

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.284



南海不同水深表层沉积物脂肪酸分布特征及其生物源的空间变化

杨义¹, 郝宇昕¹, 阮小燕^{2*}, 李学杰³, 姚永坚³, 杨楚鹏³

1. 生物地质与环境地质国家重点实验室, 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 自然资源部广州海洋地质调查局, 广东广州 510075

摘要: 为探究边缘海区域由陆架到深海盆脂类的分布模式及其指示的生物源的空间变化特征, 对采集于南海 4 个不同水深断面的表层沉积物脂肪酸进行了系统研究. 从表层沉积物中检出丰富的脂肪酸, 包括直链饱和脂肪酸、直链不饱和脂肪酸和支链脂肪酸等. 其中, 高碳数直链脂肪酸($\geq C_{20}$)主要来源于陆源高等植物的输入, 低碳数直链脂肪酸主要来源于藻类的贡献, 低碳数支链(包括异构和反异构)脂肪酸主要来源于细菌贡献. 高碳数脂肪酸指示的高等植物输入, 在南海沿岸区的高值与河流的输入有关, 而在深海盆的高值可能与洋流、风尘输入等有关. 低碳数支链脂肪酸指示的细菌分布在南海北部沿岸表现出高值, 在深海盆表现出较低分布模式. 低碳数直链脂肪酸表征的浮游植物的贡献在南海北部表现出高值, 在深海盆局部区域也表现出高值分布. 细菌和浮游植物在南海北部表现出的高值, 可能与丰富的营养盐条件有关. 而浮游植物在深海盆的分布模式, 可能受到洋流以及其他输入的影响.

关键词: 南海; 脂肪酸; 陆源输入; 浮游植物生产力; 细菌.

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2018)11-4027-09

收稿日期: 2018-03-17

Spatial Distribution of Fatty Acids and Inferred Organisms in Surface Sediments of Different Water Depths in the South China Sea

Yang Yi¹, Hao Yuxin¹, Ruan Xiaoyan^{2*}, Li Xuejie³, Yao Yongjian³, Yang Chupeng³

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China

Abstract: To investigate the spatial distribution of lipid biomarkers from offshore to deep basin in the marginal sea, fatty acids (FAs) in surface sediments collected from different water depths across four different transects were studied. Abundant FAs, including saturated and unsaturated normal FAs, as well as saturated iso- and anteiso-FAs, were detected. The FAs are dominated by short-chain saturated FAs, showing a mono-model distribution. The long-chain FAs, showing an even-over-odd distribution, are mainly derived from terrestrial higher plants, and short-chain normal FAs are derived from marine phytoplankton, while saturated iso- and anteiso-FAs are mainly contributed by marine bacteria. The long-chain FAs derived from the higher plants show the higher concentration in the coastal area which is contributed by the fluvial input, as well as in the deep basin which may be resulted from the ocean current, and likely, the aeolian dust input. Branched short-chain FAs indicate that the bacteria have great contribution in the coastal area but not in the deep basin. Short-chain normal FAs indicate that the phyto-

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2016YFA0601100); 自然资源部广州海洋地质调查局项目(No.GZH201500202).

作者简介: 杨义(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事海洋有机地球化学研究. ORCID: 0000-0003-4851-9621. E-mail: 13871316179@126.com

* **通讯作者:** 阮小燕, ORCID: 0000-0002-6793-1737. E-mail: ruan6231@163.com

引用格式: 杨义, 郝宇昕, 阮小燕, 等. 2018. 南海不同水深表层沉积物脂肪酸分布特征及其生物源的空间变化. 地球科学, 43(11): 4027-4035.

plankton relative abundance is great in northeast South China Sea and the deep basin. The higher contribution of both bacteria and phytoplankton in the coastal area is possibly related to higher nutrient input, while the higher phytoplankton distribution in the deep basin may be influenced by the ocean current or other input.

Key words: South China Sea; fatty acid; terrestrial input; phytoplankton production; bacteria.

生物标志化合物由于分布广泛,并且很好地记录了原始生物母质的特殊信息,被广泛应用于古环境重建中.生物标志物因具有生物和环境的特异性,对于不同生境以及原始生物信息有很好的解译作用(Kögel-Knabner, 2002; Otto and Simpson, 2005; Feng and Simpson, 2007).脂肪酸是一类重要的生物标志化合物.它在生物体中广泛分布,是构成生物体的主要成分之一.它还广泛分布于土壤和不同沉积物中,如湖泊、海洋、石笋中(Ternois *et al.*, 2001; 胡建芳, 2001; 黄咸雨等, 2007; 戴国华等, 2016).脂肪酸可以用来区分不同的有机质组成以及生物源,是人们了解生物地球化学过程、探究地质历史时期生物群落以及生活环境的关键地质记录(Morgunova *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2015).

广泛分布于土壤和沉积物中的脂肪酸具有重建古环境的潜力,但在边缘海陆架区的研究却很少涉及.研究表明,土壤脂肪酸除了来自高等植物的直接贡献之外,在酸性条件下还受到转化作用的影响(Moucawi *et al.*, 1981; Amblès *et al.*, 1994; Bull *et al.*, 2000; Nierop *et al.*, 2005).脂肪酸在土壤中的保存还受 pH 的影响.在低 pH 的土壤中,微生物活动受到抑制,微生物降解脂肪酸能力减弱,脂肪酸容易保存下来(戴国华等, 2016).在湖泊环境,营养水平直接影响脂肪酸的浓度.在营养水平高的湖泊环境,颗粒物脂肪酸浓度相应较高.脂肪酸组成在一定程度上还能反映浮游植物群落结构的变化(游江涛, 2006).

在海洋中,诸如脂肪酸的生物标志化合物也被

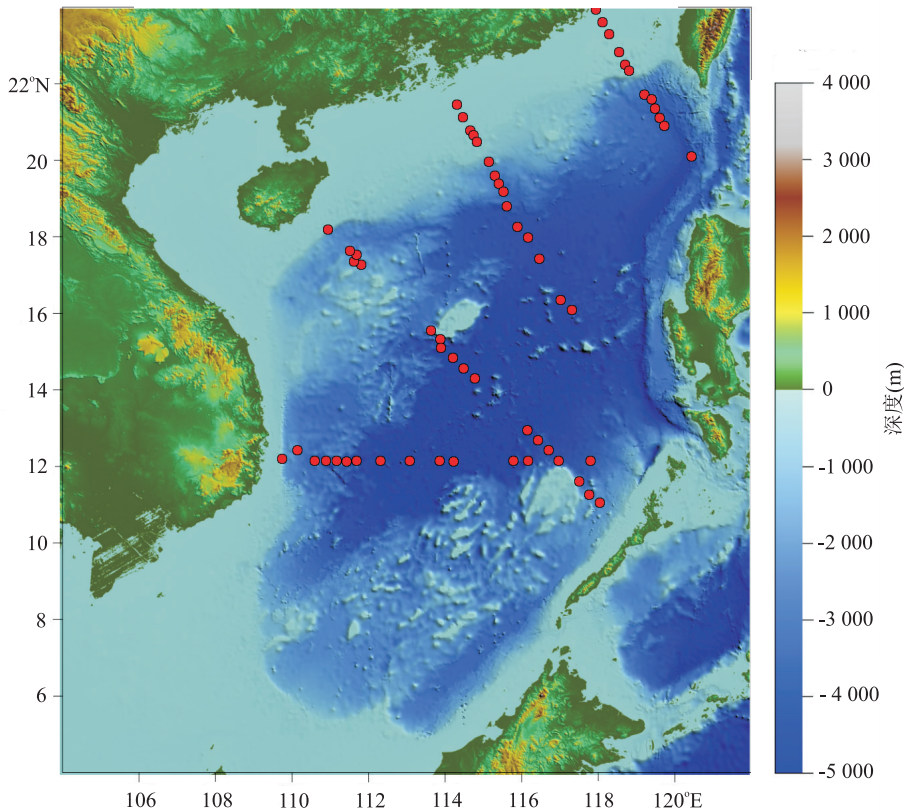


图 1 南海不同水深表层沉积物断面站位分布

Fig.1 Distribution of surface sediment samples collected from different water depths in the South China Sea

站位资料来源于广州海洋地质调查局内部资料

广泛用来研究海洋物质循环、迁移和埋藏等过程,用来定性或定量揭示海洋有机地球化学过程。例如, Ternois *et al.* (2001) 通过对西太平洋 Okhotsk 海域表层沉积物和沉积柱中脂肪酸的分析, 探究了 2 700 a 以来海相环境中陆源和海源有机物质输入量的变化。作为衔接陆地与大洋的枢纽, 边缘海的脂肪酸往往夹杂着陆地土壤、河流和海洋自生等多种不同来源的信号, 为解译脂肪酸所携带的原始信息带来很大困难。即便是同种输入载体, 也携带着不同生物脂肪酸的贡献。因此, 探究边缘海区域从陆架到深海盆表层沉积物中脂肪酸的分布特征, 了解其来源特征, 对进一步的古环境重建具有重要意义。

南海是西北太平洋最大的边缘海, 平均水深为 1 212 m, 最深处约 5 559 m。它通过一系列链式岛弧与毗邻的西北太平洋和印度洋分隔开来。南海海底地形复杂, 以环状分布的大陆架、大陆坡和中央海盆为主, 并从四周呈阶梯状朝中部海盆逐渐加深(尤丽等, 2018)。南部和北部具有宽阔的陆架并有大河(湄公河、红河、珠江等)注入, 东部和西部陆架狭小且无大河流入, 中间为东北—西南向深海盆, 呈半封闭状态。在南海北部, 特别是大陆架的沉积物主要是陆源碎屑沉积, 表层沉积物的分布表现为, 岸边是现代近海沉积、内陆架为混合沉积、外陆架为早期残留沉积(罗伟东等, 2018)。大陆坡表层沉积物的粒径具有上大陆坡粗而下大陆坡细的分布特征。流入南海的主要河流有珠江、韩江、鉴江和漠阳江。其中, 珠江和韩江两条大河是海区陆源物质供给的主要渠道(Wang *et al.*, 1995, 2011)。为了探究南海由陆架到深海盆区域脂肪酸的分布模式, 设计了 4 条不同水深表层沉积物的断面, 水深跨度为 30~4 405 m(图 1)。希望以此来寻找脂肪酸组成随水深的变化规律, 并且探讨海洋环境中脂肪酸的生物源变化。

1 样品采集与处理方法

1.1 样品采集

实验样品均来源于广州海洋地质调查局 4 个不同航次所采集的 4 条不同水深断面的 67 个表层沉积物, 水深跨度从 30 m 到 4 405 m, 包括了受河流输入影响较大的浅水陆架区和影响较小的中央海盆区。所有沉积物样品在广州海洋地质调查局进行分取, 用酒精清洗过的铲子将沉积物转移到高温煅烧的锡箔纸中, 然后用自封袋封装。待分样结束后, 用干冰将样品冷藏保存运回实验室, 将样品转移到

-20 °C 冰柜中, 待进行有机质提取。

1.2 有机质提取

将样品置于冷冻干燥机中进行冻干处理, 随后用研钵碾碎磨匀, 并过 60 目筛。所有样品均用超声萃取法进行有机质提取, 具体操作如下: 准确称量 15~30 g 沉积物样品, 倒入经超纯水清洗过的聚四氟乙烯离心管中, 加入约 30 mL 二氯甲烷: 甲醇 (9:1, v:v) 混合溶剂, 用涡旋振荡器混合均匀之后放入超声波浴中超声 15 min, 之后在离心机中 3 000 r/min 的转速下离心 5 min, 待溶液分层后, 分离萃取溶液和沉积物颗粒, 并重复加入混合溶剂萃取 3~5 次, 将萃取液全部转移至预先经过 500 °C 煅烧的干净烧瓶中。将烧瓶中的有机相在旋转蒸发仪上进行蒸发浓缩至 1~2 mL, 用二氯甲烷清洗烧瓶, 最后转移到 15 mL 的细胞瓶中。用氮气进行吹干, 待样品溶剂完全挥发后, 对样品进行柱层析分离。层析柱采用硅胶和无水硫酸钠填充, 分别用正己烷和甲醇进行洗脱。分为非极性组分和极性组分。在极性组分中加入皂化试剂 (0.5 mol KOH 溶于甲醇: 超纯水 95:5, v:v), 放入烘箱中 70 °C 下反应 2 h。取出待冷却后, 加入正己烷试剂, 并用涡旋振荡器混合均匀, 静置待分层后用滴管吸取上层溶液, 重复 4~5 次, 获取中性组分。随后往剩余溶液中加入萃取过的稀盐酸, 调节 pH 为 1~2, 重复上述正己烷萃取步骤, 获得酸性组分(脂肪酸)。将脂肪酸组分组用氮气吹干后, 加入 2 mL 甲酯化试剂(三氟化硼的甲醇溶液)在 70 °C 下进行衍生化反应 2 h, 随后用正己烷萃取上层清液。最后用氮气吹干, 待上机测试。

1.3 GC-MS 仪器测试条件

气相色谱—质谱联用仪为 Agilent 6890A/5975C MS, 色谱条件: 安捷伦 DB-5MS 石英毛细管柱 (60 m × 0.25 mm × 0.25 μm) 始温 70 °C, 先以 10 °C/min 的速率升到 210 °C, 然后以 3 °C/min 的速率升到 300 °C, 终温恒温 36 min, 进样口温度 300 °C, 不分流进样, 进样量 1 μL, 进样比例为 20 进 1, 载气为氦气。质谱条件: 电子轰击源, 电离能量 70 eV, GC 与 MS 接口温度 280 °C。

1.4 脂肪酸指标计算公式

$$\text{CPI} = 1/2 (\sum C_{20-30} (\text{偶碳}) / \sum C_{19-29} (\text{奇碳}) + (\sum C_{20-30} (\text{偶碳}) / \sum C_{21-31} (\text{偶碳})),$$

$$\text{L/H} = \text{sum}(nC_{20-}) / \text{sum}(nC_{20+}),$$

$$\text{ACL} = \sum (C_n \times n) / \sum C_n,$$

其中 C_n 代表 n 个碳的脂肪酸含量, n 的取值范围为 16~32。

本文脂肪酸采用统一标记方式,例如 $nC_{16:1}$, iC_{15} , aC_{15} 等,其中 n 代表直链化合物, i 代表异构化合物, a 代表反异构化合物,数字代表碳原子数量,冒号后面的数字为化合物中双键的个数。

2 结果与讨论

2.1 沉积物脂肪酸的分布特征和来源

南海不同水深表层沉积物中均检测出种类和含量丰富的脂肪酸,包括直链($nC_{14:0}$, $nC_{16:0}$ 等)与支链的饱和脂肪酸(aC_{15} , iC_{15} 等)以及直链的单不饱和脂肪酸($nC_{16:1}$, $nC_{18:1}$)。直链脂肪酸的碳数分布范围主要为 $nC_{12:0} \sim nC_{30:0}$, $nC_{16:0}$ 含量最高,呈现以低碳数为主的单峰型分布模式(图 2)。高碳数脂肪酸主要以 $C_{24:0}$ 为主,其次为 $nC_{22:0}$ 和 $nC_{26:0}$ 。脂肪酸的分布呈现出明显的偶奇优势。奇碳数脂肪酸主要以 $nC_{15:0}$ 和 $nC_{17:0}$ 为主。此外,异构和反异构脂肪酸(iC_{15} , iC_{17} 以及 aC_{15} 和 aC_{17})等在沉积物中均有检出,其中以 iC_{15} 含量最高。直链单不饱和脂肪酸 $nC_{16:1}$ 和 $nC_{18:1}$ 在海洋沉积物中较为常见,但是含量相对较低。

南海表层沉积物高碳数脂肪酸的碳优势指数 CPI 值,变化范围为 2.58~6.45(平均值为 3.89 ± 0.74 , $n=67$)。其中,浅水区 CPI 值较大,且 CPI 随着水深变化(0~200 m)逐渐减小,呈明显的线性关系($R^2=0.71$, $p<0.05$)。高碳数脂肪酸主要来源于陆地高等植物,随着水深的加大,受到河流带来的陆源输入的影响逐渐减小,CPI 值在浅水地区随水深的变化反映了河流输入的这种变化。脂肪酸的平均链长 ACL 变化范围为 16.92~19.98(平均值为 18.19 ± 0.85 , $n=67$) (图 3a);低碳数和高碳数脂肪酸含量的比值 L/H 变化范围为 1.64~8.31(平均值

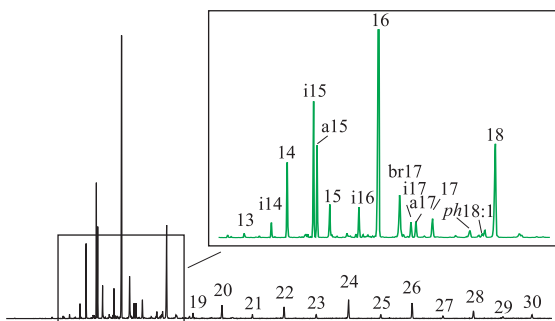


图 2 海洋沉积物样品 $m/z=74$ 质量色谱图

Fig.2 The $m/z=74$ mass chromatograph of fatty acids in marine sediments

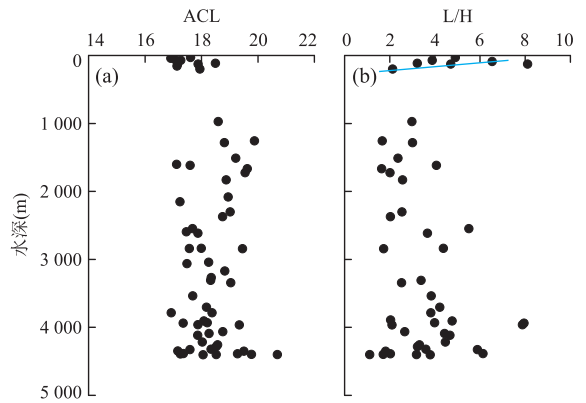


图 3 不同水深表层沉积物脂肪酸指标分布特征

Fig.3 The profile of FAs indices in the surface sediments from different water depths

a. 平均碳链长度 ACL 随水深的分布; b. 低碳数/高碳数脂肪酸随水深的分布

为 3.76 ± 1.86 , $n=67$) (图 3b)。在水深 0~200 m,随着水深逐渐增加,表层沉积物脂肪酸 L/H 呈现逐渐降低的趋势。这种变化趋势既可能与陆源高碳数脂肪酸比海源的低碳数脂肪酸更加稳定的性质有关(后者更容易降解),也可能与海洋微生物的生物量变化有关系(越浅的地区,微生物生物量越高)。

直链饱和脂肪酸 $nC_{14:0}$, $nC_{16:0}$ 和 $nC_{18:0}$ 等低碳数脂肪酸化合物广泛分布于高等植物蜡脂、海洋微藻以及细菌中(Zegouagh *et al.*, 1998)。前人研究表明,含量丰富的低分子量偶碳数脂肪酸($nC_{12:0} \sim nC_{20:0}$)可以作为微藻有机质在原地生长的标志(Johns *et al.*, 1994; Sun and Wakeham, 1994)。此外,海洋微藻具有合成大量的二十碳五烯酸($C_{20:5}$ FAs)和二十二碳六烯酸($C_{22:6}$ FAs)的能力(张小葵等, 2000),经过成岩转化也可以形成饱和脂肪酸。

直链单不饱和脂肪酸 $nC_{16:1}$ 和 $nC_{18:1}$ 可能来源于水生藻类和细菌的贡献(Zegouagh *et al.*, 1998)。 $C_{16:1}/C_{16}$ 和 $C_{18:1}/C_{18}$ 的分布范围分别为 0~0.15(平均值为 30.04 ± 0.04 , $n=67$)和 0~0.64(平均值为 0.17 ± 0.19 , $n=67$)。其中 $C_{16:1}/C_{16}$ 和 $C_{18:1}/C_{18}$ 的比值之间有良好的线性关系($R^2=0.32$, $p<0.05$),表明其来源可能相近,均代表着藻类和细菌的贡献,或者可能是微生物对不饱和脂肪酸降解作用的反映。

在奇碳数支链脂肪酸中, C_{15} 的异构和反异构化合物含量较高。其中, aC_{15} 和 iC_{15} 的含量随着水深的变化产生较大差异,含量变化范围分别为 0~ $78.2 \mu\text{g/g} \cdot \text{TOC}$ (平均值为 11.6 ± 16.6 , $n=67$), 0~ $74.4 \mu\text{g/g} \cdot \text{TOC}$ (平均值为 10.3 ± 13.5 , $n=$

67). iC_{15} 和 aC_{15} 含量之间存在显著相关性 ($R^2 = 0.86, p < 0.01$), 表明两者可能反映同样的来源。前人研究表明, 这些支链脂肪酸(异构和反异构)通常被认为是硫酸盐还原菌的生物标志化合物(黄咸雨等, 2007), 但是由于其他细菌也能产生这些支链脂肪酸, 因而 iC_{15} 和 aC_{15} 可以用来指示细菌在表层沉积物的输入贡献。支链 iC_{15} 和 aC_{15} 的分布随着水深的增加并未表现出明显的趋势, 可能受到河流输入的影响较小。

2.2 脂肪酸指示生物源的空间变化

前面提到脂肪酸来源复杂, 不同碳链长度、直链与支链脂肪酸、饱和与不饱和脂肪酸的来源均有所不同。下面重点讨论一下脂肪酸在南海表层沉积物的空间分布模式, 及其所指示生物源的空间变化。这里用高碳数脂肪酸化合物 ($n \geq 20$) 的含量(相对含量, 均指相对于 TOC 的含量, 以消除沉积速率的影响)来指示高等植物的输入贡献, 用直链低碳数脂肪酸化合物 ($nC_{12:0} \sim nC_{20:0}$) (Johns *et al.*, 1994; Sun and Wakeham, 1994), 以及用异构脂肪酸与反异构脂肪酸的含量分别指示南海区域浮游植物和细

菌的分布。尽管诸如 C_{16} 直链脂肪酸可能受高等植物源的影响, 但考虑到来自高等植物的高碳数脂肪酸含量较少, 低碳数直链脂肪酸主要还是海洋浮游植物的贡献为主。

2.2.1 陆源高等植物输入的空间变化

陆源高等植物输入的高碳数脂肪酸 (nC_{20+}) 含量在南海北部珠江口流域表现出高值分布, 主要受到河流输入的影响。随着离岸距离的增加, 表现出逐渐降低的趋势。但是, 在吕宋海峡和南海深海盆区域又表现出一些较高值(图 4)。在南海北部区域, 由于受到河流输入的影响, 陆源输入的高等植物脂肪酸较多。但随着水深逐渐增加, 受到陆源输入的影响逐渐降低。因此河流输入可能是南海北部高碳数脂肪酸分布的主要控制因素。刘志飞等(2007)通过对珠江流域表层沉积物的黏土矿物研究, 发现南海北部区域黏土矿物分布不存在明显差异性, 并且珠江对南海北部陆源区域的贡献较大。黏土矿物的结果和南海北部脂肪酸的分布吻合。

在吕宋海峡区域出现高碳数脂肪酸的异常高值, 可能是海流输入所致。吕宋海峡是连接太平洋与

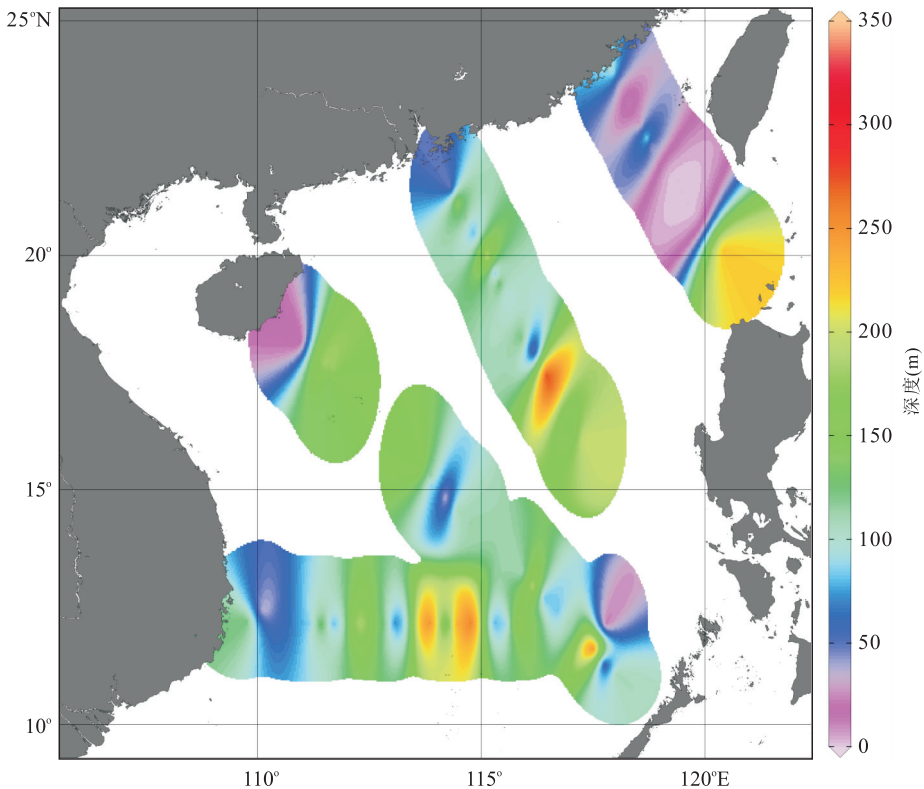


图 4 指示陆源高等植物输入的高碳数脂肪酸相对含量在南海表层沉积物的空间分布模式

Fig.4 Spatial distribution of long-chain FAs abundance normalized to TOC content indicative of the terrestrial higher plant contribution to the surface sediments of the SCS

图中 nC_{20+} 代表高碳数 ($n \geq 20$) 脂肪酸浓度, 单位为 $\mu\text{g/g} \cdot \text{TOC}$

南海之间的唯一的深水通道,在两者水团交换中起到重要作用.并且黑潮的分支在冬季通过吕宋海峡进入南海,携带的高温高盐海水对流经区域生物种类和丰度产生较大的影响(邵全琴等, 2005; 刘子琳等, 2006).黑潮对流经海域的陆源输入同样会产生较大贡献.尤其在冰期海平面下降时期,陆源物质大量输入海洋,作为黑潮主流径的台湾以东海域和冲绳海槽均已发现有大量的陆源物质输入(李凤业等, 1999; Hsu *et al.*, 2006; 孟宪伟等, 2007).因此在吕宋海峡区域,黑潮入侵对陆源有机质输入的贡献是不可忽略的.

在南海深海盆,也出现高碳数脂肪酸相对丰度的高值,可能不是受到河流输入的影响,因为河流输入的量随着离岸距离的增加而逐渐降低(图 4).这些高值可能与其他输入有关,如洋流、风尘输入等等.这些重要输入源有待于进一步调查.

2.2.2 浮游植物源的空间变化 低碳数脂肪酸(nC_{20-})指示的微藻贡献在空间上也有一定的分布规律.总体来说,由于南海是寡营养海域,藻类及其有机质的贡献相对较少.在珠江口区域以及湄公河流域,微藻的贡献较多,含量相对丰富.随着离岸距离增加,微藻含量显著降低.在吕宋海峡附近同样有着较高的贡献,可能与黑潮在冬季由太平洋输入到南海有关.在南海北部区域,藻类的贡献呈现出“高低高”的分布趋势,可能与南海北部区域季节性营养元素缺失有关.在珠江口地区,河流输入南海过程中磷酸盐逐渐被消耗,导致在某些区域会产生磷元素缺失,导致浮游植物的生长受到抑制(Yin *et al.*, 2001).而深海盆本身营养元素较少,藻类的生长可能会受到明显的抑制.

由于 C_{16} 脂肪酸可能受到陆源高等植物输入的

影响,为了进一步更好地揭示深海盆浮游植物的空间分布,这里再通过对低碳数脂肪酸 C_{14} 和 C_{20} 单个化合物的相对含量来反映浮游植物的贡献(图 5). C_{14} 和 C_{20} 脂肪酸在南海北部分布特征与低碳数脂肪酸(nC_{20-})分布模式基本相同,均在沿岸区域呈现出高值.但是, C_{20} 脂肪酸略有差异.它在南海北部汕头区域和越南海域附近均呈现明显的河流输入影响.然而,在珠江口海域至深海盆延伸过程中并未表现出较为明显的含量分布差异,可能与复杂的来源有关.在吕宋海峡区域, C_{14} 和 C_{20} 脂肪酸均表现出含量相对升高的分布模式,二者同样可能受到黑潮输入的影响.在深海盆的部分区域, C_{14} 和 C_{20} 脂肪酸并未表现出明显的低含量分布.相反,其在深海盆的含量与沿岸陆架区的相当.推测深海盆的低碳数脂肪酸分布模式可能受到营养条件,或者受到上升流作用以及其他海流输入的影响.

总的来说,沿着南海陆架区到深海盆区域,浮游植物在空间上存在明显差异.一方面,可能是由于南海地区藻类的种类不同所致.受到中低纬度高温影响,南海硅藻分布主要为热带和亚热带暖水种(冉莉华和蒋辉, 2005),可能会产生不同的脂肪酸分布特征.另一方面,可能受到南海局地营养盐的限制,南海北部浮游植物总体受到氮、磷营养元素的共同限制(马威等, 2016).但在某些局地环境下,可能受到单一元素的限制.例如,在珠江口近岸表现出受磷元素的限制.在海南岛地区,同样受到元素的限制,导致浮游植物的贡献较低.在深海盆的一些区域,低碳数脂肪酸指示浮游植物表现出较高值的分布,可能与外源输入营养元素、上升流或者其他海流等原因有关系.

2.2.3 细菌等微生物的空间变化 前面已经提到,

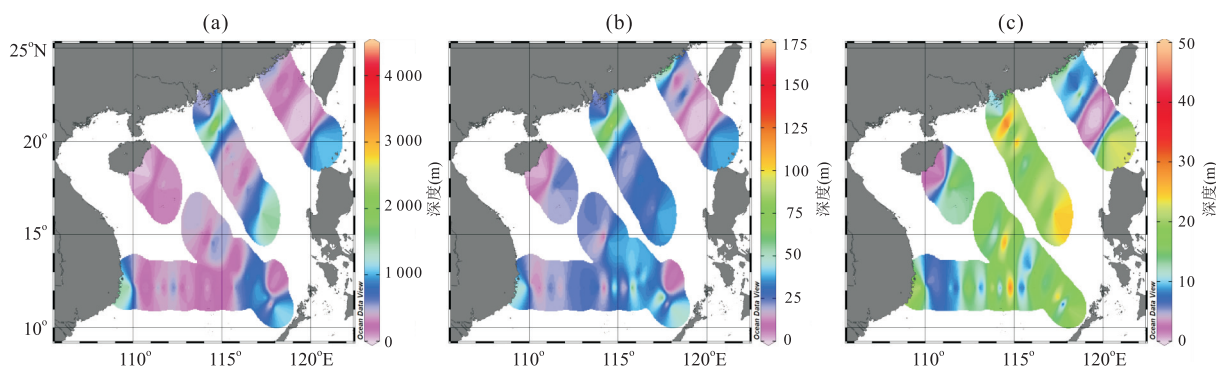


图 5 来自浮游植物的生物标志化合物相对含量在南海表层沉积物的分布模式

Fig.5 Spatial distribution of phytoplankton biomarkers relative to TOC content in the surface sediments of the SCS

a. 低碳数脂肪酸的总含量分布; b. C_{14} 脂肪酸的含量分布; c. C_{20} 脂肪酸的含量分布. 单位为 $\mu\text{g/g} \cdot \text{TOC}$

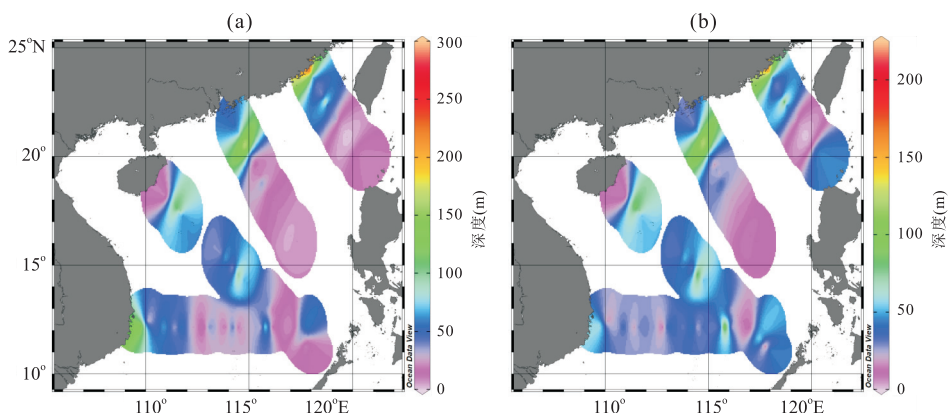


图 6 细菌来源的异构脂肪酸 iC_{15} 化合物(a)和反异构脂肪酸 aC_{15} (b)在南海表层沉积物的分布

Fig.6 Spatial distribution of bacterial abundance based on the iC_{15} (a) and the aC_{15} (b) FAs abundance normalized to TOC content in the surface sediments of the SCS

图中 iC_{15} 和 aC_{15} 分别代表异构和反异构 C_{15} 脂肪酸,单位为 $\mu\text{g}/\text{g} \cdot \text{TOC}$

异构脂肪酸代表着细菌等微生物的贡献.这里通过探讨 iC_{15} 和 aC_{15} 相对含量的变化来表征细菌在南海表层沉积物的空间分布特征.随着沉积物水深的逐渐增加,尤其是在南海北部, iC_{15} 和 aC_{15} 表征的细菌相对丰度呈现出明显的降低趋势;在深海盆区域,表征的细菌相对丰度较低,但是 aC_{15} 在深海盆中心呈现出相对增加的趋势(图 6).这样的结果与前人对南海北部海水中细菌丰度研究结果一致.即从珠江口到南海北部海域,细菌总数以及细菌生产力呈现逐渐降低的趋势.但是,从图 6 中可以看出,在主要河流输入区域,如珠江口、韩江、越南沿岸等地,细菌相对丰度均表现出高值,这可能与细菌生长方式有关.细菌的生长受控于环境因素的影响,营养盐、温度、氧气等均控制着细菌的生产力分布.河流输入的水体,营养盐含量较高,但随着海水的稀释作用而逐渐下降.这可能是影响南海沿岸细菌来源的异构脂肪酸分布的主要原因.水体中的营养盐是细菌维持生命活动、生长繁殖的最重要营养源,并且细菌的生产力与氮、磷元素同样存在着显著的正相关关系.由于受到南海北部局地营养元素缺失的影响,微生物的贡献也呈现出局地的变化.在南海北部陆坡等区域,细菌的相对丰度显著降低,这可能与前面介绍的南海陆坡地区磷元素的缺失有关.在南海深海盆,细菌的相对丰度也呈现出低值,除了营养元素以外,温度可能也是一个重要原因.海水温度影响着海洋细菌的新陈代谢能力,直接对细菌生产力产生较大影响.温度过高会导致微生物的新陈代谢活动降低,从而抑制微生物的生长.此外,水温可能影响深海盆初级生产力的贡献,导致海域溶解有机质的含量发生变

化,从而对细菌生产力产生间接影响.南海深海盆温度较高,约为 $29 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.不同细菌种类的最适生长温度可能产生差异,而且在不同温度下微生物群落可能也会发生变化.因此在探讨南海细菌分布特征时,温度的影响也是不可忽略的因素之一.

3 结论

(1)在南海不同水深的表层沉积物中均检出丰富的脂肪酸,包括直链($nC_{12} \sim nC_{30}$)和支链(iC_{15} 和 aC_{15})饱和脂肪酸,以及直链单不饱和脂肪酸($nC_{16:1}$, $nC_{18:1}$)等.直链脂肪酸表现为以低碳数为主的单峰型分布.低碳数脂肪酸可能与浮游藻类贡献以及细菌贡献为主,而高碳数脂肪酸主要以陆源高等植物贡献为主.

(2)高碳数脂肪酸所表征的陆源高等植物输入在南海北部较高,可能与南海周边河流输入有关.在吕宋海峡区域的高值可能与黑潮入侵携带大量陆源有机质有关.在深海盆的高值不可能是受到河流输入的影响,推测可能是洋流、风尘输入等造成的.

(3)低碳数直链饱和脂肪酸在南海北部表层沉积物有较高的分布,可能与珠江口人类活动导致水体营养盐含量较高、浮游植物生产力较高有关.在南海陆坡区域,随着营养盐的逐渐消耗,浮游植物的生长受到抑制,导致低碳数脂肪酸含量降低.在吕宋海峡区域脂肪酸含量较高,可能受到黑潮入侵的影响.在南海深海盆,较高的浮游植物贡献可能受到风尘物质以及上升流等洋流作用的影响.

(4)异构和反异构脂肪酸(iC_{15} 和 aC_{15})的相对

丰度显示,细菌的分布同样在南海北部陆架表层沉积物中含量相对较高,并且在主要河流输入区域均表现出较高值。随着离岸距离变大,细菌生产力逐渐降低,这与营养盐的变化有关。在南海深海盆, aC_{15} 含量有增加的趋势,可能指示某些细菌群落的变化。

致谢:本研究受国家重点研发计划项目(2016YFA0601100)和自然资源部广州海洋地质调查局项目(GZH201500202)资助,两位审稿人提出了宝贵的修改意见,在此一并致以诚挚的感谢!

References

- Ambles, A., Jambu, P., Parlanti, E., et al., 1994. Incorporation of Natural Monoacids from Plant Residues into a Hydromorphic Forest Podzol. *European Journal of Soil Science*, 45(2): 175–182.
- Bull, I. D., Nott, C. J., van Bergen, P. F., et al., 2000. Organic Geochemical Studies of Soils from the Rothamsted Classical Experiments—VI. The Occurrence and Source of Organic Acids in an Experimental Grassland Soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(10): 1367–1376.
- Dai, G. H., Zhu, S. S., Liu, Z. G., et al., 2016. Distribution of Fatty Acids in the Alpine Grassland Soils of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 46(6): 756–766 (in Chinese).
- Feng, X. J., Simpson, M. J., 2007. The Distribution and Degradation of Biomarkers in Alberta Grassland Soil Profiles. *Organic Geochemistry*, 38(9): 1558–1570.
- Hsu, S. C., Kao, S. J., Jeng, W. L., 2006. Quantitative Links between Fluvial Sediment Discharge, Trapped Terrigenous Flux and Sediment Accumulation, and Implications for Temporal and Spatial Distributions of Sediment Fluxes. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(2): 241–252.
- Hu, J. F., 2001. Molecular Organic Geochemistry Approach for Reconstruction of the Paleoenvironment, Nansha Area, South China Sea since the Last 30 ka Years (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Huang, X., Zeng, Z. G., Chen, S., et al., 2015. Abundance and Distribution of Fatty Acids in Sediments of the South Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Ocean University of China*, 14(2): 277–283.
- Huang, X. Y., Pu, Y., Cui, J. W., et al., 2007. Distributions of Fatty Acids in the Drip Water at Heshang Cave, Hubei Province and Their Ecological Implications. *Quaternary Sciences*, 27(3): 401–407 (in Chinese with English abstract).
- Johns, R. B., Brady, B. A., Butler, M. S., et al., 1994. Organic Geochemical and Geochemical Studies of Inner Great Barrier Reef Sediments—IV. Identification of Terrigenous and Marine Sourced Inputs. *Organic Geochemistry*, 21(10–11): 1027–1035.
- Kögel-Knabner, I., 2002. The Macromolecular Organic Composition of Plant and Microbial Residues as Inputs to Soil Organic Matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(2): 139–162.
- Li, F. Y., Shi, Y. L., He, L. J., et al., 1999. Relationship between the Variations in Sedimentation Rates and Sedimentation Environments in the Okinawa Trough since the Late Pleistocene. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 30(5): 540–545 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. F., Colin, C., Huang, W., et al., 2007. Clay Minerals of Surface Sediments in the Pearl River Basin and Their Contribution to the Sediments in South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 448–456 (in Chinese).
- Liu, Z. L., Chen, Z. Y., Zhou, B. F., et al., 2006. The Seasonal Distribution of the Standing Stock of Phytoplankton in the Source Area of the Kuroshio and Adjacent Areas. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (1): 58–63 (in Chinese with English abstract).
- Luo, W. D., Zhou, J., Li, X. J., et al., 2018. Morphology and Structure and Evolution of West Basin Canyon, South China Sea. *Earth Science*, 43(6): 2172–2183 (in Chinese with English abstract).
- Ma, W., Sun, J., Xue, B., et al., 2016. Phytoplankton Community Structure of Northern South China Sea in Autumn of 2010. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(4): 43–53 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. W., Du, D. W., Liu, Y. G., et al., 2007. Terrestrial Flux in Sediments from the Okinawa Trough and Its Response to Climate Changes over the Past 35 000 a. *Acta Oceanologica Sinica*, 29(5): 74–80 (in Chinese with English abstract).
- Morgunova, I. P., Ivanov, V. N., Litvinenko, I., et al., 2012. Geochemistry of Organic Matter in Bottom Sediments of the Ashadze Hydrothermal Field. *Oceanology*, 52(3): 345–353.
- Moucawi, J., Fustec, E., Jambu, P., et al., 1981. Decomposition of Lipids in Soils: Free and Esterified Fatty Acids, Alcohols and Ketones. *Soil Biology and Biochemistry*, 13(6): 461–468.
- Nierop, K. G. J., Naafs, D. F. W., van Bergen, P. F., 2005. Origin, Occurrence and Fate of Extractable Lipids in Dutch Coastal Dune Soils along a pH Gradient. *Organic Geochemistry*, 36(4): 555–566.

- Otto, A., Simpson, M. J., 2005. Degradation and Preservation of Vascular Plant-Derived Biomarkers in Grassland and Forest Soils from Western Canada. *Biogeochemistry*, 74 (3): 377—409.
- Ran, L. H., Jiang, H., 2005. Distributions of the Surface Sediment Diatoms from the South China Sea and Their Palaeoceanographic Significance. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 22 (1): 97—106 (in Chinese with English abstract).
- Shao, Q. Q., Ma, W. W., Chen, Z. Q., et al., 2005. Relationship between Kuroshio Meander Pattern and *Ommastrephes Bartrami* Cpue in Northwest Pacific Ocean. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 36(2): 111—122 (in Chinese with English abstract).
- Sun, M. Y., Wakeham, S. G., 1994. Molecular Evidence for Degradation and Preservation of Organic Matter in the Anoxic Black Sea Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(16): 3395—3406.
- Ternois, Y., Kawamura, K., Keigwin, L., et al., 2001. A Biomarker Approach for Assessing Marine and Terrestrial Inputs to the Sediments of Sea of Okhotsk for the Last 27 000 Years. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(5): 791—802.
- Wang, G. H., Xie, S. P., Qu, T. D., et al., 2011. Deep South China Sea Circulation. *Geophysical Research Letters*, 38 (5): 3115—3120.
- Wang, P. X., Wang, L. J., Bian, Y. H., et al., 1995. Late Quaternary Paleooceanography of the South China Sea: Surface Circulation and Carbonate Cycles. *Marine Geology*, 127 (1—4): 145—165.
- Yin, K. D., Qian, P. Y., Wu, M. C. S., et al., 2001. Shift from P to N Limitation of Phytoplankton Growth across the Pearl River Estuarine Plume during Summer. *Marine Ecology Progress Series*, 221: 17—28.
- You, J. T., 2006. The Composition of Seston Fatty Acids and Structure of Phytoplankton Communities in Tropical and Subtropical Lakes and Reservoirs (Dissertation). Jínan University, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- You, L., Zhong, J., Zhang, Y. Z., 2018. Petrography-Geochemistry and Source Significance of Western Canyon Channel of Northern South China Sea. *Earth Science*, 43(2): 514—524 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. K., Mai, K. S., Guo, J., et al., 2000. Advances in the Studies of the Growth and PUFAs of *Porphyridium*. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (2): 66—70 (in Chinese).
- Zegouagh, Y., Derenne, S., Largeau, C., et al., 1998. Organic Matter Sources and Early Diagenetic Alterations in Arctic Surface Sediments (Lena River Delta and Laptev Sea, Eastern Siberia), II: Molecular and Isotopic Studies of Hydrocarbons. *Organic Geochemistry*, 28 (9—10): 571—583.

附中文参考文献

- 戴国华, 朱珊珊, 刘宗广, 等, 2016. 青藏高原高寒草地土壤中脂肪酸的分布特征. *中国科学: 地球科学*, 46 (6): 756—766.
- 胡建芳, 2001. 3 万年来南沙海区古气候、古环境演变: 分子有机地球化学研究(博士学位论文). 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 黄咸雨, 蒲阳, 崔景伟, 等, 2007. 湖北清江和尚洞洞穴滴水脂肪酸分布特征及其古生态意义. *第四纪研究*, 27(3): 401—407.
- 李凤业, 史玉兰, 何丽娟, 等, 1999. 冲绳海槽晚更新世以来沉积速率的变化与沉积环境的关系. *海洋与湖沼*, 30(5): 540—545.
- 刘志飞, Colin, C., 黄维, 等, 2007. 珠江流域盆地表层沉积物的黏土矿物及其对南海沉积物的贡献. *科学通报*, 52 (4): 448—456.
- 刘子琳, 陈忠元, 周蓓锋, 等, 2006. 黑潮源区及其邻近海域叶绿素 a 浓度的季节分布. *海洋湖沼通报*, (1): 58—63.
- 罗伟东, 周娇, 李学杰, 等, 2018. 南海海盆西峡谷的形态与结构及形成演化. *地球科学*, 43(6): 2172—2183.
- 马威, 孙军, 薛冰, 等, 2016. 2010 年秋季南海北部浮游植物群落结构研究. *海洋学报* 38(4): 43—53.
- 孟宏伟, 杜德文, 刘焱光, 等, 2007. 冲绳海槽近 3.5 万 a 来陆源物质沉积通量及其对气候变化的响应. *海洋学报*, 29 (5): 74—80.
- 冉莉华, 蒋辉, 2005. 南海某些表层沉积硅藻的分布及其古环境意义. *微体古生物学报*, 22(1): 97—106.
- 邵全琴, 马巍巍, 陈卓奇, 等, 2005. 西北太平洋黑潮路径变化与柔鱼 CPUE 的关系研究. *海洋与湖沼*, 36 (2): 111—122.
- 游江涛, 2006. 热带亚热带典型水库和湖泊中浮游植物群落结构与颗粒物脂肪酸组成特征的研究(硕士学位论文). 广州: 暨南大学.
- 尤丽, 钟佳, 张迎朝, 等, 2018. 南海北部中央峡谷水道的岩相—地球化学特征及其源区性质. *地球科学*, 43(2): 514—524.
- 张小葵, 麦康森, 郭建, 等, 2000. 紫球藻的生长及高不饱和脂肪酸的研究现状. *海洋湖沼通报*, (2): 66—70.