

网络优先数字出版时间: 2015-08-19

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20150819.0946.006.html>

# 中国东部海区 bGDGTs 的含量分布及其与环境因子的关系\*

## Distribution and Correlation with Environment Parameters of Branched Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers in Surface Sediments from the East Coastal Sea of China

吕晓霞<sup>1</sup>, 陈加丽<sup>1</sup>, 杨 阳<sup>1</sup>, 宋金明<sup>2</sup>, 李学刚<sup>2</sup>, 袁华茂<sup>2</sup>, 李 宁<sup>2</sup>

LV Xiao-xia<sup>1</sup>, CHEN Jia-li<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, SONG Jin-ming<sup>2</sup>, LI Xue-gang<sup>2</sup>, YUAN Hua-mao<sup>2</sup>, LI Ning<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071)

(1. School of Resources Science, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei, 430074, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China)

**摘要:**【目的】近海是接受陆源输入的主要地带, 沉积物中的有机质有可能记录了流域环境与气候变化的信息。本文以中国东部海区表层沉积物中陆源细菌来源的支链类甘油二烷基甘油四醚脂 (branched Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers, bGDGTs) 为研究对象, 分析其作为流域环境与气候变化指标的可行性。【方法】使用高效液相色谱-质谱联用仪 (HPLC-MS) 分析海域表层沉积物中 bGDGTs 的含量和分布, 并进一步统计分析其与环境因子的关系。【结果】中国东部海区沉积物中 bGDGTs 的绝对含量呈现出区块状分布, 在东海基本上随离岸距离的增加而降低, 而在南黄海最高值出现在南黄海中心泥质区。支链和类异戊二烯指数 (BIT) 值除在长江口外上升流区外, 基本呈现出随离岸距离的增加而降低的趋势。【结论】bGDGTs 主要来源于陆源输入; 有机质主要富存于细颗粒沉积物, 且有海洋自生 bGDGTs 的贡献; 相对于陆源输入, 海洋自生 bGDGTs 以环状为主; 除特殊环境, BIT 仍可以作为衡量陆源输入相对多寡的指标; 东部海区沉积物中的甲基化指数/环化指数 (MBT/CBT) 不能作为构建流域古气候变化的指标。

**关键词:** bGDGTs 分布 环境指示 中国东部海区

**中图分类号:** P532, Q913 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2015)03-0167-06

**Abstract:** 【Objective】Most of the sediments in coastal region are terrigenous. The organic matter in coastal sediment can record the climate and environment change of the area. In this article, we analyzed and discussed the distribution and correlation with environment parameters of branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers (bGDGTs) in surface sediment from the east coastal sea of China. 【Methods】The distribution of bGDGTs in the surface sediment was analyzed using a high performance liquid chromatography-mass spectrometry (HPLC-MS). Based on

收稿日期: 2015-06-07

修回日期: 2015-07-25

作者简介: 吕晓霞 (1972-), 女, 副教授, 主要从事海洋有机地球化学和海洋生物地球化学研究。

\* 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA11020102), 国家自然科学基金项目 (41376090), 教育部博士点基金项目 (20120145120017) 和海洋地质保障工程项目 (GZH201200503) 联合资助。

this, the correlation between the distribution of bGDGTs and the environment factor was analyzed. **【Results】** We obtained that the concentration of bGDGTs in the east coastal sea of China (ECSC) shows different distribuyional style in different region. The bGDGTs concentration decreases with the increasing distance from coast in East China Sea (ECS), while it increases in the central muddy region of South Yellow Sea (SYS). The BIT value decreases with the increasing distance from shore except in the upwelling region off the Yangtze River Estuary. **【Conclusion】** The bGDGTs mainly come from terrigenous soil. There is also some bGDGTs contribution from ocean. The organic matter mainly is enriched in the muddy sediment. The BIT can be used as an index to trace the relative abundance of terrigenous sources. The indexes of MBT and CBT cannot be applied as a paleotemperature in this region.

**Key words:** bGDGTs, distribution, environmental implication, the east coastal sea of China

## 0 引言

**【研究意义】**近海海域作为连接大陆和海洋的枢纽,是受海陆相互作用强烈的关键地带。陆源输入有机物质作为气候和环境变化的重要载体,常常通过河流经河口输入近海海域并沉积,因此研究近海海域沉积物中陆源输入有机质的特征和分布,对于研究流域的气候环境变化具有重要意义。**【前人研究进展】**近年来,地质环境中来源于微生物细胞膜的甘油二烷基甘油四醚脂(Glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids, GDGTs)成为有机地球化学和生物地球化学领域的研究热点之一。GDGTs主要包括细菌来源的支链类(bGDGTs)和古菌来源的类异戊二烯链类(iGDGTs),其结构见图1。通常情况下,bGDGTs常常被认为来源于陆源环境<sup>[1~3]</sup>,而iGDGTs则被认为主要来源于海洋或湖泊等水生环境<sup>[1,4]</sup>。基于iGDGTs和bGDGTs构建的TetraEther index of 86 carbon atoms(TEX<sub>86</sub>)、甲基化指数/环化指数(MBT/CBT)等指标在地质体中得到广泛的应用,很好地指示了地质历史时期环境与气候的变化<sup>[5~8]</sup>。**【本研究切入点】**以中国东部海区表层沉积物为研究载体,以陆源细菌来源的bGDGTs为研究对象,分析其组成和分布特征,及其作为流域环境与气候变化指标的可行性。**【拟解决的关键问题】**探讨影响近海沉积物中bGDGTs分布的主控因素,为bGDGTs在流域环境与气候变化中的应用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

从东部海区(28~37°N, 119~126°E)采集58个表层沉积物样品(0~2 cm),采样站位见图2。其中南黄海样品主要来自于2006年中韩联合调查所

采集的样品,东海样品采集于2010年6月,长江口样品采集于2010年8月。采集的样品均于-20℃冷冻保存备用。

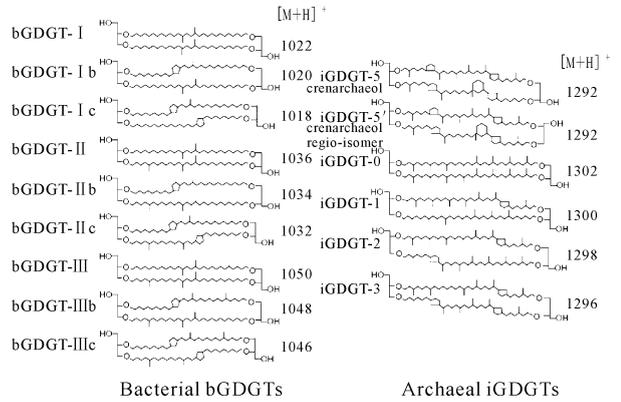


图1 GDGTs结构图

Fig. 1 Structures of GDGTs

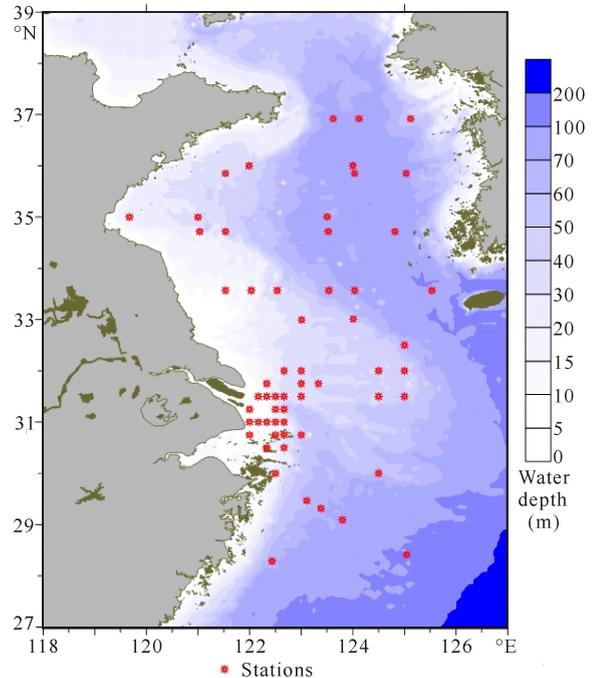


图2 采样站位图

Fig. 2 Sampling sites

## 1.2 样品分析

将冷冻干燥后的样品研磨后称取适量的二氯甲烷:甲醇溶液(DCM:MeOH=9:1,V:V)抽提至抽提液无色,之后将抽提液合并,用氮气吹干,然后先后用正己烷和 MeOH 作为淋洗液过硅胶柱分离非极性(F1)和极性组分(F2)。将 F2 极性组分溶于 99%正己烷:1%异丙醇溶液中,同时加入适量的 C<sub>46</sub>GDGT 作为内标,用高效液相色谱-质谱联用仪(HPLC-MS)进行测试。仪器型号为 Agilent 1200 HPLC,6460A 三重四级杆质谱仪,配备有大气压化学电离源(APCI)与电喷雾源(ESI)种离子源。检测 GDGTs 化合物条件:正己烷和异丙醇作为流动相,流速 0.2 mL/min,洗脱梯度为(1)0~5 min,99%正己烷:1%异丙醇;(2)5~45 min,正己烷比例从 99%线性减至 98.2%;(3)之后冲洗色谱柱并回到 99%正己烷。使用的色谱柱为 Alltect Prevail Cyano Column (50 mm×2.1 mm,3 μm);化合物离子化在 APCI 源中进行,APCI/MS 条件为雾化器压力 60 psi,雾化温度 400℃;干燥气(N<sub>2</sub>)流速为 6 L/min,温度为 200℃,毛细管电压为 3500 V,电晕电流为 5 μA (~3200 V)。为提高检测信噪比和重现性,采用单离子扫描模式(SIM)对离子进行扫描,扫描质核比(m/z)为 1302,1300,1298,1296,1292,1050,1048,1046,1036,1034,1032,1022,1020,1018。化合物的定量均为半定量。

## 1.3 环境参数

由于近海沉积物的沉积速率较高,表层 1~2 cm 沉积物所代表的年龄有可能是几年甚至是 10 年,因此文中所涉及的环境参数均为年或 10 年平均值。其中温度和盐度数据来自于 <http://www.nodc.noaa.gov/>,为 10 年平均值(2001~2010);总碱度(TAlk)和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>数据来自于 <http://odv.awi.de/en/data/ocean/>,为年平均值;水深来自于 CTD 原位测试数据。

## 1.4 数据处理

基于 GDGTs 的指标是根据图 1 所示相应化合物的峰面积来进行计算。支链和类异戊二烯指数(Branched and Isoprenoid Tetraether index, BIT)<sup>[2]</sup>、甲基化指数(Methylation index of Branched Tetraethers, MBT)<sup>[5]</sup>、环化指数(Cyclisation ratio of Branched Tetraethers, CBT)<sup>[5]</sup> 指标是利用以下公式获取:

$$BIT = \frac{bGDGT-I + bGDGT-II + bGDGT-III}{bGDGT-I + bGDGT-II + bGDGT-III + Cren.}$$

$$MBT = \frac{bGDGT-I + bGDGT-Ia + bGDGT-Ib}{\sum_{all} bGDGTs}$$

$$CBT = -\log\left(\frac{bGDGT-Ia + bGDGT-IIa}{bGDGT-I + bGDGT-II}\right)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 bGDGTs 的分布

中国东部海区 bGDGTs 的含量为 0.45~146.7 ng/g,平均为 24.47 ng/g,其中无环的 bGDGTs 含量为 0.36~101.2 ng/g,约占 bGDGTs 的 40%~95%,为 bGDGTs 的主要存在形式;带环的 bGDGTs 的含量为 0.09~45.6 ng/g,约占 bGDGTs 的 5%~60%。bGDGTs 呈一定的区域分布(图 3),在南黄海其含量随离海距离的增加而逐渐升高,无环 bGDGTs 和带环 bGDGTs 的含量在南黄海中心区域最高;在东海海域其含量随离海距离的增加而降低。另外,无论是无环 bGDGTs 还是带环 bGDGTs,其最高值均出现在长江口以南靠近杭州湾海域附近,这可能与长江输入物质大量在此沉积有关。

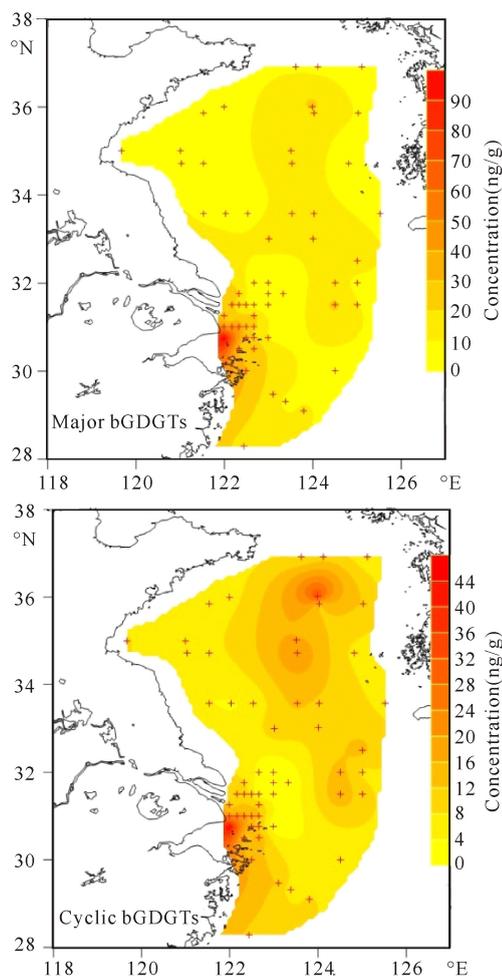


图 3 bGDGTs 的含量分布

Fig. 3 The distribution of bGDGTs concentration

## 2.2 bGDGTs 的来源

东海沉积物中 bGDGTs 的含量随离岸距离的增加而降低,反映东海沉积物中的 bGDGTs 主要来源于陆源细菌的输入,这与前人的研究结果一致<sup>[1,9]</sup>。然而 bGDGTs 的含量并不是随离岸距离的增加而呈相应的递减趋势;在南黄海海域,无论是无环的 bGDGTs 还是带环的 bGDGTs,他们的最高值均出现在南黄海中部海域(以 123.5°E,34.7°N 为中心),而在长江口外以 124.5°E,31.25°N 为中心处也有一高值区。这些高值区的存在可能基于以下两方面的原因:(1)海洋自生 bGDGTs 的贡献;(2)有机质常常富集于细颗粒沉积物中,bGDGTs 的高值可能和本区域沉积物的粒度较细有关<sup>[10]</sup>。而引起 bGDGTs 高含量的具体原因,还需要进一步研究。

另外,我们发现本海区带环的 bGDGTs 与古菌来源的 iGDGT-5 具有显著地相关性,而无环的 bGDGTs 则不具有明显的相关性,其中以 bGDGT-I c、bGDGT-II c 两者与 iGDGT-5 的相关性最强,表明环状 bGDGTs 是自生 bGDGTs 的主要存在形式

表 1 bGDGT 和 iGDGT 化合物的相关性 ( $n=58$ )

组分 Component	iGDGT-0	iGDGT-1	iGDGT-2	iGDGT-3	iGDGT-5	iGDGT-5'
bGDGT-III	0.32	0.25	0.31	0.29	<b>0.37</b>	0.19
bGDGT-III b	0.33	0.15	0.19	0.16	0.28	0.10
bGDGT-III c	0.24	0.01	-0.03	-0.03	0.08	-0.01
bGDGT-II	0.10	0.19	0.30	0.29	0.26	0.16
bGDGT-II b	<b>0.34</b>	0.16	0.20	0.17	0.30	0.11
bGDGT-II c	<b>0.73</b>	<b>0.35</b>	0.26	0.22	<b>0.48</b>	0.26
bGDGT-I	0.08	0.15	0.26	0.25	0.23	0.13
bGDGT-I b	<b>0.41</b>	0.29	0.33	0.31	<b>0.42</b>	0.23
bGDGT-I c	<b>0.78</b>	<b>0.61</b>	<b>0.57</b>	<b>0.54</b>	<b>0.71</b>	<b>0.54</b>
SUM (major bGDGTs)	0.13	0.19	0.29	0.27	0.27	0.15
SUM (cyclic bGDGTs)	<b>0.50</b>	0.31	0.33	0.30	<b>0.44</b>	0.25

注:黑体表明在  $P < 0.01$  水平下的显著相关。Note:Blod represents significant correlation ( $P < 0.01$ ).

表 2 bGDGT 化合物相对丰度与环境因子的相关关系 ( $n=48$ )

环境因子 Environmental factors	f(b-I)	f(b-I b)	f(b-I c)	f(b-II)	f(b-II b)	f(b-II c)	f(b-III)	f(b-III b)	f(b-III c)
Water depth	<b>-0.48</b>	0.19	<b>0.58</b>	<b>-0.60</b>	<b>0.46</b>	<b>0.67</b>	0.19	0.32	0.29
Salinity	-0.31	0.09	<b>0.61</b>	-0.26	0.09	0.36	0.07	0.04	0.06
SST	0.32	<b>-0.39</b>	0.25	<b>0.53</b>	<b>-0.69</b>	-0.36	-0.22	<b>-0.64</b>	-0.24
SST-Spring	0.31	<b>-0.38</b>	0.25	<b>0.52</b>	<b>-0.69</b>	-0.36	-0.21	<b>-0.62</b>	-0.24
SST-Summer	<b>0.54</b>	<b>-0.54</b>	-0.06	<b>0.73</b>	<b>-0.80</b>	<b>-0.63</b>	-0.26	<b>-0.70</b>	-0.30
SST-Autumn	<b>0.43</b>	<b>-0.46</b>	0.13	<b>0.63</b>	<b>-0.77</b>	<b>-0.48</b>	-0.26	<b>-0.70</b>	-0.28
SST-Winter	0.12	-0.24	<b>0.44</b>	0.30	<b>-0.51</b>	-0.11	-0.16	<b>-0.51</b>	-0.17
Talk	-0.32	0.09	<b>0.63</b>	-0.25	0.10	<b>0.40</b>	0.03	0.01	0.05

注:黑体表明在  $P < 0.01$  水平下的显著相关;f(i)代表各形态 bGDGT 化合物的相对丰度。

Note:Blod represents significant correlation ( $P < 0.01$ );f(i) represents the relative abundance of individual bGDGT compound.

式,且以 bGDGT-I c 和 bGDGT-II c 为主(表 1)。这一结论与 Tierney 等<sup>[11]</sup> 和 Pearson 等<sup>[12]</sup> 在湖泊中的研究结果一致,也从一定程度上表明在东部海区远离海岸的 bGDGTs 高值区主要来自于海洋自生 bGDGTs 的贡献。因此,自生 bGDGTs 的存在必然会影响 BIT 指数在指示陆源细菌相对输入中的准确性。

## 2.3 bGDGTs 与环境因子的相关性

环境因子是影响生物分布的主要因素,分析 bGDGTs 的分布对于探讨 bGDGTs 的来源及其环境指示意义具有重要意义。因此,扣除  $BIT > 0.4$  (bGDGTs 主要来自于陆源)、水深小于 18 m(水动力活跃)处的样品进行单个 bGDGT 化合物与环境因子的相关分析。可以看出温度,包括年均温度(SST)和季节温度(SST-Spring, SST-Summer, SST-Autumn, SST-Winter)与 bGDGT-I b、bGDGT-II b 和 bGDGT-III b 呈显著的负相关关系,与 bGDGT-II 呈显著的正相关关系;且 bGDGT-II b 和夏季海水表面温度(SST-Summer)的相关系数最高(表 2),这进一步表明沉积物中的 bGDGTs 有自生

bGDGTs 的输入,且夏季可能是与 bGDGTs 相关的生物大量繁殖的季节。而 bGDGT-I、bGDGT-II 与水呈负相关关系表明随着水深的增加这两种化合物的相对丰度降低,进一步表明这两种化合物可能主要来自于陆源细菌的贡献。bGDGT-Ic 与总碱度、盐度呈显著地相关关系也表明自生 bGDGTs 的自生来源。

## 2.4 各指标的环境指示意义

### 2.4.1 BIT

BIT 常常被用来指示近海或湖泊环境中陆源有机质的相对贡献<sup>[2]</sup>。从图 4 可以看出,沉积物中的 BIT 值均低于 0.3,其中大部分低于 0.1;除长江口外上升流区,中国东部海区的 BIT 值随离岸距离的增加而降低;整体而言,BIT 值在河口地区较小范围内的变化梯度较大,而在远离海岸的大部分海区其值变化较小且均一。很显然,在 bGDGTs 含量相对较高的南黄海中心泥质区,BIT 值并没升高,这说明 bGDGTs 含量的升高幅度没有 iGDGTs 的高;而南黄海中心泥质区 bGDGTs 的高含量可能与陆源 bGDGTs 主要富存于细颗粒沉积物中沉降有关,尽管有海洋自生 bGDGTs 的贡献,但与陆源输入的 bGDGTs 相比较相对较少。BIT 在杭州湾以东海域呈现的高值区与上升流存在的位置一致<sup>[13,14]</sup>,推测可能是由于上升流的涌升导致海洋自生的 iGDGTs 难于在此区域沉积,致使陆源输入的 bGDGTs 的相对贡献较大所致。至于具体的机理,还有待进一步研究。整体上来讲,除特殊环境的影响,BIT 值可以作为衡量陆源输入相对多寡的指标。

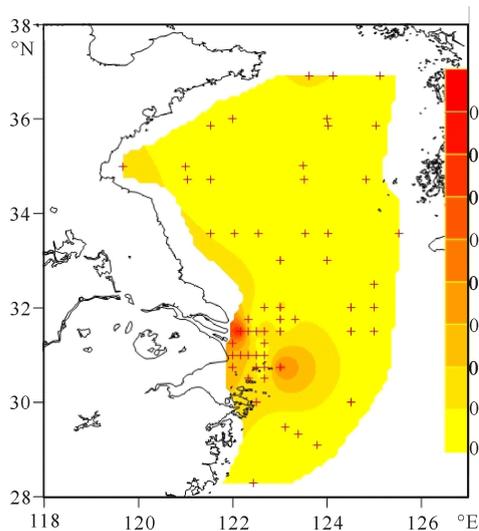


图 4 中国东部海区 BIT 分布

Fig. 4 BIT distribution in east coastal seas of China

### 2.4.2 MBT/CBT

研究发现,湖泊沉积物中的 MBT/CBT 指数可以用来指示流域气温的变化<sup>[11,15,16]</sup>,然而对于近海沉积物中的 MBT/CBT 能否用于指示流域气温的变化还未知,因此我们对近海沉积物中的 MBT/CBT 指数进行分析,看其能否用于指示流域温度的变化(图 5)。

根据 MBT/CBT 反演的年均大气温度(MAT)介于 11.7~18.3°C,均值为 14.9°C,位于中国大陆

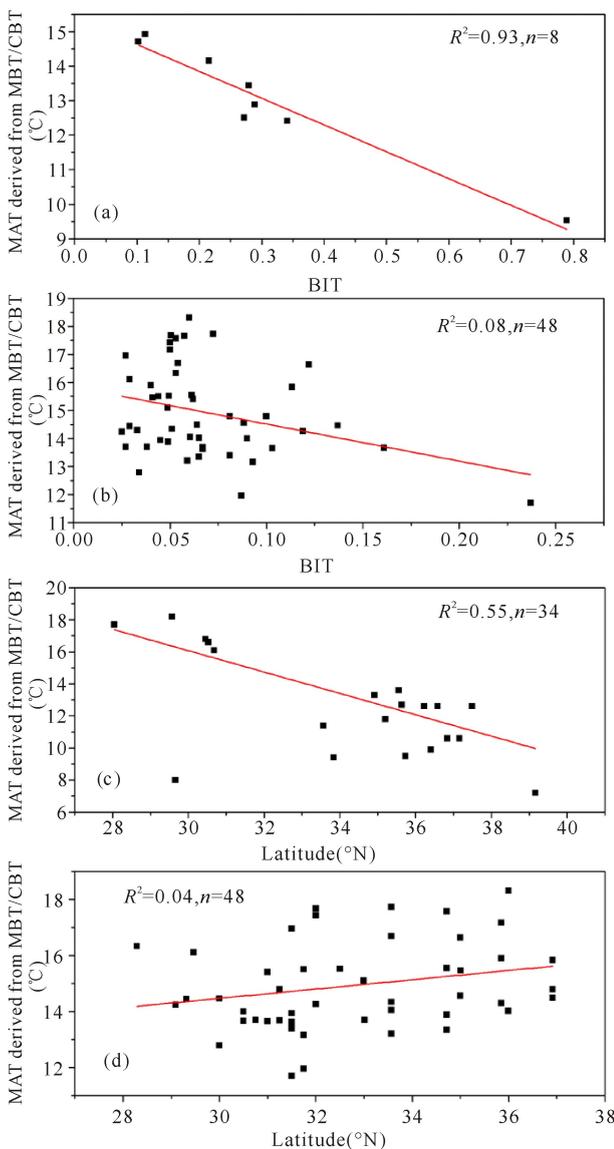


图 5 不同区域由 MBT/CBT 获取的 MAT 与纬度和 BIT 的关系

Fig. 5 The correlation between the MAT and latitude and BIT derived from MBT/CBT

a: 位于长江口口门处的站点; b 和 d: 除 BIT > 0.4 和水深 < 18 m 的其他站点; c: 中国大陆土壤样品; MATs 是器测温度。数据来自于 Xie 等<sup>[17]</sup>。

a: the sites at the mouth of Yangtze River Estuary; b and d: the sites except those with BIT > 0.4 and water depth < 18 m; c: soil samples from China Mainland; MATs: instrumental temperature. Some data was from Xie et al. 2012<sup>[17]</sup>.

(28°N~41°N)的年均气温(7.2~18.2°C)之间<sup>[17]</sup>。我们发现由长江口沉积物中的 MBT/CBT 得出的 MAT 与 BIT 呈明显的负相关,而对于其他站位则没有明显的相关性(图 5a,b),这表明来自于陆源土壤的 bGDGTs 在传输过程中降解,或者自生的 bGDGTs 导致环状、甲基化的 bGDGTs 相对增加。然而,由于东部海区沉积物来源于黄河和长江携带的陆源物质,而这两种陆源物质在近海的传输分布又比较复杂,在大部分地区都没有明显界限,这从根据 MBT/CBT 反演出的 MAT 随纬度没有明显的变化规律中也可知(图 5c,d)。因此,很难利用近海沉积物中的 MBT/CBT 来进行流域气候变化的研究。

### 3 结论

中国东部海区 bGDGTs 的含量为 0.45~146.7 ng/g,其中无环的 bGDGTs 约占总 bGDGTs 的 40%~95%,为 bGDGTs 的主要存在形式。在整个海区,bGDGTs 的含量分布呈现一定的区域性;其含量在南黄海海域,随着离岸距离的增加而升高,且环状 bGDGTs 的增加幅度较大;而在东海海域,其含量随离岸距离的增加而降低。bGDGTs 的这种分布模式除与沉积物中有机质主要富存于细颗粒有关外,还与海域海洋自生 bGDGTs 的输入有关。BIT 值在中国东部海区较小且相对均一,其分布除在长江口外上升流区具有高值区外,整体上呈现出随离岸距离增加而降低的趋势,表明 BIT 可作为衡量陆源输入相对贡献的指标。MBT/CBT 指标在本海域不能作为重建流域古气候的指标。

#### 参考文献:

- [1] Schouten S, Hopmans E C, Pancost R D, et al. Wide-spread occurrence of structurally diverse tetraether membrane lipids: Evidence for the ubiquitous presence of low-temperature relatives of hyperthermophiles[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97: 14421-14426.
- [2] Hopmans E C, Weijers J W H, Schefuß E, et al. A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224: 107-116.
- [3] Weijers J W H, Schouten S, Geenevasen J A J, et al. Membrane lipids of mesophilic anaerobic bacteria thriving in peats have typical archaeal traits[J]. *Environmental Microbiology*, 2006, 8: 648-657.
- [4] Hanford M J, Peeples T L. Archaeal tetraether lipids[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2002, 97: 45-62.
- [5] Weijers J W H, Schouten S, Sluijs A, et al. Warm arctic continents during the Palaeocene-Eocene thermal maximum[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 261: 230-238.
- [6] Donders T H, Weijers J W H, Munsterman D K, et al. Strong climate coupling of terrestrial and marine environments in the Miocene of northwest Europe[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 281: 215-225.
- [7] Hollis C J, Taylor K W R, Handley L, et al. Early Palaeogene temperature history of the Southwest Pacific Ocean: Reconciling proxies and models[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 349-350: 53-66.
- [8] Sinninghe Damsté J S, Ossebaar J, Schouten S, et al. Distribution of tetraether lipids in the 25-ka sedimentary record of Lake Challa: Extracting reliable TEX 86 and MBT/CBT palaeotemperatures from an equatorial African lake[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 50: 43-54.
- [9] Sinninghe Damsté J S, Hopmans E C, Pancost R D, et al. Newly discovered non-isoprenoid dialkyl diglycerol tetraether lipids in sediments[J]. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 2000, 17: 1683-1684.
- [10] 吕晓霞, 宋金明, 袁华茂, 等. 南黄海表层沉积物中氮的分布特征及其在生物地球化学循环中的功能[J]. *地质论评*, 2005, 51(2): 212-218.  
Lv X X, Song J M, Yuan H M, et al. Distribution characteristics of nitrogen in the southern Yellow Sea surface sediments and nitrogen functions in biogeochemical cycling[J]. *Geochemical Review*, 2005, 51(2): 212-218.
- [11] Tierney J E, Russell J M, Eggermont H, et al. Environmental controls on branched tetraether lipid distributions in tropical East African lake sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74: 4902-4918.
- [12] Pearson E J, Juggins S, Talbot H M, et al. A lacustrine GDGT-temperature calibration from the Scandinavian Arctic to Antarctic: Renewed potential for the application of GDGT-paleothermometry in lakes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75: 6225-6238.

- tive scenario: Temporal trends from 2003 to 2008[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(4): 566-573.
- [25] Roy F. Weston. Recommendation for Screening Values for Tributyltin in Sediments at Superfund Sites in Puget Sound, Washington [EB/OL]. US EPA (US Environmental Protection Agency), 1996 [2015-04-12]. DCN 4000-09-013-ADDS, 13-01-AADK, 33-01-AAAV. [http://yosemite.epa.gov/r10/cleanup.nsf/9f3c21896330b4898825687b007a0f33/eed7737e35c68e5b88256d83006048c6/\\$file/screeningtributyltin1996.pdf](http://yosemite.epa.gov/r10/cleanup.nsf/9f3c21896330b4898825687b007a0f33/eed7737e35c68e5b88256d83006048c6/$file/screeningtributyltin1996.pdf).
- (责任编辑:米慧芝)
- 
- (上接第 172 页 Continue from page 172)
- [13] 赵保仁. 长江口外的上升流现象[J]. *海洋学报*, 1993, 15(2): 108-114.  
Zhao B R. The upwelling off the Yangtze River Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(2): 108-114.
- [14] 吕新刚, 乔方利, 夏长水, 等. 长江口外及浙江沿岸夏季上升流的潮生机制[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(1): 133-144.  
Lv X G, Qiao F L, Xia C S, et al. The tidal mechanism of summer upwelling off Yangtze River Estuary and Zhejiang coast[J]. *Science in China (Earth Science)*, 2007, 37(1): 133-144.
- [15] Tierney J E, Russell J M. Distributions of branched GDGTs in a tropical lake system: Implications for lacustrine application of the MBT/CBT paleoproxy[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40: 1032-1036.
- [16] Blaga C I, Reichart G J, Schouten S, et al. Branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers in lake sediments: Can they be used as temperature and pH proxies? [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41: 1225-1234.
- [17] Xie S, Pancost R D, Chen L, et al. Microbial lipid records of highly alkaline deposits and enhanced aridity associated with significant uplift of the Tibetan Plateau in the Late Miocene [J]. *Geology*, 2012, 40(4): 291-294. DOI:10.1130/G32570.1.
- (责任编辑:米慧芝)