_{0/5}$)波动高值(0.5~3.8)及BIT高值((0.88 $\pm$ 0.07); $n=19$)为特征. 而阶段II (7.9 cal ka BP至今)则与前一阶段的各项参数截然不同, 例如BIT低值((0.27 $\pm$ 0.06), $n=49$), $R_{0/5}$ 低值((0.35 $\pm$ 0.03), $n=49$), iso-GDGT浓度(平均值约212 ng/g dsw)显著高于brGDGT(平均值约79 ng/g dsw)并导致 R_{Ib} 高值(平均值(3 $\pm$ 0.98), $n=49$). 由TEX₈₆^H衍生的SST在阶段I不能真实地反映表层海水温度信息, 不过该指标在阶段II ((21.6 $\pm$ 0.9) $^{\circ}\text{C}$, $n=49$)被认为反应了年平均SST. 基于MBT'/CBT的

图2 东海 YD0903 孔的 GDGTs 丰度特征及相关性分析

(a) GDGT-0, crenarchaeol, iso-GDGTs 及 brGDGTs 随年龄的丰度变化记录, 据此划分为两个阶段, 阶段 I (13.8~8 cal ka BP) 为陆相环境, 细分为 A~C 三部分, 阶段 II 为稳定的高海平面的现代海洋沉积环境, 可进一步细分为 D, E 两部分; (b) GDGT-0 和 crenarchaeol 的相关性分析; (c) iso-GDGTs 和 brGDGTs 的相关性分析, 其中 6 个测年数据来源于陈玲玲(2014)(灰带用以标注 GDGTs 浓度发生明显变化的时间点, 同时用来划分该沉积记录的五阶段 A~E)

MAT在整个记录中呈现出缓慢下降的趋势((14.3 ± 0.6) $^{\circ}\text{C}$, $n=68$), 而基于 CBT 的 pH 值在阶段 I ((7.3 ± 0.12), $n=19$) 比阶段 II ((7.1 ± 0.07), $n=49$) 略高。

阶段 I 可进一步细分成三部分: 阶段 A (13.8~11.8 cal ka BP) 位于 $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST 的第一个和第二个峰值之间, 阶段特征包括 $R_{0/5}$ 出现低谷、MBT'/CBT-MAT 出现峰值; 阶段 B (11.8~10.4 cal ka BP) 则位于 $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST 的第二个和第三个峰值之间, 对应着 BIT 的第一个低谷, $R_{0/5}$ 的第二次低谷以及 MBT'/CBT-MAT 的另一个峰值; 阶段 C (10.8~8.3 cal ka BP) 则对应着 BIT 的缓慢降低, $R_{0/5}$ 的平稳低值区间, 以及 $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST 的相对高值。阶段 II 也可以进一步划分为两部分: 阶段 D (7.9~3.1 cal ka BP) 对应着 iso-GDGTs 在整个记录中的高值区间, 同时 MBT'/CBT-MAT 开始缓慢升高; 而阶段 E (3.1 cal ka BP 至今) 则出现了全部 GDGTs 浓度下降的情况, BIT 值反而有所升

高, 此外, MBT'/CBT-MAT 停止升高, 在一定基线上呈现出反复波动。

5 讨论

上述 A~E 五个阶段的划分与陈玲玲(2014)在同一站位利用岩相学和粒度分析所划分的沉积相基本吻合。在岩相划分的基础上, 本文就每个沉积相内的水动力条件, 气候变化以及沉积物从陆到海的搬运过程和沉积特点给予详细讨论。

5.1 阶段 I (A~C, 39.7~22.5 m, ca. 13.8~8 cal ka BP): 河流相到河口湾沉积

从图2可以看出, iso-GDGT 与 brGDGT 的相关性分析出现明显分区, 正好对应着我们划分的阶段 I 和 II。在阶段 I, BIT 高值和高浓度 brGDGTs (图3) 都指示了陆相环境的显著特征, 跟这两个参数在土壤、

图3 YD 0903 孔的 GDGT 环境指标与平均粒度和东海海平面变化对比图

(a) BIT 记录, (b) $R_{0.5}$, (c) $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}\text{-SST}$, (d) MBT/CBT-MAT(本次工作结果), (e) 平均粒度(陈玲玲, 2014), (f) 晚第四纪以来的海平面变化(Liu 等, 2007; 杨怀仁和谢志仁, 1984)。灰色条带指示 YD 事件和 8.2 千年变冷事件, 以及短期冰融水事件 MWP-1A

泥炭和河口等环境中的解释保持一致(Hopmans等, 2004; Weijers等, 2006b; Kim等, 2006, 2007; Schouten等, 2013), 而粒度分析在这个阶段显示较粗的平均粒径(图3), 也从侧面支持了解释. 该阶段还出现了短期海平面下降和海水入侵事件, 表现在各项参数的多次突变(图3), 包括剧烈波动的 $R_{0/5}$ (参照 Blaga等, 2009), 和低海平面背景下较粗的平均粒径. Zhu等(2011)通过研究长江下游到东海的整个陆源输入从陆向海的过程, 发现 $R_{0/5}$ 从长江(1.96 ± 0.37)进入河口区和海岸带(0.44 ± 0.07)会出现明显的下降, 表明 $R_{0/5}$ 低值更偏向于海相环境. 我们将阶段 I 中出现的两次明显的 $R_{0/5}$ 波动分别解释为新仙女木事件(YD, ca. 12.9~12.2 cal ka BP)和快速海水入侵事件(MWP-1B, ca. 11.5~11.1 cal ka BP) (Fairbanks, 1989; Bard等,

1996).

从模拟的不同海平面条件下站位所处位置的变化图来看(图4), A阶段时, 研究站位离海岸线还有一定距离, 所处环境可能是位于暴露的大陆架最内缘的长江水体冲刷出的河道(图4(a)), GDGTs相关指标(例如 $R_{0/5}$, MBT'和CBT)的变化特征也与之前的研究保持一致(Zhu等, 2011). B阶段时海平面从50 m上升到-35 m(参照Liu等, 2007), 研究站位离海岸线的距离也因此而缩短, 并阶段性的经历了淡水或半咸水的冲刷. 而C阶段, 各项指标再次回到A阶段的范畴(例如 $R_{0/5}$), 我们将其解释为该阶段经历了一次缓慢的海进过程, 两次突变(12.9~12.2和11.5~11.1 cal ka BP), 分别对应了 $R_{0/5}$ 的急剧上升/下降, 和MBT'/CBT-MAT的下降及上升, BIT在这两个时期呈现的变

图4 晚第四纪以来中国东部大陆架边缘海的海平面变化和 YD0903 站点位置图

(a) 低海平面时研究站点位于海岸线以上; (b) 快速海平面上升时河道环境转为河口相环境; (c) 高海平面时的稳定开阔海洋环境和连续性沉积; (d) 人类活动影响明显的浅海相. 改自 Liu 等(2007)

化幅度相对较小,如前所述,我们认为这两个突变间接呼应了YD事件和MWP-1B事件.在快速海平面上升过程中,之前暴露的大陆架被海水淹没,而之前的河道充填沉积也遭到一定程度的剥蚀,此时研究站位所处的环境很有可能转换为受潮汐影响的海岸带或河口湾相(图4(b)).而之前对河道沉积的剥蚀作用既为接下来的沉积作用提供空间,也提供物源,加快了沉积速率,形成了地震资料中发现的不整合面(Liu等, 2007).

阶段I到阶段II的转折处(8~7.9 cal ka BP),各项指标对应着明显的变化,例如, BIT从>7.8降到<0.4, iso-GDGTs浓度开始高于brGDGTs,尤其海相古菌标志物crenarchaeol在阶段II一直处于主导地位(图2).该转折可能是受著名的8.2千年变冷事件影响(Wang等, 2005), MBT'/CBT-MAT此时温度下降0.6°C,也是证据之一.

5.2 阶段II(D-E, 22.2~0 m, 7.9 cal ka BP至今): 浅海相到前三三角洲相

与前一个阶段相比,该阶段的岩性均一,各项指标变化不明显,例如 $R_{0/5}$ 保持低值,粒度在很小范围内波动,均暗示该阶段对应着有连续陆源输入的稳定沉积环境,大量的研究工作(粒度、稳定同位素、地震资料等)表明:在7.6 cal ka BP左右该区域海平面上升至当今水平,而中国东部海域也形成了现代稳定开阔的海洋环境(杨怀仁和谢志仁, 1984; 严钦尚和洪雪晴, 1987; Milliman等, 1989; Kim等, 1999; Liu和Milliman, 2004; Xiao等, 2006; Liu等, 2007a).

根据之前的描述,阶段D(22.2~9.5 m, ca. 8.3~3.4 cal ka BP)的各项参数(例如 $R_{0/5}$, BIT等)均指示了一个浅海环境,主要受7.6 cal ka BP形成的海岸带环流的影响(图4(c)). iso-GDGTs的浓度在这个阶段保持了整个记录中的最高值并经历了强烈波动(图2),可能是受阶段性增强的陆源输入的影响,跟该站位的元素分析结果相比,大多iso-GDGTs和brGDGTs的峰值(例如8.0, 7.4, 6.8, 5.7, 4.7, 3.8 cal ka BP)都对应着基于XRF扫描所得的Zr/Rb的峰值(陈玲玲, 2014).考虑到本次工作的分辨率不够高(采样间距约50 cm, 对应的年龄间距约200年),我们对iso-GDGTs和brGDGTs做了5点平滑处理,结果表明两者的变化趋势在阶段D基本保持一致,而相对应的, BIT在这个阶段出现的

低值应该主要是由iso-GDGTs的快速增加引起的,而不是brGDGTs.在图4(c)所示阶段,研究站位已经被海水覆盖,一直有来自长江的陆源输入,我们认为该阶段GDGTs的含量变化与陈玲玲(2014)提到的多次洪水事件相关,未来需要更高分辨率的工作来进一步验证.

阶段E(9.5~0 m, ca. 3.4 cal ka BP-至今)对应着处于低值区间但缓慢上升的BIT和brGDGTs,指示了越来越多的陆源影响.跟前一个阶段的浅海相相比,这个时候长江三角洲明显向海推进,缩短了研究站位的离岸距离(图4(d)).而近2千年以来长江河口沉积堆积量的增加则很可能源于人类活动、农业及植被退化造成的陆源剥蚀(Li等, 2000; Hori等, 2002; Xiao等, 2006; Liu等, 2007).

5.3 基于GDGT的 TEX_{86} 和MBT'/CBT的温度指标在东海的应用

因BIT高值, TEX_{86} -SST在阶段I中并不能真实地反映表层海水温度的变化,因此接下来关于SST温度的讨论不包括阶段I.在阶段II海相环境中, BIT值明显降低(0.27 ± 0.06 , $n=49$),符合Weijers等(2006a)建议的BIT阈值,即当BIT不超过0.4时, TEX_{86} 可以较真实地反映SST变化.结果显示,阶段II的 TEX_{86}^H -SST(21.6 ± 0.92 °C, $n=49$)(图3(c))接近于卫星在该区域测得的年平均SST.相较于南海(Wei等, 2011; Jia等, 2012; Ge等, 2013)和黄海(Ge等, 2014)的研究结果, TEX_{86} 在东海的应用不存在季节性偏向,可能是缘于初级生产力在寡营养的东海大陆架没有随季节发生明显变化,因此古菌生物群落及其产生的GDGTs也没有记录到季节性的信号(Gong等, 2003; Zhu等, 2011).

相对而言,基于brGDGTs的大气温度指标MBT'/CBT(14.3 ± 0.63 °C, $n=68$)(图3(d))则接近于长江中下游的平均大气温度(约12~18°C). Strong等(2012)发现珠江口沉积物中基于MBT'/CBT的温度记录(16.1~18.6°C)低于实测的平均大气温度(约19~23°C),他们因此认为该区域的brGDGTs可能来自珠江流域的上游地带,源于地形起伏较大带来的强烈的剥蚀作用.本次工作中, MBT'/CBT温度记录的变化也可能跟剥蚀作用相关,即频繁的洪水过程会带来陆相地形的剥蚀及陆源物质输入的增加.

通过上述两个温度记录的对比, 本文发现 $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST 在这一阶段呈现有规律的波动, 可以分为两个周期(7.9~5.8 和 5.8~3.1 cal ka BP), 而 MBT'/CBT-MAT 在这两个周期中则分别是明显的和缓慢的两次升温过程, 且在前面提到的 iso-GDGTs 峰值时出现 MBT'/CBT-MAT 低值. 对两个温度指标进行 5 点平滑会发现两者基本呈负相关, 跟本文作者在南黄海的工作结果一致(Ge 等, 2014). 本次工作可以用发生于 7.6~4.8 cal ka BP(Yi 等, 2003, 2006)或 7.2~4.8 cal ka BP(施雅风等, 1992; Tao 等, 2006)的中全新世暖期来解释上述 MBT'/CBT-MAT 所反映的整体温暖的陆地气候. 但是, 结合这个阶段的频发性洪水事件(陈玲玲, 2014), iso-GDGTs 峰值及对应的 MBT'/CBT-MAT 低值, 和据前人研究得知的 ca. 7.2~4.2 cal ka BP(Dykoski 等, 2005; Hu 等, 2012b)或 ca. 8.5~3.0 cal ka BP(施雅风等, 1992)强烈波动的东亚冬季风, 本文作者更倾向于将这些环境指标耦合变化的机制解释为: 当冬季风增强时, 黄海沿岸流在强度和流量上都增强, 造成其补偿流黄海暖流也对应的强势北上, 由此带来淡水和海水输入的双向增强, iso-GDGTs 和 brGDGTs 的含量也对应增加, 而代表大气温度的 MBT'/CBT 记录了冬季风影响下的偏冷的气候, TEX_{86} 则记录了源自台湾海峡甚至西太平洋的盐度和温度都偏高的海流信号, 造成上述的一系列环境参数的对应变化.

此外, 从本次记录阶段 E 的各项指标变化来看, MBT'/CBT-MAT 记录的冷期(2.4~0.9 cal ka BP)可能跟距今 4 千年以来的全球性变冷趋势相关(参考 Jian 等, 2000), 也有研究表明中国大陆在 2.8 cal ka BP 因冷而干燥的气候经历了环境恶化(施雅风等, 1992), 侧面证实了本文作者的猜测. 而在 1.7, 1.4, 和 0.9 cal ka BP 出现的 iso-GDGTs 高值和 BIT 低值跟陈玲玲(2014)在这个阶段识别的洪水事件也一一对应, 这表明, 在该论文的研究区域, 晚全新世频发的洪水事件可能是影响 GDGTs 丰度变化的主要原因之一.

5.4 对 GDGTs 指标的新认识

根据本次工作所发现的 GDGTs 指标与全球性的海平面变化和区域性的洪水事件的密切联系, 本文作者认为 GDGTs 相关指标在中国东海有更多应用的可能性:

(1) $R_{0/5}$. 该比值一般用于判断所检测到的 GDGTs 中是否有产甲烷古菌的贡献. Blaga 等(2009)通过对欧洲湖泊沉积物的研究指出当 $R_{0/5} > 2$ 时, 意味着有相当一部分 GDGT-0 来源于产甲烷古菌. 在海洋环境中, Turich 等(2007)发现深水区的 $R_{0/5}$ (≈ 1) 要高于中层水(≈ 0.5). 在本次工作所测得的 GDGT 浓度记录中(图 2(a)), 阶段 I 所含的 GDGT-0 和 crenarchaeol 均比较低, 而 $R_{0/5}$ 则在高值区间剧烈波动, 三分之一的样品中 $R_{0/5} > 2$. 因为缺乏有力的证据(例如生物方面的分析或者甲烷含量的测定等), 单纯凭 $R_{0/5}$ 值难以说明东海泥质区的 GDGT-0 主要来源于产甲烷古菌, 未来还需要进一步的工作去检验. 从另一方面来说, 该比值的变化趋势跟快速气候变化事件(例如 YD 和 MWP-1B)保持了高度一致性, 因此作者认为可以用 $R_{0/5}$ 来指示边缘海由海平面变化引起的海进海退现象, 下一步工作是验证该指标在其他边缘海是否具有普适性.

(2) R_{lib} . 如前所述, iso-GDGTs 和 brGDGTs 的相对丰度在本次记录中出现明显分区, 对应于阶段 I 的陆相环境和阶段 II 的海相沉积(图 2(c)). Xie 等(2012)通过对盐碱地的研究发现该比值在 $\text{pH} < 7.5$ 的土壤中基本不变, 而在碱性土壤中, 随 pH 值的升高会显著增加, 他们因此提出 R_{lib} 可以作为追踪盐碱度增加的指标. 在本次研究中, 基于 brGDGT 得到的 pH (7.8 ± 0.1 , $n=68$) 明显高于实测的长江流域的土壤 pH (< 6.5) (Larssen 和 Carmichael, 2000), 暗示全球性的 pH 经验公式并不适用于该海域, 有必要建立区域性的经验公式. 而相较于 R_{lib} 在盐碱地中的应用, 本文建议当边缘海的陆源物质来自 $\text{pH} < 7.5$ 的河流流域时, R_{lib} 可结合 BIT 值变化来识别沉积相环境, 即当 $R_{\text{lib}} < 0.5$ 且 $\text{BIT} > 0.4$ 时代表的是陆相环境, 反之, 当 $R_{\text{lib}} > 1$ 且 $\text{BIT} < 0.4$ 时则很可能代表水体环境, 也有待更多类似海域环境的研究和验证.

6 结论

通过分析长江口水下三角洲泥质沉积区柱状沉积物中的脂类标记物, 本论文得到以下结论:

(1) 基于 GDGTs 的分布及其衍生的环境指标的变化特征, 将长江口过去 1.4 万年的沉积记录划分为两个沉积阶段 I 和 II, 分别代表陆相和海相沉积环

境. GDGTs及其相关指标高度敏感于环境变化, 在古环境重建中具有充分的发展前景.

(2) TEX₈₆-SST在阶段 II 可用于反映年平均表层海水温度, MBT'/CBT-MAT则代表了长江流域中下游的平均大气温度, 并对全新世的洪水事件有明显的响应. BIT在研究区域很好地分辨出了不同的沉积环境, 在东海可用于指示陆源影响的强弱, 与 R_{lib} 结合可用于识别陆相沉积环境和水体环境, 而 $R_{0/5}$ 则可用于指示边缘海中由海平面变化引起的海进海退现象.

参考文献

- 陈玲玲. 2014. 末次冰消期以来长江水下三角洲古环境演变与高分辨率古洪水记录. 硕士学位论文. 上海: 同济大学
- 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 1992. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. 中国科学B辑, 22: 1300–1308
- 严钦尚, 洪雪晴. 1987. 长江三角洲南部平原全新世海侵问题. 海洋学报, 9: 744–752
- 杨怀仁, 谢志仁. 1984. 中国东部近20000年来的气候波动与海平面升降. 海洋与湖沼, 15: 1–13
- Bard E, Hamelin B, Arnold M, Montaggioni L, Cabioch G, Faure G, Rougerie F. 1996. Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature*, 382: 241–244
- Bendle J, Weijers J H W, Maslin M, Sinninghe Damsté J S, Schouten S, Hopmans E C, Boot C, Pancost R D. 2010. Major changes in Last Glacial and Holocene terrestrial temperatures and sources of organic carbon recorded in the Amazon fan by the MBT'/CBT continental paleothermometer. *Geochem Geophys Geosyst*, 11: Q12007, doi: 10.1029/2010GC003308
- Biton E, Gildor H, Trommer G, Siccha M, Kucera M, van der Meer M T J, Schouten S. 2010. Sensitivity of Red Sea circulation to monsoonal variability during the Holocene: An integrated data and modelling study. *Paleoceanography*, 25: PA4209, doi: 10.1029/2009PA001876
- Blaga C I, Reichert G J, Heiri O, Sinninghe Damsté J S. 2009. Tetraether membrane lipid distributions in lake particulate matter and sediments: A study of 47 European lakes along a North-South transect. *J Paleolimnol*, 41: 523–540
- Brochier-Armanet C, Boussau B, Gribaldo S, Forterre P. 2008. Mesophilic Crenarchaeota: Proposal for a third archaeal phylum, the Thaumarchaeota. *Nat Rev Microbiol*, 6: 245–252
- Chen Z Y, Stanley D J. 1993. Yangtze delta, eastern China: 2. Late Quaternary subsidence and deformation. *Mar Geol*, 112: 13–21
- Chen Z Y, Song B P, Wang Z H, Cai Y L. 2000. Late Quaternary evolution of the subaqueous Yangtze Delta, China: Sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation. *Mar Geol*, 162: 423–441
- Chen Z Y, Saito Y, Hori K, Zhao Y W, Kitamura A. 2003. Early Holocene mud ridge formation in the Yangtze offshore, China: A tidal-controlled estuarine pattern and sea-level implications. *Mar Geol*, 198: 245–257
- Chen Z Y, Wang Z H, Schneiderman J, Tao J, Cai Y L. 2005. Holocene climate fluctuations in the Yangtze delta of eastern China and the neolithic response. *Holocene*, 15: 915–924
- Dou Y G, Yang S Y, Liu Z X, Clift P D, Yue H, Berne S, Shi X F. 2010. Clay mineral evolution in the central Okinawa Trough since 28 ka: Implications for sediment provenance and paleoenvironmental change. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeconol*, 288: 108–117
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, Yuan D X, Cai Y J, Zhang M L, Lin Y S, Qing J M, An Z S, Revenaugh J. 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 71–86
- Fairbanks R G. 1989. A 17000 year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the younger dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342: 637–642
- Ge H M, Zhang C L, Dang H Y, Zhu C, Jia G D. 2013. Distribution of tetraether lipids in surface sediments of the northern South China Sea: Implications for TEX₈₆ proxies. *Geosci Front*, 4: 223–229
- Ge H M, Zhang C L, Li J, Versteegh J M G, Hu B Q, Zhao J T, Dong L. 2014. Tetraether lipids from the southern Yellow Sea of China: Implications for the variability of East Asia Winter Monsoon in the Holocene. *Org Geochem*, 70: 10–19
- Gong G C, Wen Y H, Wang B W, Liu G J. 2003. Seasonal variation of chlorophyll a concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 50: 1219–1236
- Hanebuth T, Stattegger K, Grootes P M. 2000. Rapid flooding of the Sunda Shelf: A late-glacial sea-level record. *Science*, 288: 1033–1035
- Herfort L, Schouten S, Boon J P, Woltering M, Baas M, Weijers J W H, Sinninghe Damsté J S. 2006a. Characterization of transport and deposition of terrestrial organic matter in the southern North Sea using the BIT index. *Limnol Oceanogr*, 51: 2196–2205
- Hu B Q, Yang Z S, Zhao M X, Saito Y, Fan D J, Wang L B. 2012b. Grain size records reveal variability of the East Asian winter monsoon since the Middle Holocene in the Central Yellow Sea mud area, China. *Sci China Earth Sci*, 55: 1656–1668
- Hopmans E C, Weijers J W H, Schefuss E, Herfort L, Sinninghe Damsté J S, Schouten S. 2004. A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid

- tetraether lipids. *Earth Planet Sci Lett*, 24: 107–116
- Hori K, Saito Y, Zhao Q H, Wang P X. 2002. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China. *Sediment Geol*, 146: 249–264
- Hori K, Saito Y. 2007. An early Holocene sea-level jump and delta initiation. *Geophys Res Lett*, 34: doi: 10.1029/2007GL031029
- Huguet C, Cartes J E, Sinninghe Damsté J S, Schouten S. 2006a. Marine crenarchaeotal membrane lipids in decapods: Implications for the TEX₈₆ paleothermometer. *Geochem Geophys Geosyst*, 7: doi: 10.1029/2006GC001305
- Huguet C, Kim J H, Sinninghe Damsté J S, Schouten S. 2006b. Application of the TEX₈₆ temperature proxy in the reconstruction of glacial-interglacial sea surface temperature in the Arabian Sea. *Paleoceanography*, 21: PA3003, doi: 10.1029/2005PA001215
- Huguet C, Smittenberg R H, Boer W, Sinninghe Damsté J S, Schouten S. 2007. Twentieth century proxy records of temperature and soil organic matter input in the Drømmensfjord, southern Norway. *Org Geochem*, 38: 1838–1849
- Huguet C, de Lange G J, Middelburg J J, Sinninghe Damsté J S, Schouten S. 2008. Selective preservation of soil organic matter in oxidized marine sediments (Madeira Abyssal Plain). *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 6061–6068
- Huguet C, Martrat B, Grimalt J O, Sinninghe Damsté J S, Schouten S. 2011. Coherent millennial scale patterns in U^{K'}₃₇ and TEX^H₈₆ temperature records during the penultimate interglacial-to-glacial cycle in the western Mediterranean. *Paleoceanography*, 26: PA2218, doi: 10.1029/2010PA002048
- Jia G D, Zhang J, Chen J F, Peng P A, Zhang C L. 2012. Archaeal tetraether lipids record subsurface water temperature in the South China Sea. *Org Geochem*, 50: 68–77
- Jian Z M, Wang P X, Saito Y, Wang J L, Pfaumann U, Oba T, Cheng X R. 2000. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 184: 305–319
- Keating-Bitonti C R, Ivany L C, Affek H P, Douglas P, Samson S D. 2011. Warm, not super-hot, temperatures in the early Eocene subtropics. *Geology*, 39: 771–774
- Kim D S, Park B K, Shin I C. 1999. Paleoenvironmental changes of the Yellow Sea during the Late Quaternary. *Geo-Mar Lett*, 18: 189–194
- Kim J H, Schouten S, Buscail R, Ludwig W, Bonnin J, Sinninghe Damsté J S, Bourrin F. 2006. Origin and distribution of terrestrial organic matter in the NW Mediterranean (Gulf of Lions): Application of the newly developed BIT index. *Geochem Geophys Geosyst*, 7: doi: 10.1029/2006GC001306
- Kim J H, Ludwig W, Schouten S, Kerhervé P, Herfort L, Bonnin J, Sinninghe Damsté J S. 2007. Impact of flood events on the transport of terrestrial organic matter to the ocean: A study of the Têt River (SW France) using the BIT index. *Org Geochem*, 38: 1593–1606
- Kim J H, Schouten S, Hopmans E C, Donner B, Sinninghe Damsté J S. 2008. Global core-top calibration of the TEX₈₆ paleothermometer in the ocean. *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 1154–1173
- Kim J H, van der Meer J, Schouten S, Helmke P, Willmott V, Sangiorgi F, Koç N, Hopmans E C, Sinninghe Damsté J S. 2010. New indices and calibrations derived from the distribution of crenarchaeal isoprenoid tetraether lipids: implications for past sea surface temperature reconstructions. *Geochim Cosmochim Acta*, 74: 4639–4654
- Larssena T, Carmichael G R. 2000. Acid rain and acidification in China: The importance of base cation deposition. *Environ Pollut*, 110: 89–102
- Li C X, Chen Q Q, Zhang J Q, Yang S Y, Fan D D. 2000. Stratigraphy and paleoenvironmental changes in the Yangtze Delta during the Late Quaternary. *J Asian Earth Sci*, 18: 453–469
- Li C X, Wang P X, Sun H P, Zhang J Q, Fan D D, Deng B. 2002. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): Its stratigraphic framework and evolution. *Sediment Geol*, 152: 133–158
- Liu J, Saito Y, Kong X H, Wang H, Xiang L H, Wen C, Nakashima R. 2010. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last 13000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years. *Quat Sci Rev*, 29: 2424–2438
- Liu J P, Milliman J D. 2004. Reconsidering melt-water pulses 1A and 1B: Global impacts of rapid sea-level rise. *J Ocean Univ China*, 3: 183–190
- Liu J P, Milliman J D, Gao S, Cheng P. 2004. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea. *Mar Geol*, 209: 45–67
- Liu J P, Xu K H, Li A C, Milliman J D, Velozzi D M, Xiao S B, Yang Z S. 2007. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. *Geomorphology*, 85: 208–224
- Lü X X, Yang H, Song J M, Versteegh J M G, Li X G, Yuan H M, Li N, Yang C B, Yang Y, Ding W H, Xie S C. 2014. Sources and distribution of isoprenoid glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) in sediments from the east coastal sea of China: Application of GDGT-based paleothermometry to a shallow marginal sea. *Org Geochem*, 75: 24–35
- Milliman J D, Meade R H. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J Geol*, 91: 1–21
- Milliman J D, Qin Y S, Park Y. 1989. Sediment and sedimentary processes in the Yellow and East China Seas. In: Taira A, Masuda F, eds. *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company. 233–249
- Nakanishi T, Yamamoto M, Irino T, Tada R. 2012. Distribution of

- glycerol dialkyl glycerol tetraethers, alkenones and polyunsaturated fatty acids in suspended particulate organic matter in the East China Sea. *J Oceanogr*, 68: 959–970
- Pearson A, Ingalls A E. 2013. Assessing the Use of Archaeal Lipids as Marine Environmental Proxies. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 41: 1–26
- Peterse F, Kim J H, Schouten S, Klitgaard Kristensen D, Koç N, Sinninghe Damsté J S. 2009a. Constraints on the application of the MBT/CBT paleothermometer in high latitude environments (Svalbard, Norway). *Org Geochem*, 40: 692–699
- Peterse F, van der Meer J, Schouten S, Weijers J W H, Fierer N, Jackson R B, Kim J H, Sinninghe Damsté J S. 2012. Revised calibration of the MBT-CBT paleotemperature proxy based on branched tetraether membrane lipids in surface soils. *Geochim Cosmochim Acta*, 96: 215–229
- Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Blackwell P G, Bronk Ramsey C, Buck C E, Burr G S, Edwards R L, Friedrich M, Grootes P M, Guilderson T P, Hajdas I, Heaton T J, Hogg A G, Hughen K A, Kaiser K F, Kromer B, McCormac F G, Manning S W, Reimer R W, Richards D A, Southon J R, Talamo S, Turney C S M, van der Plicht J, Weyhenmeyer C E. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50000 Years cal. BP. *Radiocarbon*, 51: 1111–1150
- Rueda G, Rosell-Melé A, Escala M, Gyllencreutz R, Backman J. 2009. Comparison of instrumental and GDGT-based estimates of sea surface and air temperatures from the Skagerrak. *Org Geochem*, 40: 287–291
- Schouten S, Hopmans E C, Schefuß E, Sinninghe Damsté J S. 2002. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: A new tool for reconstructing ancient sea water temperatures? *Earth Planet Sci Lett*, 204: 265–274
- Schouten S, Huguet C, Hopmans E C, Sinninghe Damsté J S. 2007. Improved analytical methodology of the TEX₈₆ paleothermometry by high performance liquid chromatography/atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry. *Anal Chem*, 79: 2940–2944
- Schouten S, Eldrett J S, Greenwood D, Harding I, Baas M, Sinninghe Damsté J S. 2008. Onset of long term cooling of Greenland near the Eocene-Oligocene boundary as revealed by branched tetraether lipids. *Geology*, 36: 147–150
- Schouten S, Hopmans E C, Sinninghe Damsté J S. 2013. The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids: A review. *Org Geochem*, 54: 19–61
- Seki O, Sakamoto T, Sakai S, Schouten S, Hopmans E C, Sinninghe Damsté J S, Pancost R D. 2009. Large changes in seasonal sea ice distribution and productivity in the Sea of Okhotsk during the deglaciations. *Geochim Geophys Geosyst*, 10: Q10007, doi: 10.1029/2009GC002613
- Shintani T, Yamamoto M, Chen M T. 2011. Paleoenviromental changes in the northern South China Sea over the past 28,000 years: A study of TEX₈₆-derived sea surface temperatures and terrestrial biomarkers. *J Asian Earth Sci*, 40: 1221–1229
- Spang A, Hatzepichler R, Brochier-Armanet C, Rattei T, Tischler P, Spieck E, Streit W, Stahl D A, Wagner M, Schleper C. 2010. Distinct gene set in two different lineages of ammonia-oxidizing archaea supports the phylum Thaumarchaeota. *Trends Microbiol*, 554: 331–340
- Stanley D J, Warne A G. 1994. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise. *Science*, 265: 228–231
- Stanley D J, Chen Z. 1996. Neolithic settlement distributions as a function of sea level-controlled topography in the Yangtze delta, China. *Geology*, 24: 1083–1086
- Strong D J, Flecker R, Valdes P J, Wilkinson I P, Rees J G, Zong Y Q, Lloyd J M, Garrett E, Pancost R D. 2012. Organic matter distribution in the modern sediments of the Pearl River Estuary. *Org Geochem*, 49: 68–82
- Stuiver M, Reimer P J. 1993. Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C age calibration program. *Radiocarbon*, 35: 215–230
- Tao J, Chen M T, Xu S Y. 2006. A Holocene environmental record from the southern Yangtze River delta, eastern China. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeconol*, 230: 204–229
- Turich C, Freeman K H, Bruns M A, Conte M, Jones A D, Wakeham S G. 2007. Lipids of marine Archaea: patterns and provenance in the water-column and sediments. *Geochim Cosmochim Acta*, 71: 3272–3291
- Walsh E M, Ingalls A E, Keil R G. 2008. Sources and transport of terrestrial organic matter in Vancouver Island fjords and the Vancouver-Washington Margin: A multiproxy approach using ¹³Corg, lignin phenols, and the ether lipid BIT index. *Limnol Oceanogr*, 53: 1054–1063
- Wang Q, Yang S Y. 2013. Clay mineralogy indicates the Holocene monsoon climate in the Changjiang (Yangtze River) Catchment, China. *Appl Clay Sci*, 74: 28–36
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, He Y Q, Kong X G, An Z S, Wu J Y, Kelly M J, Dykoski C A, Li X D. 2005. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308: 854–857
- Wei Y L, Wang J X, Liu J, Dong L, Li L, Wang H, Wang P X, Zhao M X, Zhang C L. 2011. Spatial variations in Archaeal lipids of surface water and core-top sediments in the South China Sea: Implications for paleoclimate studies. *Appl Environ Microbiol*, 77: 7479–7489
- Weijers J W H, Schouten S, Spaargaren O C, Sinninghe Damsté J S. 2006a. Occurrence and distribution of tetraether membrane lipids in soils: Implications for the use of the TEX₈₆ proxy and the BIT index. *Org Geochem*, 37: 1680–1693
- Weijers J W H, Schouten S, Geenevasen J A J, David O R P,

- Coleman J, Pancost R D, Sinninghe Damsté J S. 2006b. Membrane lipids of mesophilic anaerobic bacteria thriving in peats have typical archaeal traits. *Environ Microbiol*, 8: 648–657
- Weijers J W H, Schouten S, van Den Donker J C, Hopmans E C, Sinninghe Damsté J S. 2007a. Environmental controls on bacterial tetraether membrane lipid distribution in soils. *Geochim Cosmochim Acta*, 71: 703–713
- Weijers J W H, Schefuss E, Schouten S, Sinninghe Damsté J S. 2007b. Coupled thermal and hydrological evolution of tropical Africa over the last deglaciation. *Science*, 315: 1701–1704
- Weijers J W H, Schouten S, Sluijs A, Brinkhuis H, Sinninghe Damsté J S. 2007c. Warm Arctic continents during the Palaeocene–Eocene thermal maximum. *Earth Planet Sci Lett*, 261: 230–238
- Xiao S B, Li A C, Liu J P, Chen M H, Xie Q, Jiang F Q, Li T G, Xiang R, Chen Z. 2006. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 237: 293–304
- Xie S C, Pancost R D, Chen L, Evershed R P, Yang H, Zhang K X, Huang J H, Xu Y D. 2012. Microbial lipid records of highly alkaline deposits and enhanced aridity associated with significant uplift of Tibetan Plateau in late Miocene. *Geology*, 40: 291–294
- Xu X D, Oda M. 1999. Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36000 years. *Mar Geol*, 156: 285–304
- Yao T D, Pu J C, Lu A X, Wang Y Q, Yu W S. 2007. Recent Glacial Retreat and Its Impact on Hydrological Processes on the Tibetan Plateau, China, and Surrounding Regions. *Arct Antarct Alp Res*, 39: 642–650
- Yi S, Saito Y, Zhao Q H, Wang P X. 2003. Vegetation and climate changes in the Changjiang (Yangtze River) Delta, China, during the past 13000 years inferred from pollen records. *Quat Sci Rev*, 22: 1501–1519
- Yi S, Saito Y, Yang D Y. 2006. Palynological evidence for Holocene environmental change in the Changjiang (Yangtze River) Delta, China. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 241: 103–117
- Zhang C L, Wang J X, Wei Y, Zhu C, Huang L Q, Dong H L. 2012. Production of branched tetraether lipids in the Lower Pearl River and Estuary: effects of extraction methods and impact on bGDGT proxies. *Front Microbiol*, 2: 274
- Zhou H D, Hu J F, Spiro B, Peng P A, Tang J H. 2014. Glycerol dialkyl glycerol tetraethers in surficial coastal and open marine sediments around China: Indicators of sea surface temperature and effects of their sources. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 395: 114–121
- Zhu C, Weijers J W H, Wagner T, Pan J M, Chen J F, Pancost R D. 2011. Sources and distributions of tetraether lipids in surface sediments across a large riverdominated continental margin. *Org Geochem*, 42: 376–386

论文

附录 1 常见古菌和细菌 GDGTs 的分子结构式和荷质比