

南太平洋东部劳盆地扩张中心表层沉积物中 甘油二烷基甘油四醚脂类化合物的组成特征 及生物地球化学意义*

陈固魁^{1,2} 胡建芳^{1①} 杨群慧³ 彭平安¹

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049;
3. 同济大学海洋地质国家重点实验室 上海 200092)

提要 通过对南太平洋劳盆地东部扩张中(ELSC)表层沉积物样品中甘油二烷基甘油四醚脂类化合物(GDGTs)的分析结果表明,所有样品均检测出类异戊二烯 GDGTs 和支链 GDGTs。其中,类异戊二烯 GDGTs 占总 GDGTs 的 58.1%—93.4%, 泉古菌醇(crenarchaeol)、GDGT I 和 GDGT V 为其主要组分,说明古菌对于 GDGTs 的相对贡献量大,非嗜热泉古菌是最主要输入源,受其影响,热液活动记录难以从类异戊二烯 GDGTs 中识别。与此相比,支链 GDGTs 受热液活动影响明显。热液区样品的支链 GDGTs 占总 GDGTs 百分比普遍偏高(32.9%—41.9%),并表现出多种分布特征;而非热液地区样品中的支链 GDGTs 占总 GDGTs 百分比则较小(9.0%—16.7%),且均以 GDGT VIIIa 为最主要的支链 GDGTs 化合物。这些分布特征表明支链 GDGTs 主要来源于原地厌氧细菌,这进一步拓宽了支链 GDGTs 的分布范围。

关键词 古菌, 细菌, GDGTs, 热液喷口

中图分类号 P731

甘油二烷基甘油四醚脂类化合物(Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers, GDGTs)是古菌和细菌细胞膜的主要组分(Hopmans *et al.*, 2004; Sinninghe Damsté *et al.*, 2000; Schouten *et al.*, 2007a; Weijers *et al.*, 2006)。近年来,这类化合物因其独特的结构和生物化学性质成为生物地球化学研究的热点之一,被广泛检测于海洋(Menzel *et al.*, 2004; Sinninghe Damsté *et al.*, 2002; Schouten *et al.*, 2002)、湖泊(Sinninghe Damsté *et al.*, 2009)、土壤(Peterse *et al.*, 2009; Sinninghe Damsté *et al.*, 2008; Weijers *et al.*, 2007a)、泥火山(Stadnitskaia *et al.*, 2007)、冷泉(Gontharet *et al.*, 2009; Pancost *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2003)和热液(Schouten *et al.*, 2003)

等各种环境中。过去认为 GDGTs 只存在于嗜热古菌中,最新的研究表明 GDGTs 也广泛存在于土壤、海洋和湖泊等环境的非嗜热泉古菌和厌氧细菌中(Kim *et al.*, 2009a; Schouten *et al.*, 2007b; Sinninghe Damsté *et al.*, 2008, 2009)。

不同生态环境其 GDGTs 组成特征不同。在海洋环境中, GDGTs 主要由类异戊二烯 GDGTs 组成。但极端海洋环境和正常海洋环境,其 GDGTs 的组成仍然存在差异。在正常海洋环境中,常以泉古菌醇(Crenarchaeol, GDGT)为主。在表层海水温度(sea surface temperature, SST)低于 20 的水域,其海洋沉积物中 GDGT 可占总 GDGTs 的 46%(Schouten *et al.*,

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目, KZCX2-YW-JC103 号; 中国科学院广州地球化学研究所人才基金项目, GIGRC-09-02 号; 国家自然科学基金项目, 40976025; 国际海底区域研究开发“十一五”项目“深海生物地球化学过程在地质中的记录”, DYXM-115-02-4-04 号。陈固魁, E-mail: cgkui2002@163.com

通讯作者: 胡建芳, 博士, E-mail: hujf@gig.ac.cn

收稿日期: 2010-02-01, 收修改稿日期: 2011-03-08

2000), 如南极水域, 其表层沉积物中的 GDGTs 几乎完全由 GDGT 和 组成(Schouten *et al.*, 2002); 在 SST 达 26°C 的水域, GDGT 可占总 GDGTs 的 60% (Ingalls *et al.*, 2006)。在极端海洋环境, 如冷泉和一些气水化合物产生地, 原地产甲烷古菌的丰度高, 使得 GDGT 为主要的 GDGTs 化合物(Schouten *et al.*, 2007a)。同时因环境温度较低, 古菌合成的类异戊二烯 GDGTs 含环戊烷(cyclopentanemioieties)个数少, 因此, 冷泉地区类异戊二烯 GDGTs 主要以 GDGT, GDGT 和 GDGT 为主(Gontharet *et al.*, 2009; Pancost *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2003)。与冷泉区相比, 热液地区, 因环境温度相对较高, 其类异戊二烯 GDGTs 中 GDGT 的相对含量增加 (Schouten *et al.*, 2003)。陆地土壤和泥炭中的 GDGTs 主要以支链 GDGTs α , α 和 α 为主(Sinninghe Damsté *et al.*, 2008; Weijers *et al.*, 2004, 2007a)。在湖泊环境中, 因非嗜热泉古菌的存在, 其类异戊二烯 GDGTs 以 GDGT 为主(Sinninghe Damsté *et al.*, 2009)。同时, 湖泊容易接受陆源 GDGTs 的输入, 因此也常存在支链 GDGTs。在陆地热泉地区, 其 GDGTs 的组成特征因微生态环境的不同表现出不同的分布特征, 如美国 Nevada 和 California 的热泉, 其菌席中检测到的 GDGTs 都以 GDGT 和 GDGT 为主(Pearson *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2006), 而黄石国家公园热泉的微生物垫和沉积物则以 GDGT 和 GDGT 为主, GDGT 相对含量极低(Schouten *et al.*, 2007 a)。

近年来, 深海热液地区因其独特的极端生化环境而成为海洋科学界最前沿、最焦点的研究领域(于增慧等, 2010)。GDGTs 已经被广泛应用到海洋环境研究中(Forster *et al.*, 2007; Hofmann *et al.*, 2008; Huguet *et al.*, 2006a; Schouten *et al.*, 2007c; Sluijs *et al.*, 2006; Weijers *et al.*, 2007b; 2009; Zachos *et al.*, 2006), 但目前深海(热液)沉积物中有关 GDGTs 的研究非常有限。本文根据深海(劳盆地东劳盆地扩张中心非/热液地区)表层沉积物中的 GDGTs 分布与组成特征, 探讨了古菌/细菌对其沉积有机质的贡献, 以及热液活动对生物地球化学记录的影响和制约。

1 样品和实验

1.1 样品采集

劳盆地(Lau Basin)地处汤加岛以西, 是一个位于热带南太平洋的半封闭型海底盆地, 发育于 Coville-Lau 洋脊和 Tonga-Kermadec 洋脊之间, 是首个被认为属于弧后盆地的年轻海底盆地, 盆地中发育有许多正在活动的低温和高温热液喷口。在劳盆地东部, 热液喷口多沿东部劳盆地扩张中心分布。6 个已发现的热液场自北向南依次为: Klio Moana、Tow Cam、ABE、Tui Malila、Mariner、Vai Lili (图 1), 在这些热液场中, 除 Vai Lili 发育低温热液喷口(流体温度在 40—150°C), 其他热液场多发育高温热液喷口, 温度在 200°C 以上(Michael *et al.*, 2007; Vicki *et al.*, 2008)。同时, 因热液喷口流体中含大量的 H_2 和 H_2S , 故其 pH 值普遍很低 (Michael *et al.*, 2007), 如在 Vai Lili 热液场(25°C), 其喷口流体 pH 值为 2(Desbruyères *et al.*, 1994)。本研究的样品为 2007 年 5 月“大洋一号”科考船电视抓斗采样器沿着东劳扩张中心(ELSC)采集的部分表层沉积物。其中 TVG5-A、TVG6-b 采自 ELSC 北部火山构造控制形成的热液喷口及附近, TVG8 采自 Vai Lili 热液喷口, TVG9-1、TVG10-a 采自 Mariner 热液喷口附近。其余样品采自非热液区, 具体样品信息见表 1。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理 萃取方法参考了 Schouten 等 (2002) 的方法, 样品经冷冻干燥后磨匀, 依次用甲

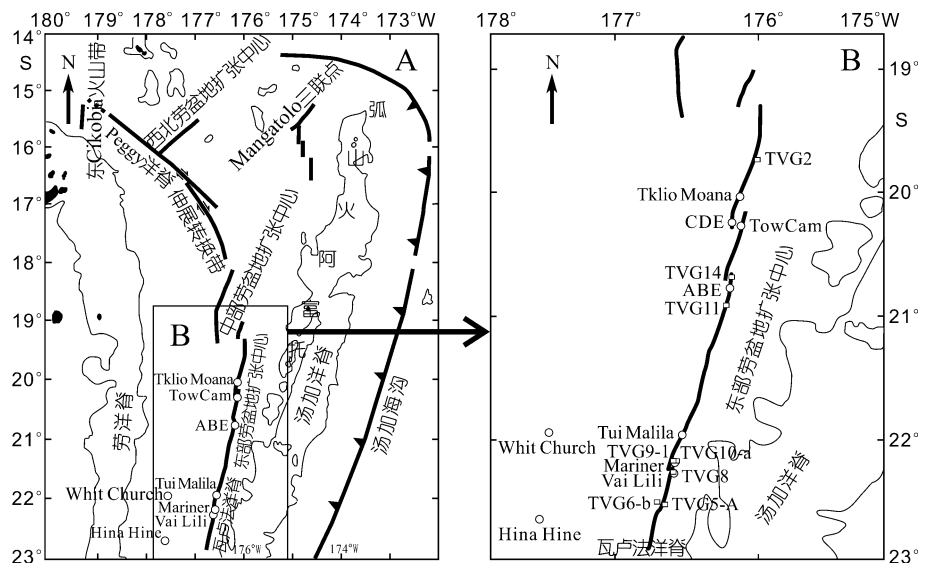


图 1 东劳扩张中心采样点分布图[底图来自于 Taylor 等(1996)]

Fig.1 Sampling stations in the Eastern Lau Spreading Center (after Taylor *et al.*, 1996)

表 1 本次研究样品的具体信息
Tab.1 Detailed information of samples in this study

样品号	经度(°W)	纬度(°S)	海水深度(m)	样品描述
TVG2	175.9562	19.7418	2350	硅钙质粘土、浮岩
TVG11	176.2410	20.9281	2254	含火山玻璃的钙质粘土
TVG14	176.1853	20.6854	2249	粘土质粉砂
TVG5-A	176.7109	22.5338	1885	粘土质粉砂, 含有蠕虫等大量生物以及热液硫化物/氧化物, 杂有火山玻璃碎屑, 有热液通道构造
TVG6-b	176.7156	22.5318	1868	大部分为火山玻璃, 少部分为含生物的热液硫化物/氧化物
TVG8	176.6072	22.2158	1744	含有白色菌席, 以及大量螺、贝的富铜热液硫化物/氧化物, 有热液通道构造
TVG9-1	176.6018	22.1813	1922	粉砂, 含热液硫化物/氧化物
TVG10-a	176.6017	22.1811	1921	粘土质粉砂, 含热液硫化物

注: 样品描述来自 DY19-4 航次现场报告

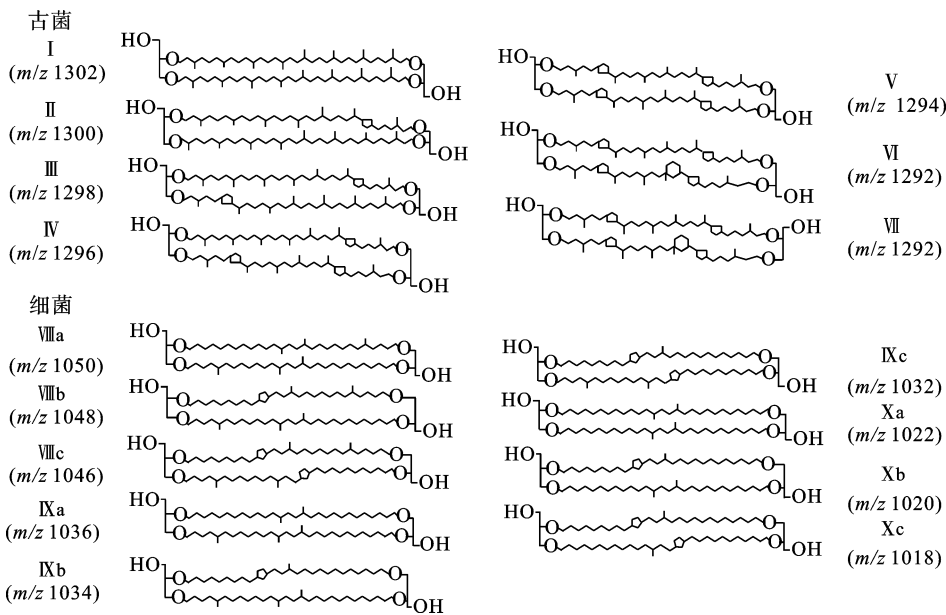


图 2 GDGTs 分子结构图(为泉古菌醇, 为泉古菌醇的重排异构体)

Fig.2 Molecular structures of GDGTs(is crenarchaeol, is regioisomer of crenarchaeol)

醇、甲醇/二氯甲烷 (1 : 1, V/V)、二氯甲烷超声萃取 (×3; 20 min/次)。分液萃取后得到总类脂抽提物。对总类脂抽提物进行硅胶/氧化铝色谱柱分离, 依次用正己烷、正己烷/乙酸乙酯混合溶液(85 : 15, V/V)、正己烷/乙酸乙酯混合溶液(3 : 1, V/V)、甲醇/二氯甲烷 (2 : 1, V/V)混合溶液淋洗, GDGTs 存在于第四个组分中。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 15 min, 取上清液用 0.45 μm 微孔滤膜进行过滤, 滤液浓缩后采用高效液相色谱-质谱(HPLC-APCI-MS)对完整的 GDGTs 进行分析。

1.2.2 仪器分析 GDGTs 分析仪器采用安捷伦 6410 QQQ LC/MS, 分析方法在 Hopmans 等(2000)的基础上加以改进。

(1) 色谱条件 色谱柱: 正相氰基柱(2.1 mm×150

mm, 3 μm; Alltech, USA), 柱温 30℃。流动相: A 相-正己烷, B 相-正丙醇, 在分析初始 0—5 min 内, 流动相保持为 99%A : 1%B, 在 5—45 min 内, 线性变化至 2%B, 流速为 0.2 ml/min。在每分析完一个样品, 采用 60%B, 0.2 ml/min 的流速冲洗色谱柱 15 min。

(2) 质谱条件 检测方法: APCI(+); 检测模式: 选择性离子检测 (SIM)。GDGTs 各化合物分子离子 [M+H]⁺ (m/z 1302, 1300, 1298, 1296, 1294, 1292, 1290, 1288, 1286, 1050, 1048, 1046, 1036, 1034, 1032, 1022, 1020, 1018), 其相对含量采用积分

面积比; 雾化气压: 60 Psi; 干燥气(N₂)流速和温度分别为: 5 L/min 和 200℃; 雾化温度: 300℃; 毛细管电压: 2500 V; 电晕电流: 5 μA。

2 结果和讨论

2.1 沉积物中类异戊二烯 GDGTs

GDGTs 按结构特征可分为类异戊二烯 GDGTs (I-)和支链 GDGTs(a- c)(分子结构如图 2)。

本研究的所有样品中均检测出了类异戊二烯 GDGTs, 且相对含量高(可占总 GDGTs 的 58.1%—93.4%, 见表 2 及图 3)。从单个类异戊二烯 GDGTs 的分布看, GDGT I 为所有 GDGTs 化合物的主要组分(除 TVG8 和 TVG9-1 以 GDGTI 为最高组分外, 表 2)。类异戊二烯类 GDGTs 被认为是古菌细胞质膜中

表 2 表层沉积物样品 GDGTs 的相对丰度(%)及 MBT 指标
Tab.2 The relative abundance% of GDGTs and MBT index in surface sediment samples

项目	样品							
	TVG2	TVG11	TVG14	TVG5-A	TVG6-b	TVG8①	TVG9-1	TVG10-a
GDGTs								
I	16.3	25.6	24.2	11.0	12.6	19.8	19.3	18.5
II	5.2	4.6	5.1	2.5	4.7	4.0	4.6	6.3
III	8.2	5.9	7.0	4.3	6.7	6.0	6.4	7.3
IV	0.9	0.7	0.8	0.5	0.9	1.0	4.0	1.5
V	17.9	14.1	15.3	15.3	9.9	7.7	12.6	18.8
VI	38.0	28.7	33.3	30.3	20.8	16.0	10.8	37.2
VII	4.5	3.7	4.1	3.2	2.7	3.6	1.2	3.8
总类异戊二烯 GDGTs	91.0	83.3	89.8	67.1	58.3	58.1	58.9	93.4
VIIIa	4.2	8.4	4.2	10.0	2.0	3.0	18.9	0.9
VIIIb	0.8	0.4	0.4	0.8	0.6	1.9	ND	1.1
VIIIc	ND	0.3	0.2	0.2	ND	1.2	ND	ND
IXa	1.9	2.7	1.5	6.8	1.5	3.5	10.8	1.3
IXb	0.6	1.1	1.1	4.7	13.0	15.5	1.4	1.0
IXc	ND	0.3	0.3	0.9	3.3	2.8	1.3	ND
Xa	1.1	2.4	1.5	7.1	2.0	5.5	4.5	1.3
Xb	0.4	0.7	0.7	1.6	13.6	5.9	1.7	1.0
Xc	ND	0.4	0.3	0.8	5.7	2.6	2.3	ND
总支链 GDGTs	9.0	16.7	10.2	32.9	41.7	41.9	40.9	6.6
MBT	0.17	0.20	0.25	0.30	0.34	0.33	0.20	0.35

注: ND 表示该化合物未检测到

特有的, 因此类异戊二烯 GDGTs 被作为古菌存在的生物标志化合物(Hopmans *et al*, 2000)。高含量的类异戊二烯 GDGTs 表明古菌输入占绝对的优势。最初认为古菌只能生长在高盐、高温(60°C 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), 但后来的研究发现在 0—30°C 的海洋和湖泊中也存在着大量的非嗜热泉古菌(Schouten *et al*, 2002; Sinnighe Damsté *et al*, 2002, 2009)。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 常含有 0—4 个环戊烷的 GDGTs -、GDGT 及其异构体 GDGT (Schouten *et al*, 2002), 而嗜热/超嗜热古菌却不能合成 GDGT 及其异构体 GDGT, 因此认为 GDGT 及其异构体 GDGT 是非嗜热泉古菌的特征标志物(Huguet *et al*, 2006b; Schouten *et al*, 2002, 2007a)。

沉积物中检测到的类异戊二烯 GDGTs 多以 GDGT

为主(10.8%—38.0%), 其次为 GDGT (11.8%—25.6%)和 GDGT (9.9%—18.8%)。高含量的 GDGT

, 表明沉积物中类异戊二烯 GDGTs 主要是来自于非嗜热泉古菌的贡献。GDGT 是最常见的一类化合物, 很多古菌甚至只生成该化合物 (Schouten *et al*,

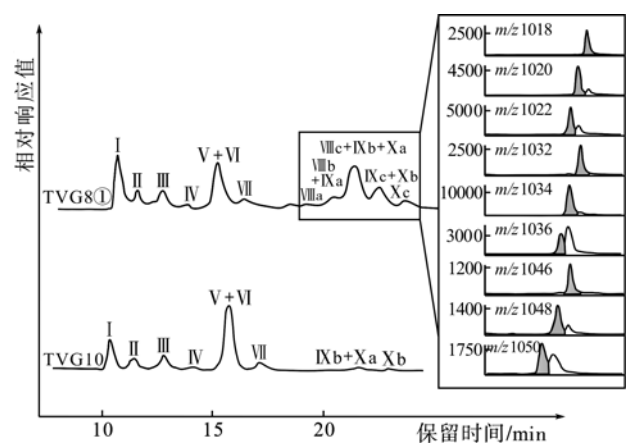


图 3 劳盆地典型表层沉积物样品中 GDGTs 的 HPLC/MS 色谱图和萃取离子色谱图

Fig.3 HPLC/MS base peak chromatograms and extracted ion chromatograms for GDGTs in typical surface sediment samples from Lau Basin

2007c)。样品 TVG8 和 TVG9-1 都以 GDGTI 为最主要的类异戊二烯 GDGT, 反映了古菌的贡献。具体到单个样品: TVG8 含白色菌席, 菌席中大量产/嗜甲烷古菌可能是其 GDGTI 主要母源。

研究表明, 非嗜热泉古菌以及(超)嗜热古菌中类异戊二烯 GDGTs 化合物环戊烷的个数随环境温度的升高而增加(Schouten *et al*, 2002; Weijers *et al*, 2006; Uda *et al*, 2001, 2004)。研究样品采自南太平洋低纬度地区, SST 较高, 非嗜热泉古菌生成的 GDGT 含量也相对较高, 因此, 样品中能够检测出相对较高的 GDGT。并且, 因多数样品取自于热液地区, 其环境温度相对较高, 原地(超)嗜热古菌也能够提供相对较高的 GDGT。但样品中没有检测出含 5—8 个环戊烷的类异戊二烯 GDGTs, 这同 Schouten 等(2003)在瓜伊马斯盆地(Guaymas basin)热液地区检测的类异戊二烯 GDGTs 结果相似。这可能是由于生成这些类异戊二烯 GDGTs 的古菌丰度非常低, 或者是因为样品所处的环境条件不适宜生成 5—8 个环戊烷的类异戊二烯 GDGTs(Schouten *et al*, 2007a)。

总体而言, 这些样品中类异戊二烯 GDGTs 的相对分布并未呈现出明显的差异。热液活动的特征难以从沉积记录的类异戊二烯 GDGTs 识别。这可能同两个因素相关: (1) 上层水体中非嗜热泉古菌的广泛存在, 对热液区沉积有机质有较高的贡献; (2) 热液的活动存在期次, 而研究所采集的样品代表的是多年沉积的结果。

2.2 沉积物中支链 GDGTs

本次研究的沉积物样品中都检测出了支链 GDGTs, 其含量占 GDGTs 总量的 6.6%—41.9%(表 2)。其中, 样品 TVG8 中支链 GDGTs 占 GDGTs 总量的比例最高, 样品 TVG10-a 中所占的比例最低。除 TVG6-b、TVG8、TVG10-a 外, 其余样品都以 GDGTVIIIa 为主要支链 GDGTs 组分。样品中支链 GDGTs 的相对百分含量同样品所处的位置密切相关: 在热液喷口附近的样品, 如 TVG5-A, TVG6-b, TVG8①和 TVG9-1, 其支链 GDGTs 的百分含量普遍较高(32.9%—41.9%), 而那些以粘土为主的非热液区样品, 如 TVG2、TVG11、TVG14, 支链 GDGTs 的百分含量相对较低(9.0%—16.7%)。

已有的研究发现支链 GDGTs 在土壤和泥炭中占绝对优势, 认为这类化合物主要来自土壤中的厌氧

细菌(Peterse *et al*, 2009; Sinninghe Damsté *et al*, 2000, 2008; Weijers *et al*, 2007a, 2009)。在近海、湖泊等环境中检测到的低丰度支链 GDGTs, 则认为来源于陆源(土壤)GDGTs 的输入 (Hopmans *et al*, 2004; Sinninghe Damsté *et al*, 2009)。新近的研究在陆地热泉地区的菌席和海洋泥火山也检测出了支链 GDGTs (Schouten *et al*, 2007a; Stadnitskaia *et al*, 2007), 认为前者是热泉周边土壤受雨水冲刷输入的(Schouten *et al*, 2007a), 而后者是古河流径流输入的(Stadnitskaia *et al*, 2007)。从本研究样品支链 GDGTs 相对含量随采样位置的相对变化特征来看: 热液喷口及附近样品 TVG5-A, TVG6-b, TVG8①、TVG9-1, 其支链 GDGTs 相对含量都较高(32.9%—41.9%); 非热液区样品(TVG2、TVG11 和 TVG14)支链 GDGTs 相对含量就低(表 2)。推测这些支链 GDGTs 主要来自采样区原地厌氧细菌的输入, 而不是陆源输入。因为: 1) 采样区距邻近的岛屿(汤加群岛和斐济岛)较远(>50 km), 陆源有机质只能通过风尘沉积方式少量进入采样区。这些样品的生物标志化合物特征显示其正构烷烃主要为 nC_{11} — nC_{24} , 缺乏陆源高等植物输入的高碳数正构烷烃(nC_{25} — nC_{31})(杨伟芳, 2009)¹⁾, 表明样品中陆源有机质的贡献极小; 2) 在洋区, GDGTs 类化合物主要通过海水的横向流动而迁移 (Kim *et al*, 2009b), 而不是通过风力搬运的。在热液喷口及附近存有大量的厌氧细菌, 尤其是在 50—90℃的环境下, 细菌类的生长占有优势。但采自热液区的样品 TVG10-a, 其支链 GDGTs 的相对含量却较低(6.6%), 推测是其处于温度 >90℃ 地带, 古菌占绝对优势(Reysenbach *et al*, 2002)。

支链 GDGTs 的甲基化指数——MBT(The methylation index of branched tetraeters)也支持样品中支链 GDGTs 主要来自厌氧细菌原地输入的观点($MBT = [Xa + Xb + Xc] / [VIIIa + VIIIb + VIIIc + IXa + IXb + IXc + Xa + Xb + Xc]$) (Weijers *et al*, 2007a)。前人的研究认为土壤中支链 GDGTs 结构中环戊烷的个数主要受土壤 pH 值影响, 而 MBT 则主要受当地年平均大气温度(MAT)的影响, 其次受土壤 pH 值影响 (Sinninghe Damsté *et al*, 2008; Weijers *et al*, 2007a)。即在相对高的 MAT 条件下, 支链 GDGTs 以 GDGT a 为主要化合物, 在相对低的 MAT 条件下, GDGT a 和 的相对含量增加(Weijers *et al*, 2007a)。但最近的研究发现, 在陆地热泉地区, MBT 指数

1) 杨伟芳, 2009. 不同海洋环境中沉积物脂类生物标志物的对比研究. 硕士学位论文. 北京:中国科学院研究生院, 37—40

主要是受热泉原位温度控制而受 pH 值影响较小(Peterse *et al*, 2009)。在本研究中, 非热液地区样品的支链 GDGTs 一致表现出以 GDGT a 为主的分布特征, 而热液地区样品中支链 GDGTs 则表现出不同的分布特征。这是因为热液喷口及周边地区存在一个温度和化学环境的梯度带, 不同地带, 其温度和pH值不同, 支链GDGTs的组成也不同。如样品 TVG6-b 和 TVG8, 处在相对高温和 低 pH 值环境中, 其支链 GDGTs 以 GDGT b 和 GDGT b 为主。样品中支链 GDGTs 随着离热液喷口的距离不同而表现出不同的分布特征, 证实了其主要来自厌氧细菌的原地输入的观点。同时, 结合样品 MBT 值对比发现(表 2), 热液地区样品的 MBT 值普遍高于非热液区样品(除样品 TVG9-1 的 MBT 值为 0.20 外), 表明 MBT 指数主要受原位温度(热液喷口存在与否)控制, 也进一步印证了厌氧细菌的原地输入的观点。

3 结论

在劳盆地东部扩张中心的表层沉积物样品中, 均检测出了类异戊二烯和支链 GDGTs。样品中的类异戊二烯 GDGTs 占总 GDGTs 的 58.1%—93.4%, 且都以 GDGT、GDGT 和 GDGT 为主要组分, 表明其 GDGTs 主要来源于古菌, 且非嗜热泉古菌占优势。热液活动记录难以从类异戊二烯 GDGTs 的分布特征来识别。支链 GDGTs 受热液活动影响明显, 热液地区样品的支链 GDGTs 占总 GDGTs 的百分比普遍较大, 且随着离热液喷口的距离不同而表现出不同的分布特征; 非热液区样品的支链 GDGTs 占总 GDGTs 的百分比较小, 且一致表现出以 GDGT a 为主要支链 GDGTs 的分布特征。这些特征都表明样品中支链 GDGTs 主要来源于原地厌氧细菌, 这进一步拓宽了支链 GDGTs 的分布范围。

参 考 文 献

于增慧, 杜同军, 翟世奎, 2010. 冲绳海槽中部热液活动区岩芯沉积物稀土元素地球化学特征. 海洋与湖沼, 41(5): 676—682
 Desbruyères D, Alayse-Danet A M, Ohta S, 1994. Deep-sea hydrothermal communities in Southwestern Pacific back-arc basins (the North Fiji and Lau Basin): Composition, micro-distribution and food web. Marine Geology, 116: 227—242
 Forster A, Schouten S, Baas M *et al*, 2007. Mid-Cretaceous (Albian-Santonian) sea surface temperature record of the tropical Atlantic Ocean. Geology, 35: 919—922
 Gontharet S, Stadnitskaia A, Bouloubassi I *et al*, 2009. Palaeo methane-seepage history traced by biomarker patterns in a carbonate crust, Nile deep-sea fan (Eastern Mediterranean

Sea). Marine Geology, 261: 105—113
 Hofmann P, Stusser I, Wagner T *et al*, 2008. Climate-ocean coupling off North-West Africa during the Lower Albian: The Oceanic Anoxic Event 1b. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 262: 157—165
 Hopmans E C, Schouten S, Pancost R D *et al*, 2000. Analysis of intact tetramer lipids in archaeal cell material and sediments by high performance liquid chromatography/atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. Rapid Commun. Mass Spectrom, 14: 585—589
 Hopmans E C, Weijers J W H, Schefuß E *et al*, 2004. A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids. Earth and Planetary Science Letters, 224: 107—116
 Huguet C, Kim J H, Damste J S S *et al*, 2006a. Reconstruction of sea surface temperature variations in the Arabian Sea over the last 23 kyr using organic proxies. Paleoceanography, 21: A3003-1-A3003-13
 Huguet C, Hopmans E C, Febo-Ayala W *et al*, 2006b. An improved method to determine the absolute abundance of glycerol dibiphytanyl glycerol tetraethers lipids. Organic Geochemistry, 37: 1036—1041
 Ingalls A E, Shah S R, Hansman R L *et al*, 2006. Quantifying archaeal community autotrophy in the mesopelagic ocean using natural radiocarbon. Proc Natl Acad Sci USA, 103: 6442—6447
 Kim J-H, Buscail R, Bourrin F *et al*, 2009a. Transport and depositional process of soil organic matter during wet and dry storms on the Têt inner shelf (NW Mediterranean). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 273: 228—238
 Kim J-H, Crosta X, Michel E *et al*, 2009b. Impact of lateral transport on organic proxies in the southern ocean. Quaternary Research, 71: 246—250
 Menzel D, Hopmans E C, Schouten S *et al*, 2006. Membrane tetraether lipids of planktonic Crenarchaeota in Pliocene sapropels of the eastern Mediterranean Sea. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 239: 1—15
 Michael P, Seewald J, 2007. Focus On: Studies at the Lau Basin. Ridge 2000 events, 2(1): 11—21
 Pancost R D, Hopmans E C, Sinninghe Damste J S *et al*, 2001. Archaeal lipids in Mediterranean Cold Seeps: Molecular proxies for anaerobic methane oxidation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 65: 1611—1627
 Parkes R J, Cragg B A, Bale S *et al*, 1994. Deep Bacterial Biosphere in Pacific-Ocean Sediments. Nature, 371: 410—413
 Pearson A, Huang Z, Ingalls A E *et al*, 2004. Nonmarine crenarchaeol in Nevada hot springs. Appl Environ Microbiol, 70: 5229—5237
 Peterse F, Schouten S, van der Meer J *et al*, 2009. Distribution of branched tetraether lipids in geothermally heated soils: Im-

- plications for the MBT/CBT temperature proxy. *Organic Geochemistry*, 40: 201—205
- Prieur D, 1997. Microbiology of deep-sea hydrothermal vent. *Marine Biotechnology*, 15: 242—244
- Reysenbach A, LShock E, 2002. Merging genomes with geochemistry in hydrothermal ecosystems. *Science*, 296: 1077—1082
- Schouten S, Hopmans E C, Pancost R D *et al*, 2000. Widespread occurrence of structurally diverse tetraether membrane lipids: evidence for the ubiquitous presence of low-temperature relatives of hyperthermophiles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 97: 14421—14426
- Schouten S, Hopmans E C, Schefuß E *et al*, 2002. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new organic proxy for reconstructing ancient sea water temperatures? *Earth and Planetary Science Letters*, 204: 265—274
- Schouten S, Wakeham S G, Hopmans E C *et al*, 2003. Biogeochemical evidence that thermophilic Archaea mediate the anaerobic oxidation of methane. *Appl Environ Microbiol*, 69: 1680—1686
- Schouten S, Meer van der M T J, Hopmans E C *et al*, 2007a. Archaeal and bacterial glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids in hot springs of Yellowstone National Park. *Appl Environ Microbiol*, 73: 6181—6191
- Schouten S, Ossebaar J, Brummer G J *et al*, 2007b. Transport of terrestrial organic matter to the deep North Atlantic Ocean by ice rafting. *Organic Geochemistry*, 38: 1161—1168
- Schouten S, Forster A, Panoto F E *et al*, 2007c. Towards calibration of the TEX₈₆ palaeothermometer for tropical sea surface temperatures in ancient greenhouse worlds. *Organic Geochemistry*, 38: 1537—1546
- Sinninghe Damsté J S, Hopmans E C, Pancost R D *et al*, 2000. Newly discovered non-isoprenoid glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids in sediments. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1683—1684, DOI: 10.1039/b004517i
- Sinninghe Damsté J S, Hopmans E C, Schouten S *et al*, 2002. Crenarchaeol: the characteristic glycerol dibiphytanyl glycerol tetraether membrane lipid of cosmopolitan pelagic Crenarchaeota. *J Lipid Res*, 43: 1641—1651
- Sinninghe Damsté J S, Ossebaar J, Schouten S *et al*, 2008. Altitudinal shifts in the branched tetraether lipid distribution in soil from Mt. Kilimanjaro (Tanzania): Implications for the MBT/CBT continental palaeothermometer. *Organic Geochemistry*, 39: 1072—1076
- Sinninghe Damsté J S, Ossebaar J, Abbas B *et al*, 2009. Fluxes and distribution of tetraether lipids in an equatorial African lake: Constraints on the application of the TEX₈₆ palaeothermometer and BIT index in lacustrine settings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(14): 4232—4249
- Sluijs A, Schouten S, Pagani M *et al*, 2006. Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Palaeocene/Eocene thermal maximum. *Nature*, 441: 610—613
- Stadnitskaia A, Blinova V, Ivanov M K *et al*, 2007. Lipid biomarkers in sediments of mud volcanoes from the Sorokin Trough, NE Black Sea: Probable source strata for the erupted material. *Organic Geochemistry*, 38: 67—83
- Taylor B, Zellmer K, Martinez F *et al*, 1996. Sea-floor spreading in the Lau back-arc basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 144: 35—40
- Uda I, Sugai A, Itoh Y H *et al*, 2001. Variation on molecular species of polar lipids from *Thermoplasma acidophilum* depends on growth temperature. *Lipids*, 36: 103—105
- Uda I, Sugai A, Itoh Y H *et al*, 2004. Variation in molecular species of core lipids from the order *Thermoplasmatales* strains depends on growth temperature. *J Oleo Sci*, 53: 399—404
- Vicki L F, Margaret K T, Suzanne M C *et al*, 2008. Variable morphologic expression of volcanic, tectonic, and hydrothermal process at six hydrothermal vent fields in the Lau back-arc basin. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(7): 1525—2027
- Weijers J W H, Schouten S, van der Linden M *et al*, 2004. Water table related variations in the abundance of intact archaeal membrane lipids in a Swedish peat bog. *FEMS Microbiology Letters*, 239: 51—56
- Weijers J W H, Schouten S, Hopmans E C *et al*, 2006. Membrane lipids of mesophilic anaerobic bacteria thriving in peats have typical archaeal traits. *Environmental Microbiology*, 8: 648—657
- Weijers J W H, Schouten S, Donker van den J C *et al*, 2007a. Environmental controls on bacterial tetraether membrane lipid distribution in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 703—713
- Weijers J W H, Schouten S, Sluijs A *et al*, 2007b. Warm arctic continents during the Palaeocene-Eocene thermal maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, 261: 230—238
- Weijers J W H, Schouten S, Schefuß B E *et al*, 2009. Disentangling marine, soil and plant organic carbon contributions to continental margin sediments: A multi-proxy approach in a 20,000 year sediment record from the Congo deep-sea fan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 119—132
- Zachos J C, Schouten S, Bohaty S *et al*, 2006. Extreme warming of mid-latitude coastal ocean during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Inferences from TEX₈₆ and isotope data. *Geology*, 34: 737—740
- Zhang C L, Pancost R D, Sassen R *et al*, 2003. Archaeal lipid biomarkers and isotopic evidence of anaerobic methane oxidation associated with gas hydrates in the Gulf of Mexico. *Organic Geochemistry*, 34: 827—836
- Zhang C L, Pearson A, Li Y L *et al*, 2006. Thermophilic temperature optimum for crenarchaeol synthesis and its implication for archaeal evolution. *Appl Environ Microbiol*, 72: 4419—4422

GLYCEROL DIALKYL GLYCEROL TETRAETHER LIPIDS COMPOSITION AND ITS BIOGEOCHEMICAL IMPLICATIONS OF SURFACE SEDIMENTS FROM THE EASTERN LAU SPREADING CENTER, SOUTH PACIFIC OCEAN

CHEN Gu-Kui^{1,2}, HU Jian-Fang¹, YANG Qun-Hui³, PENG Ping-An¹

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049; 3. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract The glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) lipid composition was determined in surface sediments from the Eastern Lau Spreading Center (ELSC), South Pacific Ocean. Isoprenoid and branched GDGTs were detected in all the samples. The relative contents of isoprenoid GDGTs were in the range of 58.1%—94.3% of total GDGTs. GDGT (crenarchaeol), GDGT and GDGT are the most abundant, suggesting significant contribution of archaea with the nonthermophilic crenarchaea being the dominant strain. The isoprenoid GDGTs composition did not record the hydrothermal activities as high percentage of GDGTs was derived from nonthermophilic crenarchaea. However, the branched GDGTs might record the hydrothermal activities. Relatively higher percentage (32.9%—41.9%) of branched GDGTs occurred in the samples taken from hydrothermal vent field, and relatively lower percentage (9.0%—16.7%) of branched GDGTs occurred in the samples taken from non-hydrothermal vent field. GDGT a was the most abundant branched GDGTs in the samples taken from non-hydrothermal vent field. These patterns indicate that the branched GDGTs were derived from some anaerobic bacteria *in situ*, which supports the conclusion that branched GDGTs occurred not only in soils and peat bogs, but also hydrothermal vent field.

Key words Archaea, Bacteria, GDGTs, Hydrothermal vent