

陈文深,于培松,韩喜彬,等. 南极罗斯海表层沉积物 GDGTs 含量分布及其环境意义[J]. 海洋学研究, 2019,37(1):30-39, doi:10.3969/j.issn.1001-909X.2019.01.005.

CHEN Wen-shen, YU Pei-song, HAN Xi-bin, et al. Contents and distribution of GDGTs in surface sediments of Ross Sea, Antarctic and their environmental significances[J]. Journal of Marine Sciences, 2019,37(1):30-39, doi:10.3969/j.issn.1001-909X.2019.01.005.

# 南极罗斯海表层沉积物 GDGTs 含量分布及其环境意义

陈文深<sup>1,2</sup>, 于培松<sup>1,2</sup>, 韩喜彬<sup>1,3</sup>, 赵 军<sup>1,2</sup>, 潘建明<sup>\*1,2</sup>

(1. 自然资源部 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 国家海洋局 海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 国家海洋局 海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘 要:**通过分析罗斯海 15 个表层沉积物中甘油双烷基甘油四醚(Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers, GDGTs)的含量与分布,探讨了各种 GDGTs 来源及 TEX<sub>86</sub> 指标的环境意义。结果表明:表层沉积物中 GDGTs 总含量为 93.67~2 663.37 ng/g,其中类异戊二烯 GDGTs(IsoGDGTs)占 90.33%~98.56%,远高于支链 GDGTs(BrGDGTs)。类异戊二烯 GDGTs 与支链 GDGTs 具有显著的耦合关系( $R^2=0.88$ ,  $p<0.01$ )。沉积物中的 IsoGDGTs 主要来源于海洋奇古菌,BrGDGTs 主要由海洋水体和沉积物中原位细菌所产生。应用 TEX<sub>86</sub> 公式估算研究区 SST,与 WOA 夏季表层温度呈现较好的线性关系,表明 TEX<sub>86</sub> 指标在罗斯海具有适用性,可作为重建古海洋温度的替代指标。

**关键词:**罗斯海;沉积物;GDGTs;TEX<sub>86</sub>

**中图分类号:**P736.4<sup>+</sup>1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-909X(2019)01-0030-10

**Doi:**10.3969/j.issn.1001-909X.2019.01.005

## 0 引言

南极作为全球大气主要冷源之一,对调控全球海洋和气候变化起着重要作用,亦是气候变化的敏感区<sup>[1]</sup>。气候的快速变化正影响着整个海洋生态系统,尤其是极地海洋生态系统<sup>[2]</sup>,如大气中 CO<sub>2</sub> 浓度升高<sup>[3]</sup>,气候变暖,海冰的快速消退,形成冰间湖及开阔无冰区,初级生产较高<sup>[4-5]</sup>。罗斯海(Ross Sea)部分区域海洋生态系统正快速响应全球气候变暖,同时部分海区亦保留着地球上最原始的生态系统<sup>[6]</sup>。因此,罗斯海是研究南大洋自然相互作用及其过程最理想

的天然实验室之一<sup>[5]</sup>。浮游生物(主要是浮游植物和海洋微生物)对海冰消融和海表温度升高非常敏感<sup>[7]</sup>。海洋生物死亡后残体沉降并埋藏到海底,约 1% 的有机质最终保存于沉积物中。南极表层沉积物中有机碳含量较高<sup>[8-10]</sup>,其中包含结构、性质稳定,能保留生源母体碳链骨架等信息的“生物标志化合物”,如烷烃、脂肪酸、烯酮和类异戊二烯等<sup>[10-11]</sup>。因而,可通过研究海洋沉积有机质中生物标志物含量的消长及其地球化学组合特征,来推断海洋生态系统和沉积环境的变迁<sup>[12-13]</sup>。

甘油双烷基甘油四醚(Glycerol Dialkyl Glycerol

收稿日期:2017-06-08

修回日期:2019-01-07

基金项目:南北极环境综合考察与评估专项项目资助(CHINARE2015-01-02, CHINARE2017-01-02, CHINARE2017-01-04, CHINARE2017-04-01);国家自然科学基金项目资助(41376193, 41306202)

作者简介:陈文深(1990—),男,广东惠州市人,主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail:chenwenvince@163.com

\* 通讯作者:潘建明(1964—),男,研究员,主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail:jmpan@sio.org.cn

Tetraethers, GDGTs)是古菌和某些细菌细胞膜脂的主要成分,广泛存在于全球海洋、湖泊的水体和沉积物及陆地土壤中<sup>[14]</sup>。GDGTs 主要分为类异戊二烯 GDGTs (Isoprenoid GDGTs, IsoGDGTs) 和支链 GDGTs (Branched GDGTs, BrGDGTs)<sup>[15]</sup>。一般认为 IsoGDGTs 来源于海洋古菌,主要是海洋奇古菌,少部分由海洋广古菌和产甲烷古菌所贡献<sup>[16-17]</sup>。SCHOUTEN et al<sup>[14]</sup> 基于 IsoGDGTs 分子中环戊烷数目与温度的显著正相关关系,首先提出重建海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 的有机地球化学指标  $TEX_{86}$  (TetraEther indeX of tetraethers consisting of 86 carbon atoms):

$$TEX_{86} = \frac{[GDGT-2] + [GDGT-3] + [Cren']}{[GDGT-1] + [GDGT-2] + [GDGT-3] + [Cren']} \quad (1)$$

$$T = (TEX_{86} - 0.28) / 0.015$$

$$(R^2 = 0.92, n = 44, T \text{ 适用于 } 0 \sim 30 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

近年来科研人员不断完善和校准  $TEX_{86}$  指标在不同区域与海洋环境下的计算公式<sup>[18-20]</sup>。HOPMANS et al<sup>[21]</sup> 对全球海洋、湖泊沉积物和土壤中 GDGTs 的研究,指出 IsoGDGTs 主要为海洋自生源,而 BrGDGTs 主要由土壤厌氧细菌输入,因此,早期研究将其作为土壤厌氧细菌的生物标志物<sup>[21-22]</sup>。基于 BrGDGTs 来源提出了 BIT 指标:

$$BIT = \frac{GDGT-I a + GDGT-II a + GDGT-III a}{Cren + GDGT-I a + GDGT-II a + GDGT-III a} \quad (3)$$

随着研究的深入,有研究指出 BrGDGTs 在近岸河口及近海沉积物中均能检测到<sup>[23]</sup>,亦有少量为海底沉积物的原位细菌所产生<sup>[24]</sup>。中国边缘海的 BrGDGTs 以土壤输入为主<sup>[25]</sup>,楚科奇海和白令海的 BrGDGTs 则存在不同来源<sup>[26]</sup>,普里兹湾的 BrGDGTs 可能为海洋沉积物细菌自生<sup>[11]</sup>。

近年来随着  $TEX_{86}$  指标的深入研究,相较于浮游有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $U_k^{37}$  等传统重建 SST 指标<sup>[27]</sup>, $TEX_{86}$  依然存在一些不确定性。如古菌生长是否仅受温度影

响? 指示的是年平均温度或是季节性温度? 亦或指示次表层水体温度等<sup>[19, 28-30]</sup>? 这可能是古菌群落在不同海区生长的层位及季节性差异所致<sup>[26, 31]</sup>。有研究表明 IsoGDGTs 和 BrGDGTs 存在海洋原位产生和陆地土壤微生物输入的混合来源<sup>[24, 32-33]</sup>。此外,各种 GDGTs 化合物在降解、沉降埋藏及保存中的差异会造成  $TEX_{86}$  和 BIT 指标偏差<sup>[34-35]</sup>,近岸海域陆源或河流输入较多的 IsoGDGTs 亦会使  $TEX_{86}$  产生偏差<sup>[15, 26]</sup>。这使得  $TEX_{86}$  和 BIT 指标的应用变得更为复杂。

目前, GDGTs 生物标志物在南、北极海洋沉积物中已得到一定的运用<sup>[11, 26, 36-37]</sup>,但在罗斯海相关研究工作依然很欠缺。本文通过研究南极罗斯海沉积物中 GDGTs 含量及分布特征,探讨  $TEX_{86}$  和 BIT 指标在该区域的应用前景。这些研究对深入了解 GDGTs 在南大洋沉积物中的丰度、分布特征和探索南大洋古海洋温度变化具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究海域

罗斯海位于西南极维多利亚地 (Victoria Land) 的阿代尔角 (Cape Adare) 与爱德华七世半岛 (Edward VII Peninsula) 的科尔贝克角 (Cape Colbeck) 之间,其北界为大陆架外缘,南面与罗斯冰架 (Ross Ice Shelf) 相接,面积约为  $9.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,平均水深 477 m,拥有南极最大浮动冰源之一,亦是南极底层水的重要形成地之一。罗斯海海表温度一般为  $-2 \sim 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,并存在明显的季节性和年际差异 (具体见表 1)。罗斯海陆架以凹凸不平的冰川侵蚀地貌地形为特征,其地形起伏不平,存在多条海槽和浅滩,水深变化较大。由于冰川的侵蚀作用, Drygalski 海槽最大水深超过 1 000 m。罗斯海海流主要由南极表层水 (Antarctic Surface Water, AASW), 高密度陆架水 (Dense Shelf Water, DSW) 和变性绕极深层水 (Modified Circumpolar Deep Water, MCDW)、沿岸流和南极底层水 (Antarctic Bottom Water, AABW) 等组成<sup>[6, 38]</sup>。

表 1 7 个航次的罗斯海海表平均温度

Tab. 1 Average temperature of seven cruises investigation in the Ross Sea

航次	时间	平均温度/ $^\circ\text{C}$	参考文献
RSPP94	1994 年 11 月 10 日至 12 月 08 日	$-1.75 \pm 0.07$ (10 m)	[39]
RSPP95	1996 年 12 月 09 日至 1997 年 01 月 13 日	$-0.21 \pm 0.74$ (10 m)	[39]
AESOPS I	1996 年 10 月 12 日至 11 月 10 日	$-1.85 \pm 0.04$ (10 m)	[39]
AESOPS II	1997 年 01 月 13 日至 02 月 09 日	$0.21 \pm 0.45$ (10 m)	[39]
AESOPS III	1997 年 4 月 12 日至 4 月 28 日	$-1.83 \pm 0.02$ (10 m)	[39]
AESOPS IV	1997 年 11 月 15 日至 12 月 11 日	$-1.43 \pm 0.33$ (10 m)	[39]
ROAVERRS NBP96-6	1996 年 12 月 16 日至 1997 年 01 月 08 日	$-0.15$ ( $-1.69 \sim 1.39 \text{ } ^\circ\text{C}$ SST) (0~150 m)	[40]

## 1.2 样品采集

本研究所用的罗斯海 15 个表层沉积物样品,是在中国第 31 和 32 航次南极科学考察期间采集的。采样站位主要位于维多利亚地陆架边缘、罗斯冰架前

缘、Joides 海槽和 Glomar Challenger 海槽,如图 1 所示。表层沉积物样品均使用箱式采样器采集,取 0~1 cm 沉积物作为表层样品。样品采集后冷冻保存带回实验室。

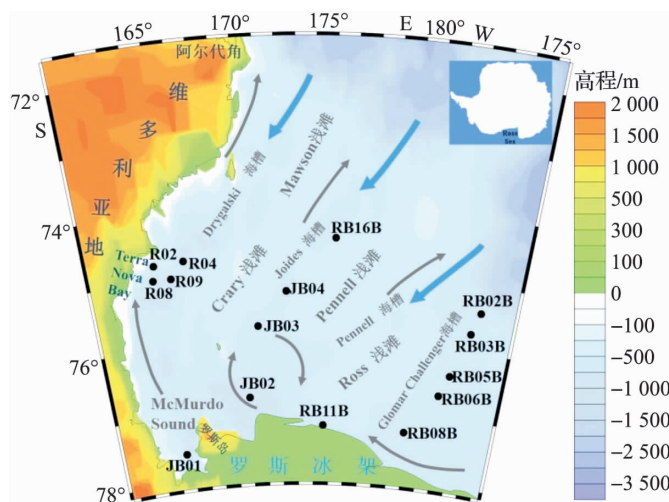


图 1 罗斯海表层沉积物采样站位、深度及环流<sup>[6, 38]</sup>

Fig. 1 Map of the Ross Sea and a schematic representation of sampling stations, with depth and the currents<sup>[6, 38]</sup>

图中箭头代表流向,灰色为南极表层环流,蓝色为变性绕极深层水(MCDW)涌入陆架

The arrows in the map represent the flow direction, the gray arrows are the Antarctic surface water(AASW) and the blue arrows are the paths of intrusions of modified circumpolar deep water(MCDW) onto the shelf

## 1.3 有机质萃取和分析

准确称取 3~6 g 冻干后研磨的沉积物样品,装入快速溶剂萃取仪(ASE350、美国)的萃取池(34 mL)中,并加入 C<sub>46</sub>-GDGTs 作为内标;用二氯甲烷/甲醇(9:1, v/v)混合试剂在温度 100 °C 加热 5 min 条件下,静态萃取 10 min,循环提取 3 次,获得所需萃取液;萃取液经氮吹浓缩处理,氢氧化钾-甲醇溶液水解后用正己烷萃取所需的有机质组分,用湿法过硅胶柱分离不同组分,最终获得极性组分。利用超高效液相色谱质谱联用仪(Waters Acquity UPLC Xevo TQMS)对 GDGTs 进行分析测定<sup>[41]</sup>。液相色谱柱为 BEH HILIC 2.1 mm×5 mm 与 2.1 mm×150 mm, 1.7 μm 串联,柱温保持在 30 °C,进样体积 5 μL。LC-MS 谱图如图 2 所示(以 JB02 站位为例)。目标化合物采用内标法定量分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 GDGTs 的含量与分布特征

罗斯海大部分站位表层沉积物总 GDGTs 含量在 93.69~828.83 ng/g 之间,除 JB01 站异常高于其

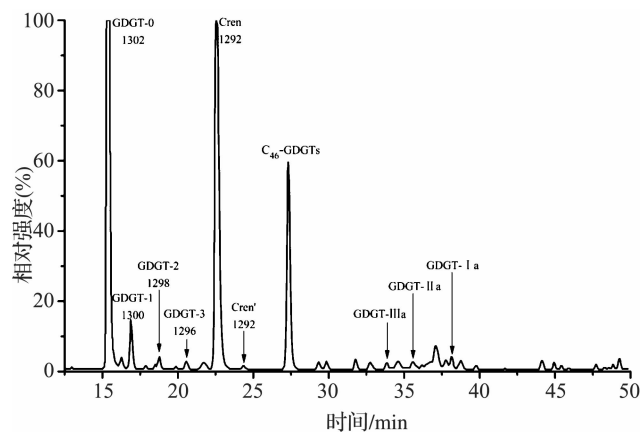


图 2 研究海域表层沉积物中 GDGTs 的液-质联用色谱图(JB02 站)

Fig. 2 LC-MS chromatograms of the GDGTs of surface sediment of JB02 station

他站外(2 663.37 ng/g),与普里兹湾的结果相近(27.69~900.78 ng/g)<sup>[11]</sup>。总 GDGTs 与 TOC 含量呈现显著的线性关系( $R^2=0.48$ ,  $p<0.01$ ,  $n=15$ ),整体呈现西高东低的分布趋势。罗斯冰架前缘和 Terra Nova 湾附近站位沉积物中 GDGTs 含量普遍

高于 Joides 海槽和 Glomar Challenger 海槽;最高值位于 JB01 站,最低值位于 RB03B 位(图 3a 和 3b)。

研究区域大部分海底表层沉积物 IsoGDGTs 的含量为 87.51~810.86 ng/g,除 JB01 站异常高于其他站外(2 563.89 ng/g)。IsoGDGTs 占 GDGTs 总量 90.33%~98.56%,远高于 BrGDGTs。IsoGDGTs 以 GDGT-0 为主,其次是 Crenarchaeol,其大部分站位含量分别为 46.97~499.89 ng/g 和 37.76~291.51 ng/g,两者之和占 IsoGDGTs 总量的 96%以上;而 GDGT-1~GDGT-3 含量均在 0.30~40.26 ng/g 之间,仅占 IsoGDGTs 总量的 3%左右。BrGDGTs 含量为 3.50~38.87 ng/g,平均值为 17.99 ng/g。在 BrGDGTs 中,GDGT-III a(平均值 5.94 ng/g)和 GDGT-II b(平均值 6.94 ng/g)略高于其他类

型,GDGT-III c(平均值 0.83 ng/g)和 GDGT-I c(平均值 0.80 ng/g)含量较低,其余类型差异不大(平均值 1.32~2.01 ng/g)。

IsoGDGTs 和 BrGDGTs 与总 GDGTs 含量分布特征一致,整体与夏季海冰密度呈现相反分布趋势<sup>[42]</sup>。IsoGDGTs 和 BrGDGTs 含量的最高值均出现在 McMurdo 湾的 JB01 站,最低值分别出现在 Glomar Challenger 海槽的 RB03B 站和 Terra Nova 湾的 R08 站(图 3c 和 3d)。IsoGDGTs 和 BrGDGTs 均与 TOC 含量呈现显著的线性关系( $R^2=0.48$ ,  $p<0.01$ ;  $R^2=0.41$ ,  $p<0.05$ ,  $n=15$ )。IsoGDGTs 与 BrGDGTs 含量亦呈现显著的线性关系( $R^2=0.88$ ,  $p<0.01$ ,  $n=15$ )。

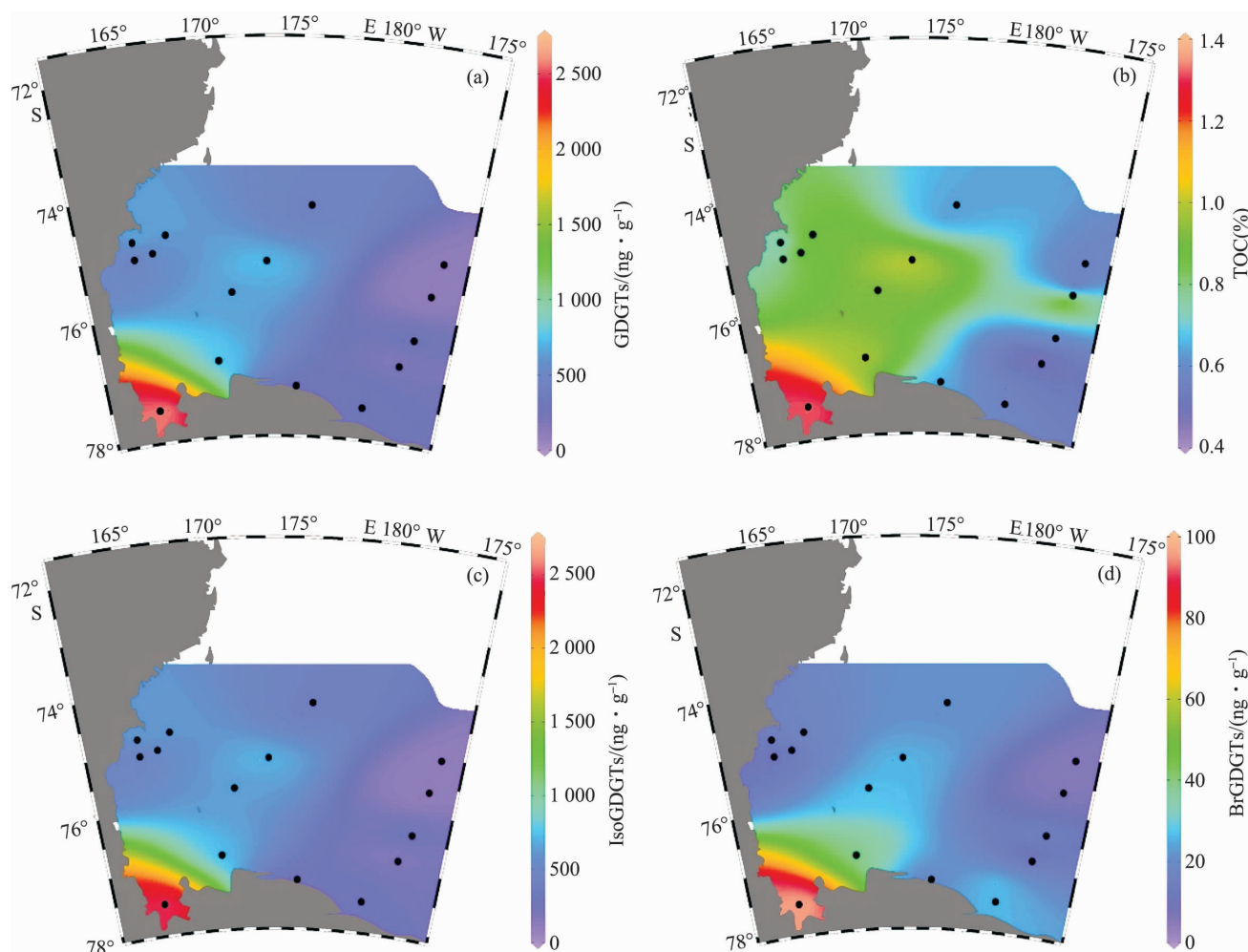


图3 罗斯海表层沉积物中 GDGTs(a)、TOC(b)、IsoGDGTs(c)和 BrGDGTs(d)含量分布特征

Fig. 3 Distribution of GDGTs (a), TOC (b), IsoGDGTs (c) and BrGDGTs (d) in surface sediments of Ross Sea

## 2.2 表层沉积物 IsoGDGTs 和 BrGDGTs 的来源

IsoGDGTs 与 TOC 含量呈现良好的线性关系,且 IsoGDGTs 和 TOC 均与黏土无显著相关关系。说明研究区表层沉积物中黏土含量不是控制 IsoGDGTs 分布的主要因素。研究表明在地形和高原冷源共同作用下形成强劲西风,南极春季首先吹开罗斯海南端和 Terra Nova 湾的海冰,形成冰间湖<sup>[43-44]</sup>,初级生产力较高。尤其西南部冰间湖海水叶绿素 *a* 和初级生产力均显著高于其他罗斯海区域<sup>[42]</sup>,且沉积速率较高<sup>[8]</sup>;而中部和东部海域由于海冰消融较晚,浮游植物缺少光照,初级生产力低<sup>[5]</sup>,沉积速率和有机质保存效率低<sup>[8]</sup>。罗斯海沉积有机质主要为海洋自生源,受上层海洋初级生产力的影响。因此,西南部 TOC 含量普遍较高,且最高值出现在 JB01 站;而中部和东部 TOC 含量相对较低。古菌的生长需要初级生产为其提供氨、尿素或有机质等能量来源。IsoGDGTs 与 TOC 具有一致的分布特征,可能是因为初级生产为产生 IsoGDGTs 的古菌提供了能量来源<sup>[45-46]</sup>。

研究区海底表层沉积物中 5 种 IsoGDGTs 呈现显著的正相关关系( $0.974 < R^2 < 0.996$ ,  $p < 0.01$ )。表明各站的 IsoGDGTs 具有相同来源。一般认为 GDGT-0 与 Crenarchaeol 比值  $R_{0/5}$ ,可用于指示产甲烷古菌对 IsoGDGTs 的贡献。其中海洋奇古菌的  $R_{0/5}$  值为  $0.2 \sim 2.0$ ,产甲烷古菌的  $R_{0/5} > 2.0$ <sup>[14, 47-48]</sup>。研究区各站沉积物中  $R_{0/5}$  值为  $1.22 \sim 1.86$ ,平均值为  $1.51$ ,说明罗斯海表层沉积物中 IsoGDGTs 主要来源于浮游奇古菌。

BrGDGTs 通常被认为来源于土壤中的厌氧细菌,随后发现在海洋水体和沉积物中细菌亦能产生 BrGDGTs。相较于土壤输入,海洋细菌自身产生的 BrGDGTs 含量非常低。整体上,研究区表层沉积物中 BrGDGTs 含量很低,约占 GDGTs 总量的 3%。此外,研究区 BIT 值均较低(为  $0.02 \sim 0.11$ ,平均值为  $0.05$ ),与普里兹湾结果接近( $0.01 \sim 0.08$ )<sup>[11]</sup>。相较于北大西洋,罗斯海的细菌(异养原核细菌)丰度较高,夏季其生物量可达浮游植物总量的 2%,细菌生物量的最大值约比春季浮游植物晚一个月到达,其生长主要受有机质输入的影响<sup>[49-50]</sup>。结果表明沉积物中 BrGDGTs 可能为海洋水体和沉积物中原位细菌所产生。

IsoGDGTs 与 BrGDGTs 呈现显著的线性关系,与普里兹湾( $R^2 = 0.98$ ,  $p < 0.01$ ,  $n = 10$ )<sup>[11]</sup>、中国边缘海( $R^2 = 0.71 \sim 0.90$ ,  $p < 0.01$ )<sup>[15, 25, 51]</sup>及全球尺度( $R^2 = 0.56 \sim 0.98$ ,  $p < 0.01$ )<sup>[52]</sup>的结果一致。这种线

性关系一般认为是 GDGTs 混合输入所致。在河口区陆源输入 BrGDGTs 的同时,带来营养盐(如铵盐),促进了古菌的生长,使其产生更多的 IsoGDGTs;此外,陆源营养盐的输入亦可能促进海洋原位产生 BrGDGTs 的细菌的生长<sup>[15, 25]</sup>。但罗斯海不存在营养盐限制<sup>[5]</sup>,且陆源输入量少。因此,该区域古菌和细菌的生长可能与海冰消融、初级生产力及古菌群落随营养盐变化有关。海洋沉积物中细菌以沉积有机质为主要碳源,所以研究区沉积物中 BrGDGTs 与 TOC 含量呈现良好的线性关系。这佐证了罗斯海细菌生长受有机质限制的结论。说明罗斯海海底表层沉积物中 BrGDGTs 很可能由海洋细菌所产生,而非陆源土壤的厌氧细菌输入。因此,BIT 指标在罗斯海可能不适用。

## 2.3 TEX<sub>86</sub> 指标与 SST

海表温度是研究海洋环境和全球气候变化重要且敏感的指标。基于 IsoGDGTs 与温度之间的线性关系建立的 TEX<sub>86</sub> 是重建 SST 的一个重要指标。随着 TEX<sub>86</sub> 指标校正公式的不断完善,提出了多个适用于低温条件下的公式。KIM et al<sup>[19]</sup>将 TEX<sub>86</sub> 指标分为适用于低温区域( $< 15^\circ\text{C}$ )的 TEX<sub>86</sub><sup>L</sup>指标和高温区域( $> 15^\circ\text{C}$ )的 TEX<sub>86</sub><sup>H</sup>指标:

$$\text{TEX}_{86}^L = \log\left(\frac{[\text{GDGT-2}]}{[\text{GDGT-1}] + [\text{GDGT-2}] + [\text{GDGT-3}]}\right) \quad (4)$$

$$\text{TEX}_{86}^H = \log(\text{TEX}_{86}) \quad (5)$$

这为 TEX<sub>86</sub> 指标在极地的应用创造了条件。TEX<sub>86</sub> 指标的研究为人们认识罗斯海温度和气候变化提供了一种新方法。前人研究结果显示 TEX<sub>86</sub> 指标在南极半岛<sup>[37]</sup>、普里兹湾<sup>[11]</sup>、北冰洋<sup>[53]</sup>等极地海洋重建 SST 方面,展现出较大的应用潜力<sup>[54-55]</sup>。表 2 列出了已在南、北极取得应用的 TEX<sub>86</sub>-SST 和 TEX<sub>86</sub><sup>L</sup>-SST 计算公式。

表 2 极地区 TEX<sub>86</sub>-SST 计算公式

Tab. 2 Calibration models between TEX<sub>86</sub> and SST used in the polar sea

编号	公式	$R^2$	$n$	误差	文献
1	$T = 67.5 \times \text{TEX}_{86}^L + 46.9$	0.86	396	4.4	[19]
2	$T = 50.8 \times \text{TEX}_{86}^L + 36.1$	0.87	396		[37]
3	$T = 56.2 \times \text{TEX}_{86}^L - 10.78$	0.94	223	1.7	[18]
4	$T = (\text{TEX}_{86} - 0.3038) / 0.0125$	0.82	7	2.2	[56]
5	$T = -19.1 / \text{TEX}_{86}^L + 54.5$	0.75	396	5.4	[19]

本文利用世界海洋图集及数据库(WOA2013,

1955—2012 年数据集,分辨率为 0.25°,http://odv.awi.de/data/ocean/world-ocean-atlas-2013/)中对应站点上层 0~200 m 海水中各层温度。进行逐季、逐月、逐层  $\text{TEX}_{86}$ -SST 和  $\text{TEX}_{86}^{\text{L}}$ -SST 对比分析(表 3)。结果表明  $\text{TEX}_{86}^{\text{L}}$  与 WOA 夏季各月表层温度均呈现一定的相关性,其中与 3 月表层温度相关性最好( $R^2=0.58$ 、 $p<0.01$ , $n=15$ ),如图 4a 所示。

罗斯海夏季(每年 11 月至次年 3 月)为融冰期,形成开阔水域和冰间湖,初级生产力高<sup>[42]</sup>。3 月处于罗斯海夏季末,海冰开始逐渐增加,浮游植物生物量开始降低。IsoGDGTs 与 BrGDGTs 含量呈现一致的

变化趋势。说明浮游奇古菌生物量很可能与细菌一样,比浮游植物的最大值晚一个月达到最大值<sup>[49]</sup>。因此,浮游奇古菌生物量很可能在 3 月达到最大值。将计算结果与 WOA 夏季及 3 月表层温度进行对比,发现  $\text{TEX}_{86}$ -SST 公式所计算的温度均偏高,而  $\text{TEX}_{86}^{\text{L}}$ -SST 公式中公式 1 与公式 2 计算的温度与 WOA 夏季和 3 月表层温度较接近(图 4b),其中公式 2 所计算的 SST 比公式 1 的 SST 与 WOA 夏季和 3 月表层温度具有更好的线性关系。因此,公式 2 比公式 1 更加适用于研究海区,整体上公式 2 所计算的温度反映的是研究区域夏季海表温度。

表 3 罗斯海  $\text{TEX}_{86}$  和  $\text{TEX}_{86}^{\text{L}}$ -SST 计算结果

Tab. 3 Values of SST based on  $\text{TEX}_{86}$  and  $\text{TEX}_{86}^{\text{L}}$  in the Ross Sea

站点	TOC(%)	BIT	$\text{TEX}_{86}$	$\text{TEX}_{86}^{\text{L}}$	SST/℃					WOA 夏季 (30 m)	WOA 3 月 表层(10 m)
					公式 1	公式 2	公式 3	公式 4	公式 5		
JB01	1.34	0.05	0.38	-0.70	-0.35	0.54	10.58	6.10	4.24	-1.63	-1.17
JB02	0.99	0.06	0.38	-0.71	-1.03	0.03	10.58	6.10	4.24	-1.57	-0.77
JB03	0.91	0.05	0.36	-0.73	-2.38	-0.98	9.45	4.50	1.44	-1.63	-0.78
JB04	1.03	0.04	0.37	-0.73	-2.38	-0.98	10.01	5.30	2.88	-1.54	-0.70
R02	0.58	0.02	0.35	-0.74	-3.05	-1.49	8.89	3.70	-0.07	-2.04	-1.50
R04	1.00	0.03	0.38	-0.69	0.33	1.05	10.58	6.10	4.24	-1.79	-1.19
R08	0.69	0.02	0.50	-0.76	-4.40	-2.51	17.32	15.70	16.30	-1.98	-1.46
R09	1.01	0.02	0.37	-0.72	-1.70	-0.48	10.01	5.30	2.88	-1.91	-1.30
RB02B	0.43	0.08	0.38	-0.70	-0.35	0.54	10.58	6.10	4.24	-1.32	-0.87
RB03B	1.03	0.11	0.41	-0.65	3.03	3.08	12.26	8.50	7.91	-1.23	-0.80
RB05B	0.62	0.04	0.38	-0.70	-0.35	0.54	10.58	6.10	4.24	-1.13	-0.79
RB06B	0.40	0.11	0.42	-0.65	3.03	3.08	12.82	9.30	9.02	-0.80	-0.68
RB08B	0.56	0.08	0.42	-0.66	2.35	2.57	12.82	9.30	9.02	-1.28	-0.92
RB11B	0.64	0.05	0.38	-0.69	0.33	1.05	10.58	6.10	4.24	-1.54	-0.82
RB16B	0.62	0.06	0.36	-0.70	-0.35	0.54	9.45	4.50	1.44	-1.17	-0.63
平均值	0.79	0.05	0.39	-0.70	-0.49	0.44	11.10	6.84	5.08	-1.50	-0.96

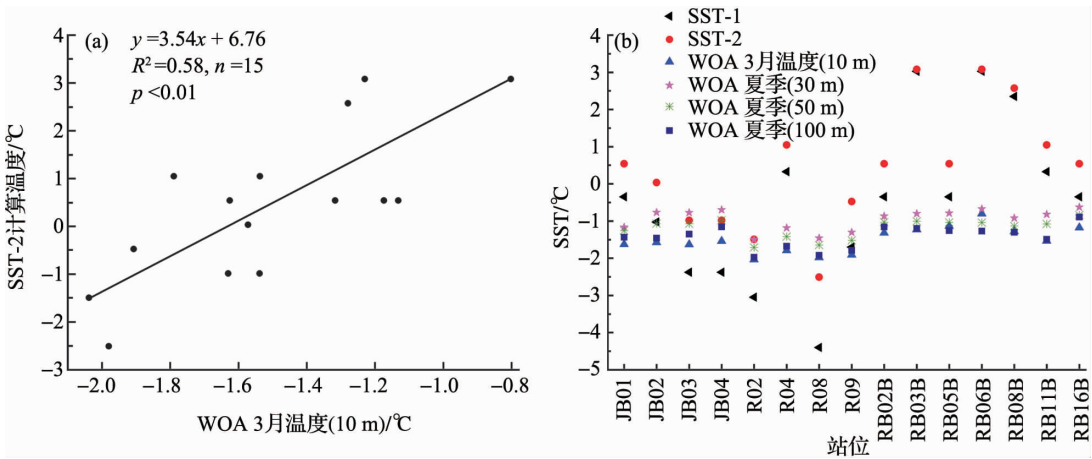


图 4 罗斯海 WOA 3 月(10 m)与 SST-2 的线性关系(a)和 WOA 3 月(10 m)、WOA 夏季各层温度与 SST-1 及 SST-2 的分布(b)

Fig. 4 Relationship between WOA march SST (10 m) and SST-2(a) and distribution of WOA march SST(10 m) and WOA summer SST(30 m,50 m,100 m) and SST-1 and SST-2 in Ross Sea(b)



Glomar Challenger 海槽 RB03B、RB06B 和 RB08B 站的 IsoGDGTs 含量均较低(分别为 87.51, 99.86 和 311.38 ng/g),反映的 SST 高于 WOA 夏季表层水温。一方面,可能是罗斯海东部海域初级生产力、沉积速率及有机质保存效率较低<sup>[8]</sup>,使得 IsoGDGTs 沉降过程不稳定且被降解;另一方面,可能是因为南太平洋温跃层暖水向西流受 Pennell 浅滩阻挡,越过 170°W 陆架坡折经海槽向南流的影响,导致 TEX<sub>86</sub><sup>L</sup> 指标重建的 SST 与真实值偏差较大。

Terra Nova 湾附近和罗斯冰架前缘站 IsoGDGTs 含量较高,TEX<sub>86</sub><sup>L</sup> 指标反演的 SST 与 WOA 夏季表层温度较接近。这可能与罗斯海南部和 Terra Nova 湾冰间湖初级生产力季节变化有关。夏季初级生产力高,叶绿素质量浓度高,合成 IsoGDGTs 的古菌生产力亦高。此外,罗斯海西南部,沉积速率较高,有机质保存效率高<sup>[8]</sup>,IsoGDGTs 保存效率较高,公式 2 所计算的温度偏差小。因此,TEX<sub>86</sub><sup>L</sup> 指标中公式 2 计算的 SST 可作为重建该海区古温度的重要参考数据。在 Terra Nova 湾附近的 R02 和 R08 站为粉砂质砂沉积,且平均粒径较小(分别为 4.17Φ 和 4.79Φ),其余站均为砂质粉砂和黏土质粉砂;此外,这两个站沉积物中 TOC 含量明显比 R04 和 R09 站低。公式 1 在 R02 和 R08 站计算得出的 SST 显著偏低。这可能是受海冰消融携带的陆源砂石和冰筏碎屑稀释而引起的偏差。因此,在罗斯海使用 TEX<sub>86</sub><sup>L</sup> 指标计算 SST 时,需要考虑该区域的初级生产力、有机质保存效率及陆源砂石和冰筏碎屑输入的影响。

### 3 结论

(1)罗斯海表层沉积物 GDGTs 以 IsoGDGTs 为主,BrGDGTs 含量较低。IsoGDGTs 和 BrGDGTs 均与 TOC 含量具有一致分布特征,整体均呈现西高东低。

(2)罗斯海表层沉积物 IsoGDGTs 主要来源于海洋奇古菌;BrGDGTs 来源于水体和沉积物原位细菌,而非陆源土壤细菌所输入。因此,用于指示陆源有机质输入的 BIT 指标,在罗斯海可能不适用。

(3)利用现有低温校正公式计算得到 TEX<sub>86</sub><sup>L</sup>-SST 与 WOA-SST 数据对比分析,结果显示公式 2 重建的 SST 与 WOA 夏季表层温度具有良好的相关性。因此,公式 2 所计算的温度可能反映的是南极罗斯海夏季表层温度。

**致谢** 衷心感谢国家海洋局极地考察办公室、中国极地研究中心为本研究提供的现场考察平台;感谢参加中国第 31 和 32 次南极科学考察任务的全体科学考察人员及“雪龙”号上的全体船员为采集沉积物样品所付出的艰辛劳动;感谢自然资源部第二海洋研究所季仲强老师在液相色谱的使用、谱图生物标志物峰的鉴定和积分时对本人工作的指导;感谢自然资源部第二海洋研究所研究生杨峥、叶陈军,中国地质大学(武汉)博士生刘瑞娟在实验过程中的帮助。

### 参考文献(References):

- [1] CAI Wen-ju, BAINES P G. Forcing of the Antarctic Circumpolar Wave by El Nino-Southern Oscillation teleconnections[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2001, **106**(C5): 9 019-9 038.
- [2] DONEY S C, RUCKELSHAUS M, DUFFY J E, et al. Climate change impacts on marine ecosystems[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, **4**(1): 11-37.
- [3] MATSON P G, MARTZ T R, HOFMANN G E. High-frequency observations of pH under Antarctic sea ice in the southern Ross Sea[J]. *Antarctic Science*, 2011, **23**(6): 607-613.
- [4] STAMMERJOHN S E, MARTINSON D G, SMITH R C, et al. Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to ENSO and Southern Annular Mode variability[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2008, **113**(C3): 1-20.
- [5] SMITH W O, AINLEY D G, ARRIGO K R, et al. The Oceanography and ecology of the Ross Sea[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2014, **6**(1): 469-487.
- [6] SMITH W O, SEDWICK P N, ARRIGO K R, et al. The Ross Sea in a sea of change[J]. *Oceanography*, 2012, **25**(3): 90-103.
- [7] ZHAO Jun, HAN Zheng-bing, PAN Jian-ming. Spatial and temporal variation of phytoplankton indicated by multi-proxies in Prydz Bay, Antarctica [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(6): 589-594.
- [8] 赵军, 韩正兵, 潘建明. 多参数指示南极普里兹湾浮游植物的时空变化[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(6): 589-594.
- [8] DEMASTER D J, RAGUENEAU O, NITTROUER C A. Preservation efficiencies and accumulation rates for biogenic silica and organic C, N, and P in high-latitude sediments: The Ross Sea [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1996, **101**(C8): 18 501-18 518.
- [9] LIU Rui-juan, YU Pei-song, HU Chuan-yu, et al. Contents and distributions of organic carbon and total nitrogen in sediments of Prydz Bay, Antarctic[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, **36**(4): 118-125.
- [9] 刘瑞娟, 于培松, 扈传昱, 等. 南极普里兹湾沉积物中有机碳和总氮的含量与分布[J]. *海洋学报*, 2014, **36**(4): 118-125.
- [10] HAN Xi-bin, ZHAO Jun, CHU Feng-you, et al. The source of organic matter and its sedimentary environment of the bottom surface sediment in northeast waters to Antarctic Peninsula based on the biomarker features[J]. *Acta Oceanologica Sinica*,

- 2015, **37**(8): 26-38.
- 韩喜彬, 赵军, 初凤友, 等. 南极半岛东北海域表层沉积有机质来源及其沉积环境[J]. 海洋学报, 2015, **37**(8): 26-38.
- [11] YANG Zheng, YU Pei-song, PAN Jian-ming, et al. Contents and distribution of GDGTs and the index application of TEX<sub>86</sub> in surface sediments of Prydz Bay, Antarctic[J]. Journal of Marine Sciences, 2017, **35**(1): 47-54.
- 杨峥, 于培松, 潘建明, 等. 南极普里兹湾表层沉积物 GDGTs 含量分布与 TEX<sub>86</sub> 指标应用研究[J]. 海洋学研究, 2017, **35**(1): 47-54.
- [12] LU Bin, ZHOU Huai-yang, CHEN Rong-hua, et al. The composition characteristics of n-alkanes in the modern sediments of the Arctic and the comparison with that of sea areas of different latitudes[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2004, **16**(4): 281-294.
- 卢冰, 周怀阳, 陈荣华, 等. 北极现代沉积物中正构烷烃的分子组合特征及其与不同纬度的海域对比[J]. 极地研究, 2004, **16**(4): 281-294.
- [13] XIE Shu-cheng, LIANG Bin, GUO Jian-qiu, et al. Biomarker and the related global change[J]. Quaternary Sciences, 2003, **23**(5): 521-528.
- 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.
- [14] SCHOUTEN S, HOPMANS E C, SCHEFUB E, et al. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, **204**(s 1-2): 265-274.
- [15] GE Huang-min, ZHANG Chuan-lun. Advances in GDGTs research in Chinese marginal sea: A review[J]. Science China Earth Sciences, 2016, **46**(4): 473-488.
- 葛黄敏, 张传伦. 中国边缘海环境中 GDGT 的研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, **46**(4): 473-488.
- [16] ZHU C, WEIJERS J W H, WAGNER T, et al. Sources and distributions of tetraether lipids in surface sediments across a large river-dominated continental margin[J]. Organic Geochemistry, 2011, **42**(4): 376-386.
- [17] SCHOUTEN S, HOPMANS E C, DAMSTÉ J S S. The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids: A review[J]. Organic Geochemistry, 2013, **54**(1): 19-61.
- [18] KIM J H, SCHOUTEN S, HOPMANS E C, et al. Global sediment core-top calibration of the TEX<sub>86</sub> paleothermometer in the ocean[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, **72**(4): 1 154-1 173.
- [19] KIM J H, VAN DER MEER J, SCHOUTEN S, et al. New indices and calibrations derived from the distribution of crenarchaeal isoprenoid tetraether lipids: Implications for past sea surface temperature reconstructions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, **74**(16): 4 639-4 654.
- [20] TIERNEY J E, TINGLEY M P. A Bayesian, spatially-varying calibration model for the TEX<sub>86</sub> proxy[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, **127**(3): 83-106.
- [21] HOPMANS E C, WEIJERS J W H, SCHEFUB 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**(1-2): 107-116.
- [22] WEIJERS J W H, SCHOUTEN S, SPAARGAREN O C, et al. Occurrence and distribution of tetraether membrane lipids in soils: Implications for the use of the TEX<sub>86</sub> proxy and the BIT index[J]. Organic Geochemistry, 2006, **37**(12): 1 680-1 693.
- [23] RUEDA G, ROSELL-MELÉ A, ESCALA M, et al. Comparison of instrumental and GDGT-based estimates of sea surface and air temperatures from the Skagerrak[J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(2): 287-291.
- [24] HEDLUND B P, LI W J, ZHANG C. Addressing questions on life in terrestrial geothermal systems[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2013, **94**(37): 325.
- [25] GE Huang-min, ZHANG Chuan-lun, LI Jun, et al. Tetraether lipids from the southern Yellow Sea of China: Implications for the variability of East Asia Winter Monsoon in the Holocene[J]. Organic Geochemistry, 2014, **70**(5): 10-19.
- [26] PARK Y H, YAMAMOTO M, NAM S I, et al. Distribution, source and transportation of glycerol dialkyl glycerol tetraethers in surface sediments from the western Arctic Ocean and the northern Bering Sea[J]. Marine Chemistry, 2014, **165**: 10-24.
- [27] HO S L. Reconstructing sea surface temperature in the South Pacific using organic proxies[D]. Universität Bremen, 2012.
- [28] HARADA N, SATO M, SEKI O, et al. Sea surface temperature changes in the Okhotsk Sea and adjacent North Pacific during the last glacial maximum and deglaciation[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2012, **61-64**: 93-105.
- [29] SHINTANI T, YAMAMOTO M, CHEN M T. Paleo environmental changes in the northern South China Sea over the past 28,000 years: A study of TEX<sub>86</sub>-derived sea surface temperatures and terrestrial biomarkers[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, **40**(6): 1 221-1 229.
- [30] HUGUET C, SCHIMMELMANN A, THUNELL R, et al. A study of the TEX<sub>86</sub> paleothermometer in the water column and sediments of the Santa Barbara Basin, California[J]. Paleoceanography, 2007, **22**(3): 150-173.
- [31] LENGGER S K, HOPMANS E C, DAMSTÉ J S S, et al. Impact of sedimentary degradation and deep water column production on GDGT abundance and distribution in surface sediments in the Arabian Sea: Implications for the TEX<sub>86</sub> paleothermometer[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, **142**(142): 386-399.
- [32] KIM J H, ROMERO O E, LOHMANN G, et al. Pronounced subsurface cooling of North Atlantic waters off Northwest Africa during Dansgaard-Oeschger interstadials[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, **339-340**(4): 95-102.
- [33] ZHANG Jie, BAI Yang, XU Shen-dong, et al. Alkenone and tetraether lipids reflect different seasonal seawater temperatures in the coastal northern South China Sea[J]. Organic Geochemis-



- try, 2013, **58**: 115-120.
- [34] HUGUET C, KIM J H, DE LANGE G J, et al. Effects of long term oxic degradation on the  $U_{37}$ ,  $TEX_{86}$  and BIT organic proxies[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(12): 1 188-1 194.
- [35] LENGGER S K, KRAAIJ M, TJALLINGII R, et al. Differential degradation of intact polar and core glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids upon post-depositional oxidation[J]. *Organic Geochemistry*, 2013, **65**(6): 83-93.
- [36] WANG Shou-gang, WANG Ru-jian, CHEN Jian-fang, et al. Spatial distribution patterns of GDGTs in the surface sediments from the Bering Sea and Arctic Ocean and their environmental significances[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, **28**(2): 282-295. 王寿刚, 王汝建, 陈建芳, 等. 白令海与西北冰洋表层沉积物中四醚膜类脂物研究及其生态和环境指示意义[J]. *地球科学进展*, 2013, **28**(2): 282-295.
- [37] ETOURNEAU J, COLLINS L G, WILLMOTT V, et al. Holocene climate variations in the western Antarctic Peninsula: evidence for sea ice extent predominantly controlled by insolation and ENSO variability changes[J]. *Climate of the Past*, 2013, **9**: 1 431-1 446.
- [38] ORSI A H, WHITWORTH T, NOWLIN W D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1995, **42**(5): 641-673.
- [39] CARLSON C A, HANSELL D A, PELTZER E T, et al. Stocks and dynamics of dissolved and particulate organic matter in the southern Ross Sea, Antarctica[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2000, **47**(15-16): 3 201-3 225.
- [40] ARRIGO K R, DITULLIO G R, DUNBAR R B, et al. Phytoplankton taxonomic variability in nutrient utilization and primary production in the Ross Sea[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000, **105**(C4): 8 827-8 846.
- [41] HOPMANS E C, SCHOUTEN S, DAMSTÉ J S. The effect of improved chromatography on GDGT-based palaeoproxies [J]. *Organic Geochemistry*, 2016, **93**: 1-6.
- [42] ARRIGO K R, VAN DIJKEN G L. Annual changes in sea-ice, chlorophyll a, and primary production in the Ross Sea, Antarctica[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, **51**(1): 117-138.
- [43] PARISH T R, BROMWICH D H. The surface windfield over the Antarctic ice sheets[J]. *Nature*, 1987, **328**(6125): 51-54.
- [44] ARRIGO K R, WEISS A M, SMITH W O. Physical forcing of phytoplankton dynamics in the southwestern Ross Sea[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1998, **103**(C1): 1 007-1 021.
- [45] WUCHTER C, ABBAS B, COOLEN M J L, et al. Archaeal nitrification in the ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(33): 12 317-12 322.
- [46] ARRIGO K R. Marine microorganisms and global nutrient cycles [J]. *Nature*, 2005, **437**(7057): 349-356.
- [47] BLAGA C I, REICHART G J, HEIRI O, et al. Tetraether membrane lipid distributions in water-column particulate matter and sediments: a study of 47 European lakes along a north-south transect[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009, **41**(3): 523-540.
- [48] DAMSTÉ J S S, OSSEBAAR J, ABBAS B, et al. Fluxes and distribution of tetraether lipids in an equatorial African lake: constraints on the application of the  $TEX_{86}$  palaeothermometer and BIT index in lacustrine settings[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, **73**(14): 4 232-4 249.
- [49] DUCKLOW H, CARLSON C, CHURCH M, et al. The seasonal development of the bacterioplankton bloom in the Ross Sea, Antarctica, 1994-1997[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2001, **48**(19-20): 4 199-4 221.
- [50] DUCKLOW H W. The bacterial component of the oceanic euphotic zone[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 1999, **30**(30): 1-10.
- [51] DONG Liang, LI Qian-yu, LI Li, et al. Glacial-interglacial contrast in MBT/CBT proxies in the South China Sea: Implications for marine production of branched GDGTs and continental teleconnection[J]. *Organic Geochemistry*, 2015, **79**: 74-82.
- [52] FIETZ S, HUGUET C, BENDLE J, et al. Co-variation of crenarchaeol and branched GDGTs in globally-distributed marine and freshwater sedimentary archives [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, **92-93**: 275-285.
- [53] YU Xiao-guo, BIAN Ye-ping, RUAN Xiao-yan, et al. Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers and  $TEX_{86}$  index in surface sediments of the Arctic Ocean and the Bering Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2015, **35**(3): 11-22. 于晓果, 边叶萍, 阮小燕, 等. 北冰洋沉积物中四醚脂类来源与  $TEX_{86}$  指数初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, **35**(3): 11-22.
- [54] HO S L, MOLLENHAUER G, FIETZ S, et al. Appraisal of  $TEX_{86}$  and  $TEX_{86}$  thermometries in subpolar and polar regions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, **131**(5): 213-226.
- [55] KIM J H, CROSTA X, WILLMOTT V, et al. Holocene subsurface temperature variability in the eastern Antarctic continental margin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(6): 70-82.
- [56] SHEVENELL A E, INGALLS A E, DOMACK E W, et al. Holocene Southern Ocean surface temperature variability west of the Antarctic Peninsula[J]. *Nature*, 2011, **470**(7333): 250-254.

# Contents and distribution of GDGTs in surface sediments of Ross Sea, Antarctic and their environmental significances

CHEN Wen-shen<sup>1,2</sup>, YU Pei-song<sup>1,2</sup>, HAN Xi-bin<sup>1,3</sup>, ZHAO Jun<sup>1,2</sup>, PAN Jian-ming<sup>\*1,2</sup>

(1. *Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China*;

2. *Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Hangzhou 310012, China*;

3. *Key Laboratory of Submarine Geosciences, SOA, Hangzhou 310012, China*)

**Abstract:** The contents and distribution of Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers (GDGTs) in 15 surface sediment samples from Ross Sea, Antarctica were analyzed. Besides, the source of GDGTs and environmental implications of TEX<sub>86</sub> were discussed. The results show that the content of GDGTs is from 93.67 to 2 663.37 ng/g with the isoprenoid GDGTs accounts for 90.33%–98.56%, which are much more higher than those of branched GDGTs. Isoprenoid GDGTs have significant positive correlation with branched GDGTs ( $R^2 = 0.88, p < 0.01$ ). The result indicates that isoprenoid GDGTs come from marine Archaea while branched GDGTs are mainly from bacteria in sea waters and sediments. Correlation analysis with the WOA database shows that the TEX<sub>86</sub><sup>L</sup> index reconstructed temperatures are of significant positive correlation with the sea surface temperatures in summer in the study area. Thus, the TEX<sub>86</sub><sup>L</sup> could be used as a potential index for paleo-SST reconstruction in the Ross Sea.

**Key words:** Ross Sea; sediment; GDGTs; TEX<sub>86</sub>

## 2019 年《海洋学研究》征订启事

《海洋学研究》国内刊号为 CN 33-1330/P, 国际刊号为 ISSN 1001-909X, 季刊, 16 开, 目前为自办发行, 每册定价为 9.00 元, 全年定价为 40 元(含邮寄费)。请读者将书款通过邮局直接寄往如下地址: “浙江省杭州市保俶北路 36 号《海洋学研究》编辑部”, 邮编: 310012。

若通过银行汇款, 请在收款人一栏中填写本编辑部所在单位的全称: “自然资源部第二海洋研究所”, 账号填写: 1202026209008803510, 汇入地点填写“杭州”, 汇入行名称填写“工行高新支行”, 汇款用途填写“订阅《海洋学研究》”。订阅单和收款记账凭证寄回本编辑部。

**编辑部地址:** 杭州市保俶北路 36 号《海洋学研究》编辑部, 邮编: 310012

**电话:** 0571-81963193 **传真:** 0571-81963195

**联系人:** 段焱 **E-mail:** haiyangxueyanjiu@163.com

(本刊编辑部)

### 2019 年《海洋学研究》征订单

订户名			
寄刊地址			
邮编		订阅份数	金额(元)
联系人			
联系电话			
留言			