



东太平洋海隆13° N附近沉积物中类脂化合物的分布特征及其对热液活动的指示

樊俊宁, 曾志刚, 朱博文, 齐海燕

**Distribution of lipid compounds in the sediments of the East Pacific Rise near 13°N and its implications for hydrothermal activity**

FAN Junning, ZENG Zhigang, ZHU Bowen, and QI Haiyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021010201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究](#)

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12

[南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示](#)

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

[莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析](#)

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

[新西兰Hikurangi俯冲带沉积物成岩作用示踪研究：来自孔隙流体Sr同位素证据](#)

A tracing study of sediment diagenesis in the Hikurangi subduction zone, New Zealand: Evidence from Sr isotope of pore fluid

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 115

[海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望](#)

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58

[珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示](#)

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

樊俊宁, 曾志刚, 朱博文, 等. 东太平洋海隆 13°N 附近沉积物中类脂化合物的分布特征及其对热液活动的指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 26-36.

FAN Junning, ZENG Zhigang, ZHU Bowen, et al. Distribution of lipid compounds in the sediments of the East Pacific Rise near 13°N and its implications for hydrothermal activity[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 26-36.

# 东太平洋海隆 13°N 附近沉积物中类脂化合物的分布特征及其对热液活动的指示

樊俊宁<sup>1,2,3</sup>, 曾志刚<sup>1,2,3</sup>, 朱博文<sup>1,2,3</sup>, 齐海燕<sup>1,2,4</sup>

1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266061
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071

**摘要:** 深海热液区的热液物质喷发扩散会对周围海底的沉积物产生影响, 研究沉积物中类脂物有助于进一步了解热液活动对其产生的影响。对东太平洋海隆西翼 13°N 附近 E271 和 E272 站位沉积物中的正构烷烃和脂肪酸进行了气相色谱-质谱 (GC-MS) 分析。在两个站位的沉积物中检测到链长 C<sub>11</sub>—C<sub>35</sub> 的正构烷烃, 其以双峰型分布为主, 其中短链烷烃和长链烷烃分别指示了海洋细菌等微生物、陆源高等植物和热液物质的输入, 且陆源输入主要来自大气输送的美洲物质。进一步, 通过分析沉积物中正构烷烃的含量及组成, 结果表明 E272 站位的沉积物经历了早期成岩作用。在两站位的沉积物中均检测到 32 种脂肪酸, 其链长为 C<sub>8</sub>—C<sub>24</sub> 不等, 总脂肪酸含量分别为 93.55 和 50.71~87.05 μg/g。同时, 通过探讨沉积物中特征脂肪酸的组成和分布证实其受到了热液活动的影响。

**关键词:** 正构烷烃; 脂肪酸; 成岩作用; 热液活动

中图分类号: P736.4 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021010201

## Distribution of lipid compounds in the sediments of the East Pacific Rise near 13°N and its implications for hydrothermal activity

FAN Junning<sup>1,2,3</sup>, ZENG Zhigang<sup>1,2,3</sup>, ZHU Bowen<sup>1,2,3</sup>, QI Haiyan<sup>1,2,4</sup>

1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of sciences, Qingdao 266071, China

**Abstract:** The eruption and diffusion of hydrothermal materials will affect the surrounding sediments, and the study on the lipid in the sediments affected by hydrothermal activity is helpful to understand the influence of hydrothermal activity on sediments. In this research, N-alkanes and fatty acids in the sediments from E271 and E272 stations on the west flank of the East Pacific Rise near 13°N are analyzed by gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS). C<sub>11</sub>—C<sub>35</sub> N-alkanes, which are mainly distributed in a bimodal pattern, are detected in the sediments, in which short-chain alkanes and long-chain alkanes indicate the inputs of marine bacteria, terrestrial higher plants and materials from hydrothermal activities, respectively. Terrestrial materials are mainly from the American continent transported by wind. Furthermore, the composition and distribution of n-alkanes in the sediments suggest that the sediments of E272 station have experienced early diagenesis. 32 types of fatty acids are detected in the sediments from the stations of E271 and E272, which ranged from C<sub>8</sub> to C<sub>24</sub>, and the total fatty acid contents of the two stations are 93.55 and 50.71~87.05 μg/g, respectively. The composition and distribution of characteristic fatty acids in the

**资助项目:** 国家自然科学基金“西太平洋俯冲体系中岩浆活动及其对热液物质供给的制约”(91958213); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目“冲绳海槽热液活动成矿机理及其沉积效应”(133137KYSB20170003); 大洋“十三五”深海资源潜力评估项目“海底多金属硫化物及金属软泥的成矿机理”(DY135-G2-1-02); 泰山学者工程专项(ts201511061); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理”(2013CB429700)

**作者简介:** 樊俊宁 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事海底热液沉积物有机地球化学研究, E-mail: fanjunningda@126.com

**通讯作者:** 曾志刚 (1968—), 男, 研究员, 主要从事海底热液活动研究, E-mail: zgzeng@ms.qdio.ac.cn

**收稿日期:** 2021-01-02; **改回日期:** 2021-03-17. 蔡秋蓉编辑

sediments exhibit the characteristics of hydrothermal input, indicating that the sediments have been affected by hydrothermal activities.

**Key words:** N-alkanes; fatty acids; diagenesis; hydrothermal activity

早在 20 世纪 60 年代, 人们就在东太平洋海隆附近发现了富含金属的海底沉积物, 并采集了含金属软泥, 获得了热液活动存在的直接证据<sup>[1-2]</sup>。随后, 1979 年人们通过“Alvin”号载人潜器对东太平洋海隆 21°N 正在活动的热液喷口进行了潜水观察和采样<sup>[3]</sup>, 这标志着对热液活动的调查研究进入了潜水观察和采样研究的新阶段<sup>[1, 4]</sup>。接着, 1981 年 Clipperton 航次, 科学家首次用拖网在东太平洋海隆 13°N 附近采到硫化物样品。2003 年和 2005 年中国科学家也先后在东太平洋海隆 13°N 附近开展了多次海底热液活动调查工作<sup>[2]</sup>。

以往的调查研究表明东太平洋海隆 13°N 是一个典型的快速扩张洋中脊, 扩张速率为 10~11 cm/a, 该处洋脊的热液活动十分密集, 仅在东太平洋海隆 13°N 附近 35 km 长的洋脊段上分布的深海热液点就达 149 处<sup>[1, 5-6]</sup>。深海热液点不同于一般的深海环境, 其具有高温、高压、高重金属浓度、低 pH 值等特征。同时, 热液区的喷口流体可上升形成热液柱, 其携带的热液物质上升后扩散, 扩散的热液物质沉降下来会对海底沉积物产生影响<sup>[1, 7-8]</sup>。科学家已对受热液物质沉降影响的沉积物, 包括对东太平洋海隆 13°N 附近具高含量 Fe、Mn 元素的沉积物<sup>[9-12]</sup>, 进行了元素地球化学和有机地球化学等多方面的研究<sup>[1-2, 13-15]</sup>。尽管如此, 目前人们对于受热液活动影响的沉积物研究较少, 对受热液活动影响的沉积物中有机质的分布特点及其沉积环境的研究则知之更少<sup>[2, 8-10]</sup>。

类脂化合物是一类来源和性质均较稳定的有机生物标志物, 通过研究其组成和分布特征可反映地质环境演化和表征物质来源<sup>[16]</sup>。正构烷烃和脂肪酸作为常用的类脂物生物标志物, 广泛存在于海洋沉积物的有机质中<sup>[16]</sup>。众多海洋和陆地生物能够合成正构烷烃, 因此, 沉积物中正构烷烃往往包含了其原始母质信息<sup>[17]</sup>, 可广泛地用于指示沉积物中有机质的来源和沉积过程<sup>[18-20]</sup>。脂肪酸是构成生物体的重要成分之一, 可特异性指示特定生物的存在, 通常能示踪有机质的来源, 反映沉积环境<sup>[21-24]</sup>, 且二者对原始生物信息及不同生境均有很好的解析作用, 在近海河口、深海物质来源、成岩作用、古海洋学等方面有很好的指示作用<sup>[25-26]</sup>。特别是二者对于特殊的沉积环境, 如热液环境也具有很好的指示作用<sup>[13-15]</sup>。

本文对东太平洋海隆西翼 13°N 附近 E271 和 E272 站位沉积物中正构烷烃和脂肪酸的含量及组成特征进行了分析, 研究了沉积物中有机质的物质来源和沉积过程, 并对沉积物中有机质受热液活动的影响情况进行了探讨。

## 1 实验方法与数据

### 1.1 样品采集

2003 年 9—11 月, 中国大洋协会 DY105-12、14 航次第六航段开展了东太平洋海隆热液硫化物调查工作, 并在该海隆西翼 13°N 附近 E271、E272 站位取得了沉积物样品(图 1)。其中, E271(12°39'52"N、104°08'12"W)站位水深 3 085 m, 距洋中脊轴部 25 km, 在 E271 站位采用箱式取样器取得沉积物表层样品; E272(12°36'39"N、104°19'28"W)站位水深 3 191 m, 距洋中脊轴部 45 km。在 E272 站位的小箱体中插管取得沉积物柱状样, 样长为 27 cm, 颜色分层, 上部为红褐色, 下部为灰绿色。样品采集后于 -20 °C 冷冻保存。取 E271 表层(0~5 cm)沉积物样品 1 个, 将 E272 柱状沉积物样品每 2 cm 分层取样, 共取得 13 个层位的沉积物样品, 标号命名为 272-1 至 272-13。本研究合计共取 14 个样品。样品分析在中国科学院海洋研究所的分析测试中心完成。

### 1.2 样品分析

沉积物样品中正构烷烃的提取采用超声提取法<sup>[28]</sup>。冷冻保存的沉积物样品经过冷冻干燥后进行研磨, 称取研磨后的样品 5 g(干重)于玻璃瓶中, 加入二氯甲烷: 甲醇(CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>: CH<sub>3</sub>OH)体积比为 2: 1 的混合液, 将其充分混合, 经过 20 min 超声、10 min 静置分离, 转移全部上清液于 100 mL 圆底玻璃瓶中, 重复 2 次上述提取操作步骤, 将上清液合并, 氮吹浓缩至干, 后用 0.2 mL 正己烷(C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>)溶解, 吸取液体至色谱瓶中待测。

采用气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890A/5975C)进行分析, 色谱柱选用 HP-5MS 弹性石英毛细管柱(30 m×250 μm×0.25 μm)<sup>[29]</sup>; 程序升温: 60 °C 保持 2 min, 以 6 °C/min 的速度升至 300 °C, 保持 16 min; 流速为 1.0 mL/min, 进口温度为 260 °C, 进样量为 1 μL。

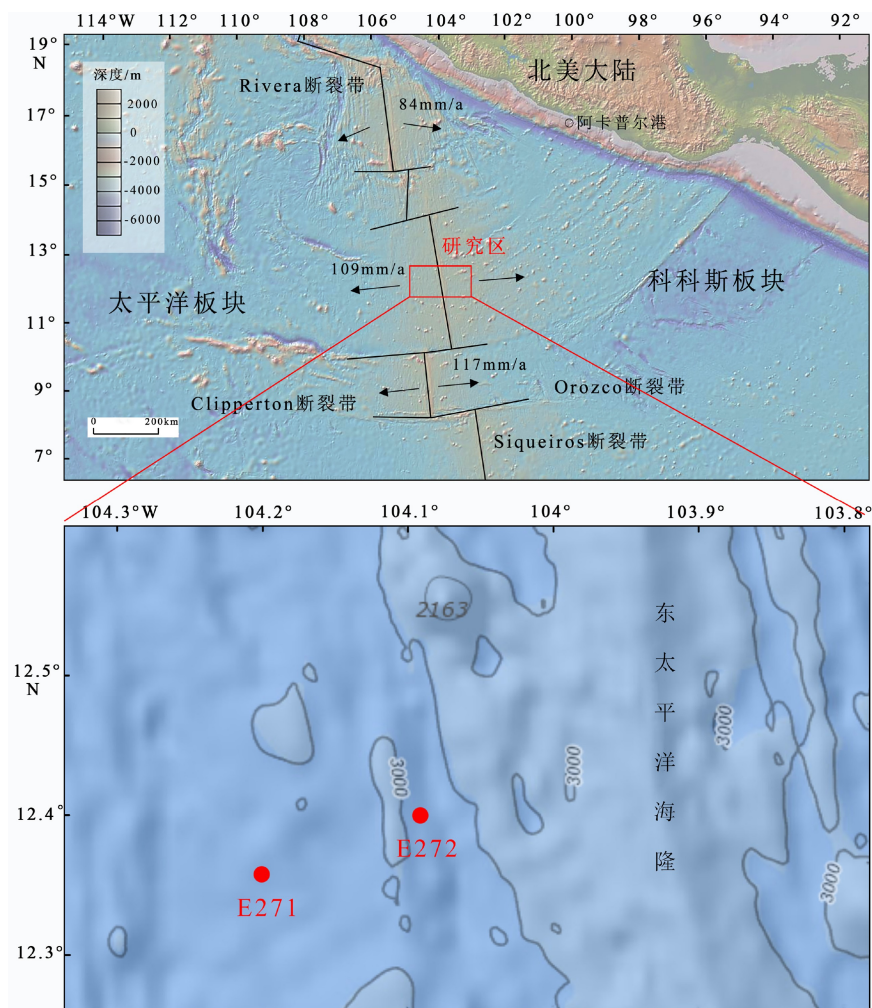


图1 研究区地质图

扩张速率引自文献[27]。

Fig.1 Geological map of study area

The spreading rate is quoted from reference[27].

质谱条件: EI 离子源, 离子源温度为 230 °C, 发射电子能量为 70 eV, 接口温度为 280 °C, 选择离子扫描模式(SIM)采集, 定性离子为  $m/z$  57、71 和 85, 其中  $m/z$  57 为定量离子。

沉积物样品中脂肪酸前处理采用超声提取, 酸催化酯化法<sup>[30-31]</sup>。用二氯甲烷将浓缩液转移至 15 mL 的细胞瓶中, 氮吹浓缩至干, 接着加入 5 mL 硫酸/甲醇溶液(2 mol/L), 于 80 °C 水浴甲酯化 4 h, 冷却, 加入饱和氯化钠溶液, 用 5 mL 正己烷进行萃取 2 次, 将萃取液氮吹浓缩至干, 用 1 mL 正己烷溶解定容, 待测。

脂肪酸的检测采用气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890A/5975C)进行分析, 选用火焰离子化检测器(FID), FID 温度为 280 °C; 色谱条件: 色谱柱选用 DB-FFAP 石英毛细管柱(30 m×250 μm×0.25 μm); 程序升温: 50 °C 保持 3 min, 以 10 °C/min 的速度升

至 230 °C, 保持 15 min; 进样口温度为 220 °C, 进样体积为 1.0 μL。

## 2 结果

### 2.1 正构烷烃含量及分布

在 E271 站位检测到链长  $C_{11}$ — $C_{40}$  的正构烷烃, 其表层沉积物中正构烷烃含量为 2.21 μg/g, 呈双峰型分布(图 2)。在 E272 站位的沉积物样品中主要检测到链长  $C_{11}$ — $C_{35}$  的正构烷烃, 部分层位(如 4~6 cm)检测到  $C_{11}$ — $C_{40}$  的正构烷烃(图 2)。各层位沉积物中正构烷烃的含量为 0.85~2.95 μg/g, 变化较大, 均值为 1.59 μg/g。其中, 4~6 cm 层位中沉积物的正构烷烃含量最高(表 1, 表 2)。E272 柱状样品各层位沉积物的正构烷烃分布不同, 主要以无

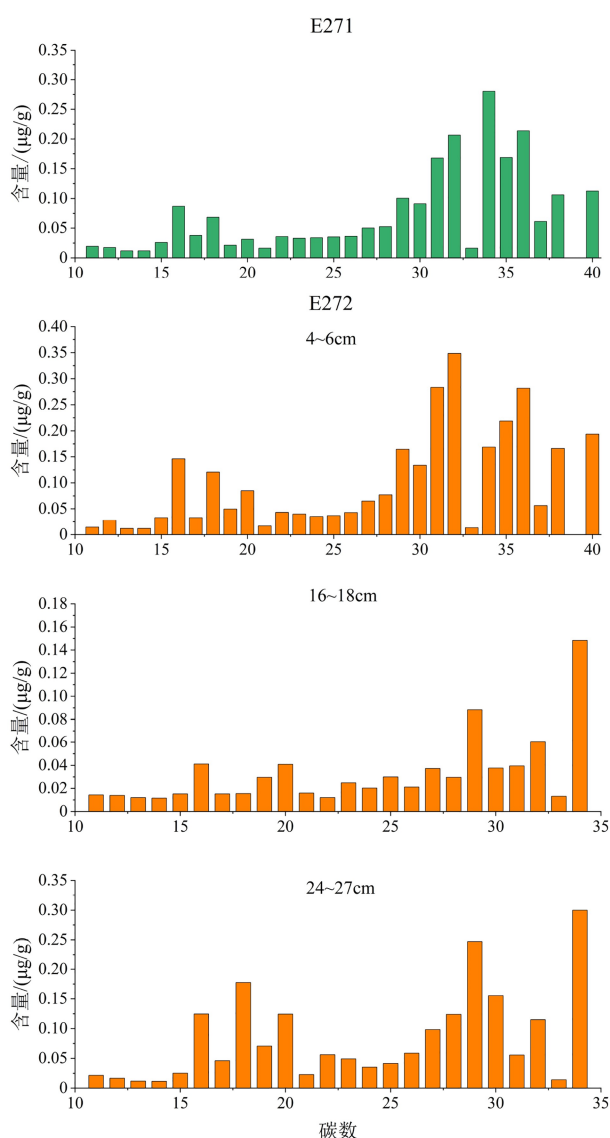


图 2 E271、E272 站位沉积物中典型正构烷烃各链长分布图  
Fig.2 Distribution patterns of chain lengths of typical n-alkanes in sediments from the E271 and E272 stations

明显单双峰型分布(图 2 中 16~18 cm 层位)和明显的双峰型分布(图 2 中 24~27 cm 层位)为主,且以双峰型分布的层位较多。

表 1 对本研究所采用的正构烷烃的相关参数进行了简单介绍,据此分别计算了 E271 和 E272 站位中沉积物的前峰群和后峰群 CPI,得到 E271 沉积物的前峰群  $CPI_1$  为 0.97,后峰群  $CPI_2$  为 1.29。E272 各层位沉积物的前峰群  $CPI_1$  多小于 1,为 0.68~1.7,后峰群各层位  $CPI_2$  则变化较大,为 0.47~2.88,多数  $CPI_2$  为 1~2。两站位沉积物的前峰群多具明显的偶碳优势,后峰群整体上不具明显的奇偶碳优势。计算 E271 站位沉积物的平均链长 ACL 为 29.64, E272 各层位沉积物的 ACL 为 24.06~29.62,变化不大。E271 站位沉积物的  $\Sigma T/\Sigma M$  为 4.18, E272 各层位沉积物的  $\Sigma T/\Sigma M$  为 1.14~3.77,变化较大。

## 2.2 脂肪酸含量及分布

在 E271 站位的表层沉积物中主要测定得到 32 种脂肪酸,链长为  $C_8$ — $C_{24}$  不等。总脂肪酸  $\Sigma TFA$  的含量为 93.55  $\mu g/g$ , E271 站位沉积物的  $\Sigma TFA$  组成以饱和脂肪酸(50.59%)和单不饱和脂肪酸(36.62%)为主,多不饱和脂肪酸(12.78%)相对较少(表 2)。

对 E272 站位沉积柱状样进行测定,主要得到 32 种脂肪酸,链长为  $C_8$ — $C_{24}$  不等。E272 站位沉积物中  $\Sigma TFA$  的含量随深度变化较大,为 50.71~87.05  $\mu g/g$ (表 2)。E272 站位沉积物中  $\Sigma TFA$  组成以饱和脂肪酸(44.74%~68.98%)和单不饱和脂肪酸为主(21.54%~43.59%),多不饱和脂肪酸(9.48%~13.37%)含量相对较少(图 3)。

研究区两站位沉积物中脂肪酸的分布均呈现明显的偶碳优势。饱和脂肪酸主要包括  $C_{16}:0$ ,  $C_{18}:0$ , 单不饱和脂肪酸主要包括  $C_{16}:1$ ,  $C_{18}:1$ ,  $C_{20}:1n9$  和  $C_{22}:1n9$ , 多不饱和脂肪酸主要包括  $C_{18}:2n6$ ,  $C_{20}:5n3$ ,  $C_{22}:6n3$  等。整体上各层位沉积物中的脂肪酸呈现双峰型分布模式。低碳数脂肪酸主要以  $C_{16}:0$  和  $C_{18}:0$  含量较高为特点,高碳数脂肪酸主要以  $C_{20}:5n3$ ,  $C_{22}:6n3$  和  $C_{22}:$

表 1 沉积物中正构烷烃的参数

Table 1 Parameters of n-alkanes in sediments

正构烷烃参数	计算方法	指示意义
$CPI_1$	$CPI_1 = 1/2 (\Sigma C_{17-21}(\text{奇}) / \Sigma C_{16-20}(\text{偶}) + \Sigma C_{17-21}(\text{奇}) / \Sigma C_{18-22}(\text{偶}))$	$CPI_1$ 、 $CPI_2$ 、 $CPI$ 分别指示前峰群、后峰群和整体正构烷烃的碳优势,进一步指示沉积物来源。
$CPI_2$	$CPI_2 = 1/2 (\Sigma C_{29-35}(\text{奇}) / \Sigma C_{28-34}(\text{偶}) + \Sigma C_{29-35}(\text{奇}) / \Sigma C_{30-36}(\text{偶}))$	
$CPI$	$CPI = 1/2 (\Sigma C_{17-35}(\text{奇}) / \Sigma C_{16-34}(\text{偶}) + \Sigma C_{17-35}(\text{奇}) / \Sigma C_{18-36}(\text{偶}))$	
ACL <sup>[18-20]</sup> (平均链长)	$ACL = (\Sigma [C_i] \times i) / (\Sigma [C_i])$	反映一定碳数范围内正构烷烃含量分布集中的碳数链长,指示陆源与海源的相对输入情况。
$\Sigma T/\Sigma M$ <sup>[33]</sup>	$\Sigma T/\Sigma M = \Sigma C_{25-35} / \Sigma C_{15-21}$	消除粒度和沉积速率的影响,指示陆源相对于海源的输入情况。

表 2 沉积物中正构烷烃和脂肪酸的参数  
Table 2 Parameters of n-alkanes and fatty acids in sediments

样品编号	正构烷烃 (ALK)						脂肪酸 (FA)				
	TALK/ ( $\mu\text{g/g}$ )	CPI <sub>1</sub>	CPI <sub>2</sub>	CPI	ACL	$\Sigma\text{T}/\Sigma\text{M}$	TFA/ ( $\mu\text{g/g}$ )	SFA/%	MUFA/%	PUFA/%	C22:1n9/%
E271	2.21	0.97	1.29	0.72	29.64	4.18	93.55	50.59	36.62	12.78	29.02
E272-1	1.85	0.88	2.09	1.02	27.03	3.77	59.71	52.13	36.90	10.97	27.79
E272-2	1.10	0.72	1.90	0.93	25.21	2.03	58.68	53.04	35.69	11.27	32.38
E272-3	2.95	0.68	1.66	0.81	29.62	3.21	58.63	47.46	40.77	11.77	15.39
E272-4	1.39	0.85	2.17	1.67	25.31	1.88	87.05	68.98	21.54	9.48	19.31
E272-5	1.77	0.84	0.47	0.38	25.95	1.92	75.38	63.55	26.07	10.38	32.25
E272-6	1.69	0.73	1.45	1.16	24.06	1.14	85.18	50.30	39.05	10.65	32.27
E272-7	1.32	0.88	2.27	1.39	24.74	1.68	50.71	45.85	40.78	13.37	25.55
E272-8	0.85	1.00	2.88	1.55	24.32	1.90	55.12	56.07	33.25	10.68	23.06
E272-9	0.86	1.70	1.14	0.97	26.06	2.97	52.66	58.05	30.58	11.36	27.11
E272-10	1.24	1.14	0.72	1.09	26.42	2.53	63.65	54.45	34.69	10.85	17.11
E272-11	1.46	0.95	1.20	0.79	26.02	2.72	70.61	66.03	23.25	10.72	31.51
E272-12	2.03	0.74	0.97	0.79	25.69	2.05	69.46	50.27	39.30	10.44	34.74
E272-13	2.24	0.72	0.86	0.72	26.09	2.33	72.31	44.74	43.59	11.67	28.27

注: TALK: 正构烷烃总含量; TFA: 脂肪酸总含量; SFA: 饱和脂肪酸; MUFA: 单不饱和脂肪酸; PUFA: 多不饱和脂肪酸。

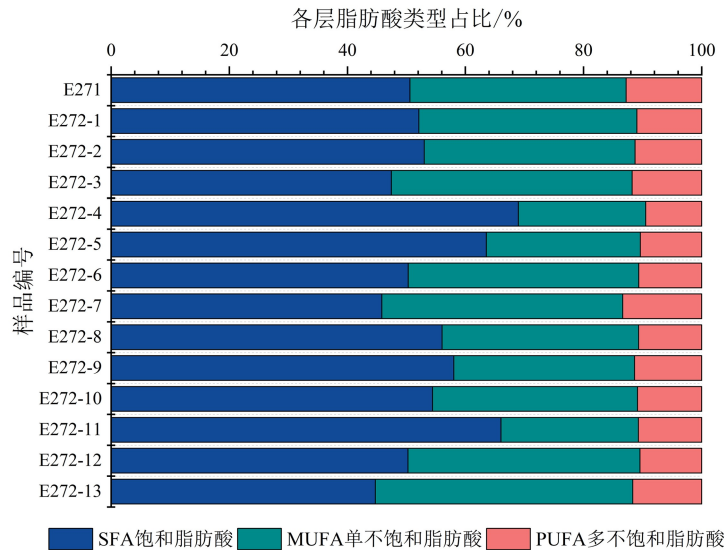


图 3 E271、E272 站位沉积物中脂肪酸类型占比分布图

Fig.3 The proportion of fatty acid types in the sediments from E271 and E272 stations

1n9 含量较高为特点。

### 3 讨论

#### 3.1 沉积物中正构烷烃的来源

海洋沉积物中的正构烷烃通常来自海洋的自

生产物(如浮游植物藻类、细菌等)以及河流、洋流和海气交换带来的陆源物质。不同来源的正构烷烃具有不同的组成及分布,因此,正构烷烃可用作分子示踪剂,用于示踪沉积物中有机质的来源,反映其沉积过程<sup>[34]</sup>。

E271 和 E272 站位沉积物中正构烷烃多呈双峰型分布(图 2)。两站位沉积物中正构烷烃前峰群分

布在  $C_{16}$ — $C_{20}$ , 后峰群在  $C_{29}$ — $C_{34}$ , 且以  $C_{29}$ 、 $C_{31}$ 、 $C_{32}$  和  $C_{34}$  含量较高,  $C_{33}$  含量极少或未检出,  $C_{34}$  含量较高为特点。多个主峰的出现常常指示其沉积物质的来源为混合型。

分析沉积物中短链正构烷烃的来源, 短链正构烷烃  $C_{15}$ — $C_{21}$  常常来源于海洋浮游藻类和细菌<sup>[18]</sup>。通常情况下, 来源于海洋浮游藻类的短链正构烷烃具有奇碳优势<sup>[35-37]</sup>, 而来源于细菌等微生物的短链正构烷烃则常具有偶碳优势<sup>[38]</sup>。由 E271 站位沉积物的  $CPI_1$  为 0.97, E272 各层位沉积物的  $CPI_1$  (0.68~1.7) 多小于 1, 可得到两站位短链正构烷烃均具明显的偶碳优势, 这说明 E271 和 E272 站位沉积物的短链正构烷烃主要来源为海洋细菌等微生物。加之, 研究区的生产力水平较低<sup>[11]</sup>, 且测得的短链正构烷烃具明显的偶碳优势, 推测研究区内海洋藻类来源较少。另一方面, 由于在高温、还原的热液环境下, 具偶碳优势的脂肪酸, 其还原降解可形成具偶碳优势的短链正构烷烃<sup>[39]</sup>, 结合研究区沉积物中脂肪酸的分布以偶碳优势为主, 推测沉积物中的短链正构烷烃很可能包含了来源于相应脂肪酸的还原降解产物。

分析沉积物中长链正构烷烃的来源, 长链正构烷烃  $C_{27}$ — $C_{33}$  常常来源于陆地高等植物的表层蜡质, 以  $C_{29}$  或  $C_{31}$  含量较高为特点<sup>[19-20]</sup>。本研究沉积物中长链烷烃  $C_{29}$  和  $C_{31}$  含量较高, 很可能为陆源高等植物的贡献。刘季花等对东太平洋海隆 CC 区沉积物中黏土矿物及钷同位素分析发现, 其黏土矿物主要来自美洲陆源物质<sup>[40]</sup>。N. Ohkouch 曾对太平洋 48°N 至 15°S 的深海沉积物进行研究, 发现赤道信风可以将气溶胶从中美洲和南美洲输送到热带太平洋, 且太平洋 15°S~48°N、175°E 的深海沉积物中存在由大气传输和海气交换等带来的大量美洲的陆源物质<sup>[41]</sup>。同时, Pagani 根据碳同位素的研究, 证实大西洋沉积物含明显的陆源正构烷烃的输入, 显示风沙机制可以将大量的陆地有机质输送到海洋沉积物中<sup>[42]</sup>。本研究区位于赤道东北信风带, 距离墨西哥阿卡普尔港约 600 km (图 1), 暗示着研究区沉积物中的陆源物质可能为赤道东北信风输送的来自美洲的陆源物质。

通过计算 E271 和 E272 站位沉积物中正构烷烃的 ACL 参数可知 (表 2), E271 和 E272 站位沉积物的 ACL 为 24.06~29.64, 且沉积物中较高的 ACL 反映了两站位沉积物中陆源输入的物质占相当比例<sup>[32]</sup>。进一步, 使用  $\Sigma T/\Sigma M$  比值, 在消除粒度和沉积速率影响的基础上<sup>[33]</sup>, 分析研究站位沉积物的物质来

源。结果表明, E271 站位沉积物的  $\Sigma T/\Sigma M$  为 4.18, E272 各层位沉积物的  $\Sigma T/\Sigma M$  为 1.14~3.77, 且各层位沉积物的  $\Sigma T/\Sigma M$  变化较大, 反映了该站位各层位沉积物的物质来源不稳定。

此外, 由于陆地高等植物来源的正构烷烃常具  $C_{27}$ 、 $C_{29}$ 、 $C_{31}$  和  $C_{33}$  含量较高的特征, 这一点不能解释本研究沉积物中长链正构烷烃  $C_{32}$  和  $C_{34}$  含量较高、 $C_{33}$  含量极低且部分未检出的特点。Brault 等对东太平洋海隆 13°N 和 21°N 附近热液区的块状硫化物中有机质进行了研究, 在样品中发现了碳数在  $C_{21}$ — $C_{38}$  之间的长链烷烃, 没有明显的奇偶碳数优势 ( $CPI$  为 0.8~1.1), 并在热液区的黑烟卤中检测到了  $C_{25}$ — $C_{34}$  的正构烷烃, 推测该高碳数正构烷烃可能来自细菌蜡和热液区热催化反应形成的产物<sup>[43]</sup>。随后, Lein 等在研究大西洋洋中脊的热液硫化物时发现, 热液产物中  $C_{23}$ — $C_{41}$  的正构烷烃含量高至一般远洋碳酸盐的 2 倍, 且与低碳数正构烷烃化合物 ( $C_{15}$ — $C_{22}$ ) 相比, 其高碳数正构烷烃在热液烟卤中所占的比例很高, 这一点在热液产物中普遍存在<sup>[35]</sup>, 因此, 推测在水热体系的热催化反应中会形成高碳数的正构烷烃。

结合两站位沉积物中均存在  $C_{33}$  含量较低且  $C_{34}$  含量较高的情况, 推测热催化过程消耗了大部分  $C_{33}$ , 使得沉积物中正构烷烃的  $C_{34}$  含量较高。此外, 本研究区 E271 站位沉积物中检出了高碳数正构烷烃 (碳数高至  $C_{40}$ ), 加之其相比于 E272 站位更靠近东太平洋海隆轴部的热液活动区 (图 1), 这表明 E271 站位的沉积物受热液活动的影响程度更大。

总之, 研究区内沉积物中正构烷烃的来源主要为海洋细菌等微生物、陆源高等植物和热液物质的输入。

### 3.2 E272 站位沉积物中的成岩作用

成岩作用是指沉积物沉积后的压实和岩化的过程<sup>[44]</sup>, 对于沉积物中的有机质来说, 常常表现为有机化合物的早期转化, 即从有机质沉降下来到环境温度和压力增加, 有机质成熟度增加这一过程<sup>[45]</sup>。同时, 热液活动的影响往往会使沉积物中有机质的成熟度增加<sup>[46]</sup>, 即发生成岩作用。成岩作用往往会使沉积物中正构烷烃  $CPI$  值趋向于 1<sup>[47]</sup>, 呈现其奇偶碳优势不明显的特征。

由上节可知 E272 站位沉积物中陆地高等植物来源占相当比例, 且来源于陆地高等植物的沉积物, 其正构烷烃常常显示出高的碳优势指数  $CPI$  (通

常 $>4$ )<sup>[17,48]</sup>。事实上,计算 E272 站位沉积物中正构烷烃的整体 CPI 可知,其值为 0.72~1.67,且多数层位沉积物中指示陆地物质来源的后峰群 CPI<sub>2</sub> 为 1~2,均不具明显的奇偶碳优势,这很可能受到了成岩作用的影响。另外,研究区沉积物受到了热液活动的影响,这表明 E272 站位的沉积物很可能经历了由成熟有机质的输入引发的早期成岩作用。

余少雄<sup>[11]</sup>和武力<sup>[12]</sup>分别对 E272 站位沉积物的有机碳和孔隙率进行了研究,发现二者随深度增加递减。本研究中 E272 站位深层沉积物中正构烷烃的 CPI 整体低于表层,同时该站位沉积物的正构烷烃 CPI 值随深度增加趋向 1(图 4)。由于沉积物中正构烷烃的 CPI 会随成岩作用而降低,并最终在沉积期间趋向统一<sup>[47,49]</sup>。因此,有机碳、孔隙率和正构烷烃 CPI 值随深度的变化均显示其已经历了由压实作用造成的早期成岩作用。

综上所述,E272 站位沉积物经历了由成熟有机质的输入和沉积压实作用导致的早期成岩作用。

### 3.3 对热液活动的指示

检测得到 E271 表层沉积物中正构烷烃的含量为 2.21  $\mu\text{g/g}$ ,E272 站位沉积物中正构烷烃含量为 0.85~2.95  $\mu\text{g/g}$ ,均值为 1.59  $\mu\text{g/g}$ 。此外,Simoneit 在东太平洋海隆 13°N 附近的喷口区曾测得喷口流体中正构烷烃的含量为 10~260  $\mu\text{g/g}$ ,喷口周围海

水中正构烷烃的含量为 0.6  $\mu\text{g/g}$ <sup>[50]</sup>,且东太平洋海隆 21°N 附近的烟囱体底部(附着大量管状蠕虫),其正构烷烃的含量为 10.2  $\mu\text{g/g}$ ,丘状烟囱体的硫化物中,其正构烷烃的含量均值则为 0.32  $\mu\text{g/g}$ <sup>[50-51]</sup>。以上结果表明,在喷口附近,由于热液活动频繁,沉积环境不稳定,其热液流体、海水和热液产物中正构烷烃的含量变化很大。不仅如此,研究区两站位沉积物中正构烷烃的含量高于太平洋北部 26°~33°N 开阔大洋正构烷烃的含量(0.36~0.9  $\mu\text{g/g}$ )<sup>[41]</sup>,低于热液喷口区泥质沉积物中正构烷烃的含量,且由于喷口区产生的热液物质可输送至上覆热液柱中,暗示着热液物质的扩散输送可使得研究区沉积物中正构烷烃的含量增加<sup>[52]</sup>。

脂肪酸的含量与热液活动之间具有密切的关系<sup>[53]</sup>,表 3 总结了太平洋部分海区不同沉积物中总脂肪酸的分布,可以看出,通常在生物群落发育的热液喷口环境中,喷口流体及泥质沉积物中的  $\Sigma\text{TFA}$  含量较高,高达 247  $\mu\text{g/g}$ <sup>[13]</sup>,而喷口热液区烟囱体的硫化物也含有脂肪酸,但其含量相对较少。在喷口生物群落、热液物质沉降和洋底水动力的共同作用下,喷口沉积物的  $\Sigma\text{TFA}$  值变化范围较大<sup>[14]</sup>。此外,有研究表明,东太平洋赤道中部 140°W 沉积物中的总脂肪酸含量(1.2~32.2  $\mu\text{g/g}$ )显示大气输送陆源物质至海洋是深海沉积物中物质来源的重要组成部分<sup>[54]</sup>。本研究区 E271 站位沉积物的总脂

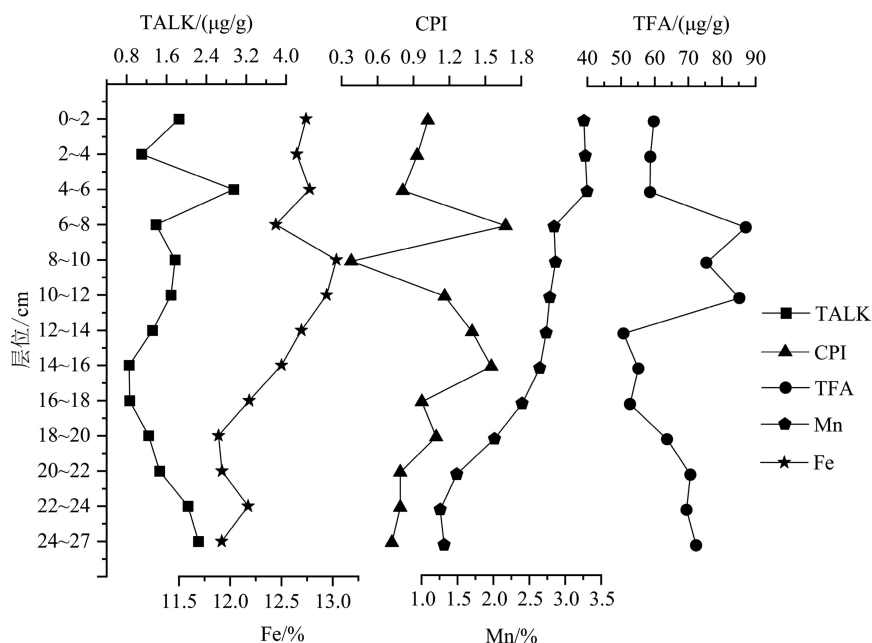


图 4 E272 站位沉积物中正构烷烃、脂肪酸、Fe、Mn 元素含量随深度变化图

Fe、Mn 元素数据来自文献 [9]。

Fig.4 Distribution of N-alkane, fatty acids, Fe and Mn contents in sediment core at E272 station

The data of Fe and Mn are quoted from reference [9].



表 3 太平洋喷口流体、硫化物、生物和沉积物的总脂肪酸含量  
Table 3 Total fatty acid contents in sediments, vent fluid, sulfide, and bacteria mat from the Pacific Ocean

地区	样品类型	总脂肪酸含量/( $\mu\text{g/g}$ )
东太平洋海隆 13°N 热液区 <sup>[15]</sup>	喷口流体	1.8~6.1, 均值 3.3
	喷口水颗粒物	41.4~73.8
	热液沉积物	1.14
	洋脊附近 4~40 km 的沉积混合物	0.46~1.37
东太平洋赤道中部 140°W <sup>[54]</sup>	表层沉积物	1.2~32.2
东太平洋北部胡安·德富卡洋脊 <sup>[13,55]</sup>	热液喷口泥质沉积物磷脂脂肪酸 (PLFA)	247
	活动烟囱硫化物	2.21~4.07
中太平洋海隆 175°E、15°S~48°N <sup>[41,56]</sup>	海底表层沉积物	1.82~23.8, 均值 7.93
西太平洋马努斯热液活动区 <sup>[14]</sup>	<i>Calyptogena</i> (热液区蛤) 群落和白色菌席	131
	菌席内部 (靠近管状蠕虫群落)	184
西太平洋伊豆-小笠原热液活动区 <sup>[14]</sup>	活动烟囱底部, 菌席 (无明显的生物群落)	13.2
	菌席处 (无明显生物群落)	42.2
西太平洋冲绳海槽 Iheya 海脊 <sup>[14]</sup>	与死亡的 <i>Calyptogena</i> 群落相距 20 m 的地方	15.7

脂肪酸  $\Sigma\text{TFA}$  的含量为 93.55  $\mu\text{g/g}$ , E272 站位沉积物中总脂肪酸  $\Sigma\text{TFA}$  的含量随深度变化较大, 为 50.71~87.05  $\mu\text{g/g}$ , 其远高于中太平洋深海沉积物, 略低于生物群落发育的热液活动喷口区, 推测本研究站位的沉积物具有海洋自生产物和大气输送的陆源物质之外的热液来源的脂肪酸贡献, 且热液来源的脂肪酸占相当比例。

结合袁春伟<sup>[9]</sup>在 E272 站位获得的各层位沉积物中 Fe 和 Mn 元素的含量数据 (二者是含金属沉积物中指示热液活动影响的标志性元素), 对 E272 站位沉积物中正构烷烃和脂肪酸含量随深度的变化进行分析。由图 4 可知, 在 4~12 cm 层位, 沉积物中正构烷烃及 CPI 值、脂肪酸含量三者与其 Fe、Mn 元素含量随深度的变化有较高的相关性, 且 12 cm 以深的层位, 随着深度增加, 其 Fe、Mn 含量变化较小, 相应的正构烷烃和脂肪酸随深度的变化也较小, 这暗示了正构烷烃和脂肪酸含量与热液活动的影响有关。

另一方面, 不同生态环境下的生物具有不同的脂肪酸组成, 特征脂肪酸对生活其中的生物活动有特异性指示作用。深海热液区作为独特的生态环境, 其沉积物中特征脂肪酸对生活其中的生物也具有特异性指示作用<sup>[57]</sup>。E271 和 E272 站位沉积物中单不饱和脂肪酸分别占比 57.17% 和 27.03%~65.04%, 这暗示了该区沉积物中细菌等微生物的含量较多。李友训等通过对 E271 和 E272 站位沉积

物中微生物多样性的分析, 得到 E272 站位中 34.7% 的细菌序列和与来源于热液环境的细菌序列具有很近的亲缘关系, 且  $\gamma$ -变形杆菌是两站位沉积物中细菌的优势类群, 其在热液喷口处起着硫化物氧化剂的作用<sup>[58]</sup>, 由此推测研究区位于热液活动影响区域的边缘, 且该类微生物是随着热液柱的飘移、扩散而迁移至研究区的沉积物中<sup>[59]</sup>。

此外, 已有研究表明, 在东太平洋海隆的热液喷口附近常见管状蠕虫 (*Riftia pachyptila*) 和硫氧化菌的共生分布, 管状蠕虫因其可以食用上覆水体沉降的浮游植物遗骸, 而常含有丰富的 DHA (C22 : 6n3) 和 C18 : 2n6<sup>[60]</sup>。本研究中两站位沉积物中均存在一定量的 DHA 和 C18 : 2n6, 且相当比例的 C18 : 2n6 指示了沉积物中硫氧化菌的存在<sup>[61]</sup>, 暗示了该沉积物也可能受到了浮游植物遗骸和硫氧化菌的影响。

桡足类、磷虾、多毛类<sup>[62-67]</sup>等大型生物常见于热液活动区, 其中桡足类和磷虾常发现于热液区的热液柱中<sup>[60]</sup>。不仅如此, 已有研究表明, 在热液区大型生物上常发现较高含量的 n9 系列脂肪酸, 例如 C21 : 1n9 是多毛类的特征脂肪酸, 磷虾中含相对较多的 C18 : 1n9<sup>[15]</sup>, 桡足类含有特征型脂肪酸 C20 : 1n9 和 C22 : 1n9<sup>[68]</sup>等。Brault 等曾在东太平洋海隆 21°N 附近研究发现, 热液区中存在较高含量的特征脂肪酸 C22 : 1, 推测这可能来自喷口区的大型生物<sup>[43]</sup>。本研究中两站位沉积物中 n9 系列脂

肪酸的含量很高,分别占总脂肪酸含量的55%和25%~63%(表2),因此,本研究区沉积物中所具有的大量n9系列,尤其以C20:1n9和C22:1n9的高含量为特点(后者占 $\Sigma$ TFA 15.39%~34.74%),这指示了研究区可能有桡足类大型生物的存在,且暗示着研究区的沉积物受到了热液柱带来的相关生物物质的影响。

由上分析,正构烷烃和脂肪酸的含量以及相关特征脂肪酸DHA(C22:6n3)、C18:2n6、C20:1n9和C22:1n9等暗示了研究区沉积物受到热液活动的影响。

## 4 结论

(1)E271和E272站位沉积物中正构烷烃多呈双峰型分布,其中短链烷烃多呈偶碳优势,其来源为海洋细菌等微生物;长链烷烃主要为陆源高等植物和热液物质的输入。其中,陆源物质为来自大气输送的美洲物质,高碳数正构烷烃主要为热液区高温热催化所形成的产物。

(2)E272站位沉积物中正构烷烃其CPI值随深度变化趋向于1,结合该区沉积物受到热液活动的影响,表明该站位的沉积物经历了由成熟有机质的输入和沉积压实作用引起的早期成岩作用。

(3)对E271和E272站位沉积物中正构烷烃和脂肪酸含量及C18:2n6、DHA(C22:6n3)、C20:1n9和C22:1n9等特征脂肪酸的分析,暗示了沉积物中存在热液物质的输入,即该沉积物中有机质受到了热液活动的影响。

**致谢:**感谢DY105-12航次“大洋一号”样品采集人员为本次研究提供宝贵的沉积物样品。感谢中国科学院海洋研究所分析测试中心彭全材为本研究实验提供技术支持。

## 参考文献(References)

- [1] Rona P A. New evidence for seabed resources from global tectonics [J]. *Ocean Management*, 1973, 1: 145-159.
- [2] 曾志刚. 海底热液地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [ZENG Zhigang. Submarine Hydrothermal Geology [M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [3] Francheteau J, Needham H D, Choukroune P, et al. Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise [J]. *Nature*, 1979, 277(5697): 523-528.
- [4] Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the Galápagos rift [J]. *Science*, 1979, 203(4385): 1073-1083.
- [5] Choukroune P, Francheteau J, Hekinian R. Tectonics of the East Pacific Rise near 12°50'N: a submersible study [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 68(1): 115-127.
- [6] Fouquet Y, Knott R, Cambon P, et al. Formation of large sulfide mineral deposits along fast spreading ridges. Example from off-axial deposits at 12°43'N on the East Pacific Rise [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144(1-2): 147-162.
- [7] Rona P A, Bemis K G, Silver D, et al. Acoustic imaging, visualization, and quantification of buoyant hydrothermal plumes in the Ocean [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2002, 23(2): 147-168.
- [8] Khripounoff A, Alberic P. Settling of particles in a hydrothermal vent field (East Pacific Rise 13°N) measured with sediment traps [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1991, 38(6): 729-744.
- [9] 袁春伟. 东太平洋海隆13°N附近沉积物元素地球化学研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)硕士学位论文, 2007. [YUAN Chunwei. Elemental geochemistry of sediments near 13°N East Pacific Rise [D]. Master Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2007.]
- [10] Hekinian R, Francheteau J, Renard V, et al. Intense hydrothermal activity at the axis of the east pacific rise near 13°N: Sumbersible witnesses the growth of sulfide chimney [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1983, 6(1): 1-14.
- [11] 余少雄. 东太平洋海隆13°N附近含金属沉积物中的有机碳氮研究[D]. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2010. [YU Shaoxiong. Total organic carbon and nitrogen from metalliferous sediment on the flank of the east Pacific Rise 13°N [D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.]
- [12] 武力. 东太平洋海隆13°N含金属沉积物研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)硕士学位论文, 2011. [WU Li. Study on the metalliferous sediments near 13°N East pacific rise [D]. Master Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.]
- [13] Hedrick D B, Pledger R D, White D C, et al. In situ microbial ecology of hydrothermal vent sediments [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1992, 101(1): 1-10.
- [14] Yamanaka T, Sakata S. Abundance and distribution of fatty acids in hydrothermal vent sediments of the western Pacific Ocean [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(5): 573-582.
- [15] Brault M, Marty J C, Saliot A. Fatty acids from particulate matter and sediment in hydrothermal environments from the east Pacific rise, near 13°N [J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 6: 217-222.
- [16] Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 1-188.
- [17] Cranwell P A. Chain-length distribution of n-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change [J]. *Freshwater Biology*, 2010, 3(3): 259-265.
- [18] Blumer M, Guillard R P L, Chase T. Hydrocarbons of marine phytoplankton [J]. *Marine Biology*, 1971, 8(3): 183-189.
- [19] Eglinton G, Hamilton R J. Leaf epicuticular waxes [J]. *Science*, 1967, 156(3780): 1322-1335.

- [20] Goñi M A, Ruttenger K C, Eglinton T I. Sources and contribution of terrigenous organic carbon to surface sediments in the Gulf of Mexico [J]. *Nature*, 1997, 389 (6648): 275-278.
- [21] Parrish C C. *Marine Chemistry* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2000: 194-220.
- [22] Rajendran N, Suwa Y, Urushigawa Y. Distribution of phospholipid ester-linked fatty acid biomarkers for bacteria in the sediment of Ise Bay, Japan [J]. *Marine Chemistry*, 1993, 42 (1): 39-56.
- [23] Wannigama G P, Volkman J K, Gillan F T, et al. A comparison of lipid components of the fresh and dead leaves and pneumatophores of the mangrove *Avicennia marina* [J]. *Phytochemistry*, 1981, 20 (4): 659-666.
- [24] Falk-Petersen S, Dahl T M, Scott C L, et al. Lipid biomarkers and trophic linkages between ctenophores and copepods in Svalbard waters [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 227: 187-194.
- [25] Feng X J, Simpson M J. The distribution and degradation of biomarkers in Alberta grassland soil profiles [J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38 (9): 1558-1570.
- [26] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: Volume 1: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 101-133.
- [27] Macdonald K C, Fox P J, Miller S, et al. The East Pacific Rise and its flanks 8-18°N: History of segmentation, propagation and spreading direction based on SeaMarc II and Sea Beam studies [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1992, 14 (4): 299-344.
- [28] 张倩, 宋金明, 彭全材, 等. 胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2017, 38 (7): 2763-2772. [ZHANG Qian, SONG Jinming, PENG Quancai, et al. Distribution and Sources of n-alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay [J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (7): 2763-2772.]
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21247-2007 海面溢油鉴别系统规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-27. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. GB/T 21247-2007 Specifications for identification system of spilled oils on the sea [S]. Beijing: China Standard Press, 2008: 1-27.]
- [30] 彭全材, 宋金明, 李军, 等. 超声萃取-气相色谱法测定扇贝中 30 种脂肪酸 [J]. *食品科学*, 2012, 33 (12): 163-168. [PENG Quancai, SONG Jinming, LI Jun, et al. Determination of 30 fatty acids in scallop by ultrasonic extraction gas chromatography [J]. *Food Science*, 2012, 33 (12): 163-168.]
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22223-2008 食品中总脂肪、饱和脂肪(酸)、不饱和脂肪(酸)的测定: 水解提取-气相色谱法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-13. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. GB/T 22223-2008 Determination of total fat saturated fat and unsaturated fat in foods-Hydrolytic extraction-gas chromatography [S]. Beijing: China Standard Press, 2008: 1-13.]
- [32] Sikes E L, Uhle M E, Nodder S D, et al. Sources of organic matter in a coastal marine environment: Evidence from n-alkanes and their  $\delta^{13}\text{C}$  distributions in the Hauraki Gulf, New Zealand [J]. *Marine Chemistry*, 2009, 113 (3-4): 149-163.
- [33] Duan Y. Organic geochemistry of recent marine sediments from the Nansha Sea, China [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31 (2-3): 159-167.
- [34] Doskey P V. Spatial variations and chronologies of aliphatic hydrocarbons in lake michigan sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35 (2): 247-254.
- [35] Lein A Y, Peresypkin V I, Simoneit B R T. Origin of hydrocarbons in hydrothermal sulfide ores in the mid-atlantic ridge [J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2003, 38 (5): 383-393.
- [36] Nishimura M, Baker E W. Possible origin of n-alkanes with a remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50 (2): 299-305.
- [37] Grimalt J, Albaigés J. Sources and occurrence of  $\text{C}_{12}$ - $\text{C}_{22}$ n-alkane distributions with even carbon-number preference in sedimentary environments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51 (6): 1379-1384.
- [38] Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments-II [J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11 (6): 513-527.
- [39] Kvenvolden K A. Molecular distributions of normal fatty acids and paraffins in some lower cretaceous sediments [J]. *Nature*, 1966, 209 (5023): 573-577.
- [40] 刘季花, 石学法, 陈丽蓉, 等. 东太平洋沉积物中粘土组分的 REEs 和  $\epsilon_{\text{Nd}}$ : 粘土来源的证据 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 48 (5): 701-712. [LIU Jihua, SHI Xuefa, CHEN Lirong, et al. REE and  $\epsilon_{\text{Nd}}$  of clay fractions in sediments from the eastern Pacific Ocean: Evidence for clay sources [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48 (5): 701-712.]
- [41] Ohkouchi N, Kawamura K, Kawahata H, et al. Latitudinal distributions of terrestrial biomarkers in the sediments from the Central Pacific [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (9): 1911-1918.
- [42] Pagani M, Freeman K H, Arthur M A. Isotope analyses of molecular and total organic carbon from miocene sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64 (1): 37-49.
- [43] Brault M, Simoneit B R T, Saliot A. Trace petroliferous organic matter associated with massive hydrothermal sulfides from the east pacific rise at 13 and 21°N [J]. *Oceanologica Acta*, 1989, 12 (4): 405-415.
- [44] Larsen G, Chilingar G V. *Diagenesis in Sediments* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1967: 1-5.
- [45] Brassell S C, Eglinton G, Maxwell J R, et al. Natural background of alkanes in the aquatic environment [M]//Hutzinger O, Van Lelyveld I H, Zoeteman B C J. *Aquatic Pollutants*. Oxford: Elsevier Ltd., 1978: 69-86.
- [46] Huang X, Chen S, Zeng Z G, et al. Characteristics of hydrocarbons in sediment core samples from the northern Okinawa Trough [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115 (1-2): 507-514.
- [47] Johnson R W, Calder J A. Early diagenesis of fatty acids and hydrocarbons in a salt marsh environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37 (8): 1943-1955.

- [48] Rielley G, Collier R J, Jones D M, et al. The biogeochemistry of Ellesmere Lake, U. K. —I: source correlation of leaf wax inputs to the sedimentary lipid record [J]. *Organic Geochemistry*, 1991, 17(6): 901-912.
- [49] Meyers P A, Ishiwatari R. Organic Matter Accumulation Records in Lake Sediments [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1995: 279-328.
- [50] Simoneit B R T, Brault M, Saliot A. Hydrocarbons associated with hydrothermal minerals, vent waters and talus on the East Pacific Rise and Mid-Atlantic Ridge [J]. *Applied Geochemistry*, 1990, 5(1-2): 115-124.
- [51] Brault M, Simoneit B R T, Marty J C, et al. Hydrocarbons in waters and particulate material from hydrothermal environments at the East Pacific Rise, 13°N [J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 12(3): 209-219.
- [52] Breier J A, Toner B M, Fakra S C, et al. Sulfur, sulfides, oxides and organic matter aggregated in submarine hydrothermal plumes at 9°50'N East Pacific Rise [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 88: 216-236.
- [53] Huang X, Zeng Z G, Chen S, et al. Abundance and distribution of fatty acids in sediments of the south mid-Atlantic ridge [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(2): 277-283.
- [54] Wakeham S G, Hedges J I, Lee C, et al. Compositions and transport of lipid biomarkers through the water column and surficial sediments of the equatorial Pacific Ocean [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1997, 44(9-10): 2132-2162.
- [55] Li J W, Zhou H Y, Peng X T, et al. Abundance and distribution of fatty acids within the walls of an active deep-sea sulfide chimney [J]. *Journal of Sea Research*, 2011, 65(3): 333-339.
- [56] Ohkouchi N. Lipids as biogeochemical tracers in the Late Quaternary [D]. Doctor Dissertation of University of Tokyo, 1995.
- [57] Oliver J D, Colwell R R. Extractable lipids of gram-negative Marine Bacteria: fatty-acid composition [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1973, 23(4): 442-458.
- [58] Nercessian O, Bienvenu N, Moreira D, et al. Diversity of functional genes of methanogens, methanotrophs and sulfate reducers in deep-sea hydrothermal environments [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, 7(1): 118-132.
- [59] Li Y X, Li F C, Zhang X W, et al. Vertical distribution of bacterial and archaeal communities along discrete layers of a deep-sea cold sediment sample at the East Pacific Rise (~ 13°N) [J]. *Extremophiles*, 2008, 12(4): 573-585.
- [60] 伏美燕, 杨群慧, 王虎. 深海热液环境中脂肪酸组成的研究进展 [J]. *海洋科学*, 2008, 32(5): 78-86. [FU Meiyuan, YANG Qunhui, WANG Hu. Progress in the composition research of fatty acids in deep-sea hydrothermal environment [J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(5): 78-86.]
- [61] Fullarton J G, Wood P, Sargent J R. Fatty acid composition of lipids from sulphuroxidizing and methylotrophic bacteria from thyasirid and lucinid bivalves [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1995, 75(2): 445-454.
- [62] Colaço A, Desbruyères D, Guezennec J. Polar lipid fatty acids as indicators of trophic associations in a deep-sea vent system community [J]. *Marine Ecology*, 2007, 28(1): 15-24.
- [63] Saliot A, Laureillard J, Scribe P, et al. Evolutionary trends in the lipid biomarker approach for investigating the biogeochemistry of organic matter in the marine environment [J]. *Marine Chemistry*, 1991, 36(1-4): 233-248.
- [64] Rau G H. Hydrothermal vent clam and tube worm <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C: further evidence of nonphotosynthetic food Sources [J]. *Science*, 1981, 213(4505): 338-340.
- [65] Ben-Mlih F, Marty J C, Fiala-Médioni A. Fatty acid composition in deep hydrothermal vent symbiotic bivalves [J]. *Journal of Lipid Research*, 1992, 33(12): 1797-1806.
- [66] Burd B J, Thomson R E. Distribution of zooplankton associated with the Endeavour Ridge hydrothermal plume [J]. *Journal of Plankton Research*, 1995, 17(5): 965-997.
- [67] Burd B J, Thomson R E, Jamieson G S. Composition of a deep scattering layer overlying a mid-ocean ridge hydrothermal plume [J]. *Marine Biology*, 1992, 113(3): 517-526.
- [68] Ackman K G, Linke B A, Hingley J. Some details of fatty acids and alcohols in the lipids of north Atlantic copepods [J]. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 2011, 31(11): 1812-1818.