

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017070201

# 南极罗斯海柱样沉积物中有机碳和氮元素地球化学特征及其来源

修淳<sup>1,2</sup>, 霍素霞<sup>1</sup>, 周勳佳<sup>2,3</sup>, 张旭<sup>2,3</sup>, 邢健<sup>2,3</sup>, 徐美娜<sup>2,3</sup>

1. 自然资源部北海环境监测中心, 青岛 266033

2. 自然资源部东海海洋环境调查勘察中心, 上海 200137

3. 上海东海海洋工程勘察设计院, 上海 200137

**摘要:** 南极周边海域沉积物中的有机碳和氮元素地球化学特征对于深入研究全球碳循环和海洋生态环境演变具有重要意义。本文对取自南极罗斯海的 RBA08C 柱状样沉积物进行了有机碳和氮元素地球化学特征分析。结果表明: RBA08C 柱样中 TOC 含量在顶部 0~12cm 呈现随柱深增加而降低的趋势, 自 12cm 以深含量总体相对稳定; TN 总体具有与 TOC 相同的变化趋势, 两者含量变化呈现较强正相关性, 说明可能具有相同来源; 沉积物 TOC/TN 比值和  $\delta^{13}\text{C}$  值揭示 RBA08C 柱样有机质主要为海洋生源沉积, 其含量变化应主要受控于上层水体生产力、沉积速率和氧化还原环境等因素的共同作用; RBA08C 柱样的 TOC 埋藏率约为 50%, 与位于普里兹湾埃默里冰架边缘的 IS-4 站柱样相同, 加之较为相近的 TOC 和 TN 含量及变化趋势, 表明两者可能具有相近的沉积速率, 其所在的海区是南极海域较重要的碳循环和碳储区。

**关键词:** 有机碳和氮; 有机质来源; 埋藏率; 柱样沉积物; 南极罗斯海

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

## Geochemical characteristics and source of organic carbon and nitrogen in the column sediments from the Ross Sea, Antarctica

XIU Chun<sup>1,2</sup>, HUO Suxia<sup>1</sup>, ZHOU Mengjia<sup>2,3</sup>, ZHANG Xu<sup>2,3</sup>, XING Jian<sup>2,3</sup>, XU Meina<sup>2,3</sup>

1. North China Sea Environmental Monitoring Center of Ministry of Natural Resources, Qingdao 266033, China

2. East Sea Marine Environmental Investigating and Surveying Center of Ministry of Natural Resources, Shanghai 200137, China

3. Shanghai East Sea Marine Engineering Survey and Design Institute, Shanghai 200137, China

**Abstract:** The geochemical characteristics of organic carbon and nitrogen in the Antarctic marine sediments are of great significance to the study of the global carbon cycle and marine ecological environment. In this paper, the geochemical characteristics of organic carbon and nitrogen in sediments of Core RBA08C collected from the Ross Sea, Antarctica were discussed. TOC content at the top 0~12cm shows a decreasing trend with depth, and the TOC below the core depth of 12cm remains relatively stable. The content of TN was totally the same as that of TOC, and the positive correlation between the two probably indicate that they came from same source. The TOC/TN ratio and  $\delta^{13}\text{C}$  values reveal that the organic matters and its change in content should be collectively controlled by upper water productivity, deposition rate and redox environment and mainly from the marine biogenic deposition. The TOC burial rate of the Core RBA08C is about 50%, the same as that of the Core IS-4 at the edge of the Emory Ice Shelf, Prydz Bay. Coupled with the similar contents and change trend of TOC and TN, it suggest that their deposition rates are similar.

**Key words:** TOC and TN; source of organic matter; burial rate; core sediment; Ross Sea

碳、氮元素作为基础生源要素在生物地球化学过程中具有不容忽视的作用<sup>[1]</sup>。海洋与大气进行着复杂的碳交换, 是全球最大的碳储库。海水吸收的

一部分  $\text{CO}_2$  通过生物泵等机制作用迁移至海底沉积物中贮存, 在一定条件下又可被重新释放至海水乃至大气中。沉积物中的碳含量在一定程度上指示

资助项目: 南极周边海域海洋地质考察专题“晚第四纪南极周边海域古环境演变记录”(CHINARE2016-01-02); 海洋公益性行业科研专项(201105003-2)

作者简介: 修淳(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要从事海洋地质学与沉积地球化学研究, E-mail: xiuch\_geo@yeah.net

收稿日期: 2017-07-02; 改回日期: 2017-11-04. 周立君编辑

了海洋吸收  $\text{CO}_2$  的净通量,也是研究全球碳循环及收支平衡的有效指标<sup>[2]</sup>。氮是营养盐的重要组成部分,与海洋浮游植物的生长关系密切<sup>[3]</sup>。海洋沉积物中的氮扮演着与碳元素类似的“源”和“汇”的角色,其赋存、迁移、埋藏和释放过程与机制对于维持海洋生态系统的平衡具有重要意义。

南大洋面积广阔,占世界大洋面积的 15%~20%,对  $\text{CO}_2$  具有很强的吸收能力,学者们就此在该区开展了基于碳循环的海气交换作用研究<sup>[4-7]</sup>。据估算,南大洋对大气  $\text{CO}_2$  的净吸收贡献接近 40%,尤其是 50°S 以南的大洋对  $\text{CO}_2$  的净吸收起到了极其重要的作用<sup>[8]</sup>。同时,南大洋的锋面系统结构产生的水文动力学差异以及海水中某些元素浓度的制约也影响了浮游植物的生产力<sup>[9-12]</sup>,生产力的变化又进一步影响水体-沉积物中碳、氮元素的转化、迁移和赋存。

前人对南大洋沉积物中有机碳 (TOC) 和总氮 (TN) 含量与分布特征进行了研究,但多以南极半岛周边海域和普里兹湾表层沉积物为主<sup>[2,13-15]</sup>,对罗

斯海地区柱状样沉积物 TOC 和 TN 的纵向变化却鲜有涉及。本文通过对罗斯海 RBA08C 柱状样沉积物中的 TOC 和 TN 进行分析,探讨了 TOC 和 TN 纵向分布特征,并基于 TOC/TN 比值和  $\delta^{13}\text{C}$  判断了有机质来源,为罗斯海乃至南大洋的生物地球化学过程与碳循环研究提供科学依据。

## 1 区域概况

罗斯海 (72°~85°S, 160°E~160°W) 位于南大洋太平洋扇区内的西南极大陆边缘,西临南极大陆横断山脉和维多利亚地,东靠玛丽伯德地,南接巨大的罗斯冰架,北通太平洋 (图 1)。其水深为 200~3600m,具有北浅南深的特点,即由海向陆朝罗斯冰架逐步加深<sup>[16]</sup>。罗斯海湾陆缘区宽达 850km,长达 1500km,展布面积约  $75 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,由于其南部被罗斯冰架所覆盖,因此罗斯海通常是指罗斯海湾 78°S 以北的区域。

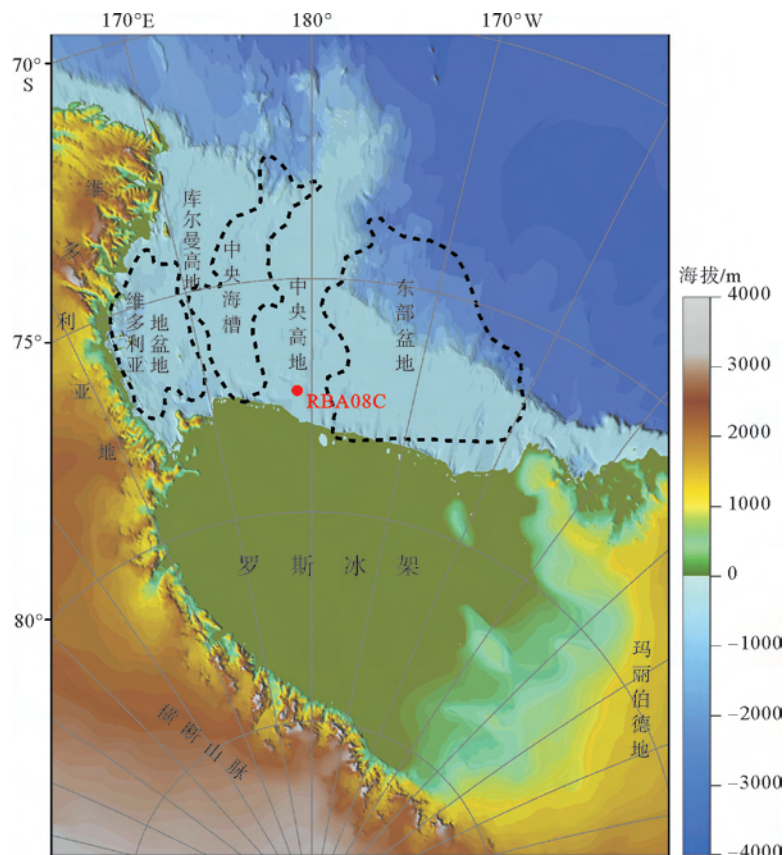


图 1 南极罗斯海区域概况

Fig.1 Regional geological setting of the Ross Sea, Antarctic

罗斯海是南极调查研究程度相对较高的区域之一。自 20 世纪 60 年代以来,多国在本区有计划地开展了地质与地球物理调查。Cooper 等<sup>[17,18]</sup>根据罗斯海地区地质及地震地层特征,划分出两期构造演化阶段,即晚侏罗世或早白垩世至晚白垩世的早期裂谷阶段和始新世至今的晚期裂谷阶段。与之相对应,发育了两期受张裂作用控制的 SW 向和 NW 向断裂。多道地震资料揭示罗斯海有 3 个主要沉积中心,即维多利亚盆地、中央海槽和东部盆地(图 1),其间分布着库尔曼高地和中央高地。东部盆地和中央海槽沉积物厚度达 5~6km<sup>[19]</sup>,维多利亚盆地则形成了一套始自晚白垩纪或早新生代以来的厚度逾万米的沉积序列<sup>[20]</sup>。

## 2 材料与方 法

### 2.1 样品采集

本文样品来源于“南极周边海洋地质考察”专项第 32 次南极科学考察所采 RBA08C 柱状样,使用重力取样器获取柱状连续无扰动沉积物样品。采样站位位于罗斯海,地理坐标 77°23′24″ S、178°59′54″ E,采样水深 738m,柱长 191cm。采收后进行冷冻保存,带回实验室进行分样及分析测试。将柱状样管剖开,自顶部向下以 2cm 为间隔分样,对奇数层的 48 个样品进行 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$  以及粒度的测试。

### 2.2 分析方法

TOC 和 TN 含量测定采用 Elementar Vario Cube 有机元素分析仪,在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。将样品冷冻干燥后研磨至 200 目,称取 0.5g 样品置于试管内,加入 6mL 浓度为 1mol/L 的 HCl,在超声条件下反应 3h 去除无机碳,其中 6mL 的 HCl 分两次添加。之后,将其在 2500r/min 转速下离心 5min,去除上清液,加入高纯水后再次离心,去除上清液,重复 3 次,直至冲洗至中性。最后将样品冷冻干燥称重,准确称取 30mg 样品,用锡纸包裹后放入元素分析仪中测试。在测试过程中,以沉积物标准物质 GBW07314 作为质量控制,设置平行样进行对比,测量结果的相对标准偏差小于 1%。

$\delta^{13}\text{C}$  值于青岛海洋地质研究所采用 Thermo MAT253 同位素比值质谱仪进行测量。取 0.5g 样品于聚丙烯材质的具盖离心管中,缓慢滴加 5mL 浓度为 10% 的盐酸,充分摇匀,待反应结束后于室温下敞口静置 8~12h,期间再次摇匀 2~3 次。之后,于 2500r/min 转速下离心 5min,弃除上清液。加入 5mL 高纯水充分摇匀,离心 5min 后弃除上清液。上述过程共重复 3 次,直至上清液洗至近中性。将上述处理好的样品于 -20℃ 预冻后,再于 -50℃ 以下真空冷冻干燥 24h。将干燥好的样品研磨成粉,待上机测定。测量结果的标准偏差小于 0.2%。

粒度测试在青岛海洋地质研究所完成,仪器为 Mastersizer2000 型激光粒度仪。筛选出粒径小于 2mm 的样品,经双氧水去除有机质、醋酸去除钙质壳体以及用氢氧化钠溶液去除生源蛋白石后,加入适量的六偏磷酸钠煮沸 1min 之后上机测试。该仪器测量范围为 0.02~2000 $\mu\text{m}$ ,对同一样品平均粒径的重复性测试偏差不超过 1%。

## 3 结果与讨论

### 3.1 TOC、TN 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的纵向变化

RBA08C 柱状沉积物中 TOC 含量为 0.25%~1.42%,平均为 0.38%,高于深海沉积物中 0.2% 的有机质平均含量<sup>[21]</sup>。顶层 0~12cm 的 TOC 含量相对较高,呈现随柱深增加而降低的趋势(图 2)。自柱深约 12cm 以深含量总体相对稳定,仅发生小幅波动,但在柱深 184cm 处出现最大值,可能指示了一次有机质异常输入事件。TN 含量为 0.05%~0.22%,平均为 0.08%,总体上具有与 TOC 相同的变化趋势,两者呈较强正相关性(相关系数  $R^2 = 0.67$ ),说明沉积物中 TOC 和 TN 可能具有一致的来源,但沉积物中氮的反硝化作用可能对两者的相关性造成了一定的影响<sup>[22]</sup>。与北极周边海域相比(表 1),罗斯海柱样的 TOC 和 TN 含量相对较低,这可能与前者具有较高的上层水体生产力和较有利的有机质保存条件有关<sup>[23-25]</sup>。 $\delta^{13}\text{C}$  值波动幅度相对较大,范围 -25.64‰~-19.94‰,在柱深 4cm 和 24cm 处分别达到最低值和最高值,整个柱样的  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为 -21.72‰。

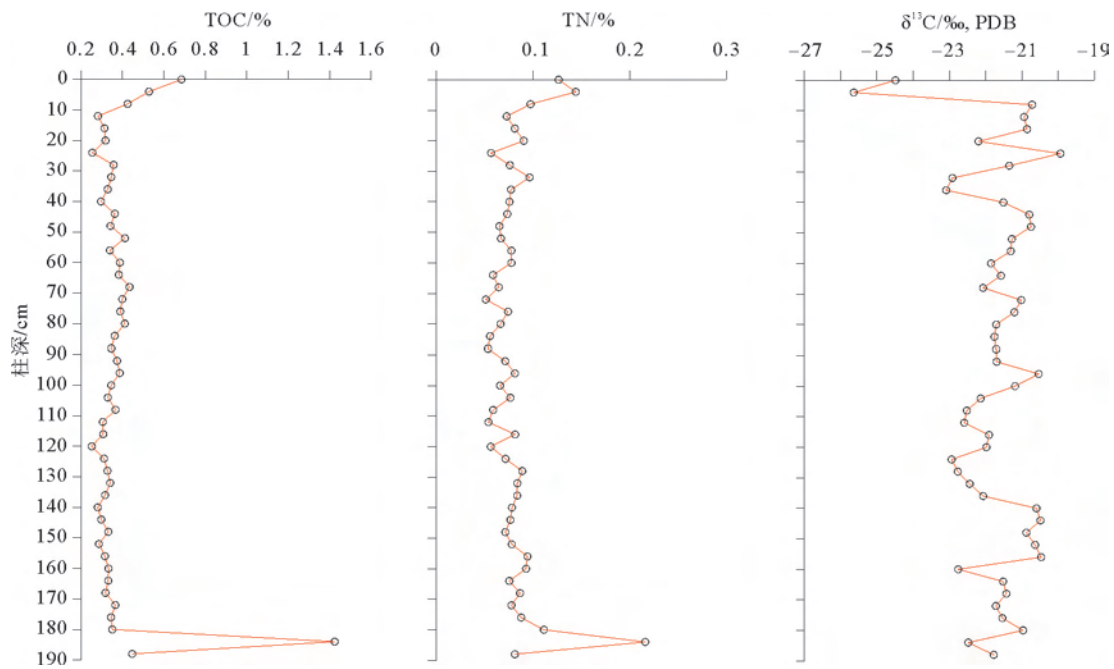
图2 罗斯海 RBA08C 柱状样沉积物中 TOC、TN 和  $\delta^{13}\text{C}$  的纵向变化Fig.2 Vertical variations of TOC, TN and  $\delta^{13}\text{C}$  values in Core RBA08C from the Ross Sea, Antarctic

表1 不同海区沉积物中有机质参数对比

Table 1 Parameter comparison for organic matters in sediments from the different areas

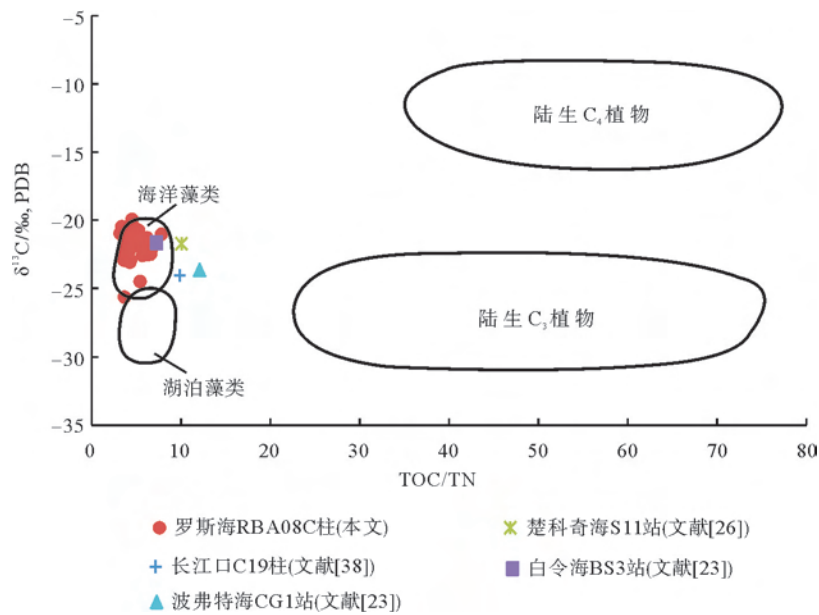
站位	位置	TOC	TN	TOC/TN	TOC埋藏率/%	平均沉积速率/(mm/a)	参考文献
III-13	普里兹湾中心	0.90%	0.18%	5.00	91	1.88	[2,26]
IV-10	普里兹湾中心	0.93%	0.17%	5.70	84	1.29	[2,26]
IS-4	普里兹湾埃默里冰架边缘	0.31%	0.05%	6.70	50	0.47	[2,26]
M07	楚科奇海北部陆架边缘	0.79%	0.90%	8.84	/	/	[27]
BL6	白令海陆架区	1.48%	0.25%	6.10	/	/	[22]
RBA08C	罗斯海罗斯冰架前缘	0.38%	0.08%	4.74	50	/	本文

### 3.2 沉积有机质来源

海洋沉积物中的有机质主要有两种来源——陆源和海源。研究表明,来自海洋藻类的有机质的 TOC/TN 比值通常为 3~8,而陆生植物的 TOC/TN 比值通常为 20,甚至更高<sup>[28,29]</sup>;典型海源有机碳  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-22\text{‰} \sim -19\text{‰}$ <sup>[30]</sup>,典型陆地  $\text{C}_3$  植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-31\text{‰} \sim -22\text{‰}$ <sup>[31]</sup>, $\text{C}_4$  植物的  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为  $-14\text{‰}$ <sup>[32]</sup>。由此可见,TOC/TN 比值和  $\delta^{13}\text{C}$  值随有机质来源不同而存在差异,因此可作为判别有机质类型的有效参数<sup>[33-36]</sup>。RBA08C 柱状样沉积物的 TOC/TN 比值介于 3.16~7.80 之间,平均为 4.74, $\delta^{13}\text{C}$  变化于  $-25.64\text{‰} \sim -19.94\text{‰}$  之间,绝大部分为  $-23\text{‰} \sim -19\text{‰}$ 。在有机质来源判别图

上<sup>[37]</sup>,绝大多数样品落入海洋藻类区域内,与位于白令海陆坡的 BS3 站<sup>[24]</sup>具有相同的有机质来源,即海洋生物源,但与北冰洋波弗特海 CG1 站<sup>[24]</sup>、楚科奇海 S11 站<sup>[27]</sup>以及长江口 C19 柱<sup>[38]</sup>显著不同,这些地区沉积物含有陆源和海源混合的有机质,因而在图 3 上落入陆生植物和海洋藻类之间的区域。需注意的是,RBA08C 柱样顶部两个样品具有较低的  $\delta^{13}\text{C}$  值(低于  $-25\text{‰}$ ),在投图上十分接近湖泊藻类区域,但与混合来源有机质的 TOC/TN 比值相差较大,推测可能与本区海水  $P_{\text{CO}_2}$  变化有关。研究表明<sup>[37]</sup>,海水中  $\text{CO}_2$  浓度会影响藻类有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  组成,当  $P_{\text{CO}_2}$  增大时,碳同位素分馏倾向于富集轻碳,反之则相反。具体机制还有待进一步研究。



图 3 RBA08C 柱样中有机质来源的 TOC/TN- $\delta^{13}\text{C}$  判别图Fig. 3 Source discrimination of organic matters based on TOC/TN ratio and  $\delta^{13}\text{C}$  value

南极普里兹湾沉积物中生物标志物特征显示有机质主要来自于硅藻等浮游植物<sup>[39]</sup>; 鲍威尔海盆有机碳同位素组成表明其来源主要以海洋水生生物为主<sup>[40]</sup>; 杰拉许海峡表层沉积物 TOC/TN 比值为 6.6~7.8, 亦揭示海源性质<sup>[13]</sup>。由此可见, 海洋浮游生物应是南极周边海域沉积物中有机质的主要来源。

### 3.3 影响有机质保存的主要因素

一般情况下, 有机质沉降至沉积物-水界面时会发生降解矿化, 随着沉积物的不断堆积和埋藏深度的增加, 其分解作用逐渐趋于稳定。通过对普里兹湾多个柱状岩心的 TOC 和 TN 含量变化研究发现, 沉积速率是影响沉积物中有机质降解矿化时间的重要因素<sup>[2, 26, 41]</sup>, 即相对较高的沉积速率会导致有机质的快速埋藏, 使其降解矿化过程不充分, 因而在沉积物中含量相对较高且呈现一定的波动性。

前已述及, 南极海区沉积物中的海源有机质占相当比重, 这与上部水体的生物生产力具有紧密联系, 有机质的含量一定程度上反映了海洋生产力的变化<sup>[42]</sup>。硅藻是南极周边近岸海域浮游植物中的优势种属, 也是代表高生产力的主控物种<sup>[43, 44]</sup>, 占南极初级生产力的 75% 左右<sup>[45]</sup>。硅藻等浮游植物吸收海水中的硅, 并通过生物泵作用将 TOC 输送至海底<sup>[46, 47]</sup>, 对海底沉积物的物质组成具有直接影响。因此, 以硅藻为代表的上层水体生产力也是影响沉积物中有机质含量的重要因素。

由图 4 可以看出, TOC 和 TN 与黏土含量和平均粒径并无相关性, 说明沉积物粒度组成并不是影响 RBA08C 柱样中有机质含量的主要因素。另外, 韩喜彬等<sup>[40]</sup>基于 Pr/Ph 比值研究发现, 缺氧环境有利于南极半岛东北海域沉积物中有机质的保存; Goni 等<sup>[23]</sup>对北极周边海域沉积物中 TOC 分布特征研究发现, TOC 埋藏通量较高海区的底质沉积物具有较薄的  $\text{MnO}_2$  富集层, 而后者用以指示沉积物原位的氧化还原状况和氧气穿透深度。综上所述, 研究区沉积物中有机质的保存应主要受控于上层水体生产力、沉积速率和氧化还原环境等因素的共同作用。

### 3.4 TOC 埋藏率

由图 2 可见, 罗斯海柱样沉积物中 TOC 自 12cm 以深含量较为稳定, 因此可将这些经过矿化分解处于较稳定状态的 TOC 含量近似看作碳储藏量, 而将表层 0~2cm 的 TOC 含量近似视为碳沉积量, 以此用两者比值(埋藏量/沉积量)来计算碳埋藏率<sup>[14]</sup>。估算结果表明, 位于罗斯冰架前缘的 RBA08C 柱样的碳储藏量约为 0.34%, 碳沉积量约为 0.68%, TOC 埋藏率为 50%, 与位于普里兹湾埃默里冰架边缘的 IS-4 柱样相同(表 1), 另外两者还具有较为相近的 TOC 和 TN 含量, 且均从 10~12cm 层位往下生源有机质含量趋于稳定, 表明 IS-4 和 RBA08C 两个站位可能具有相近的沉积速率, 这有待进一步的数据补充和深入研究。另有研究表

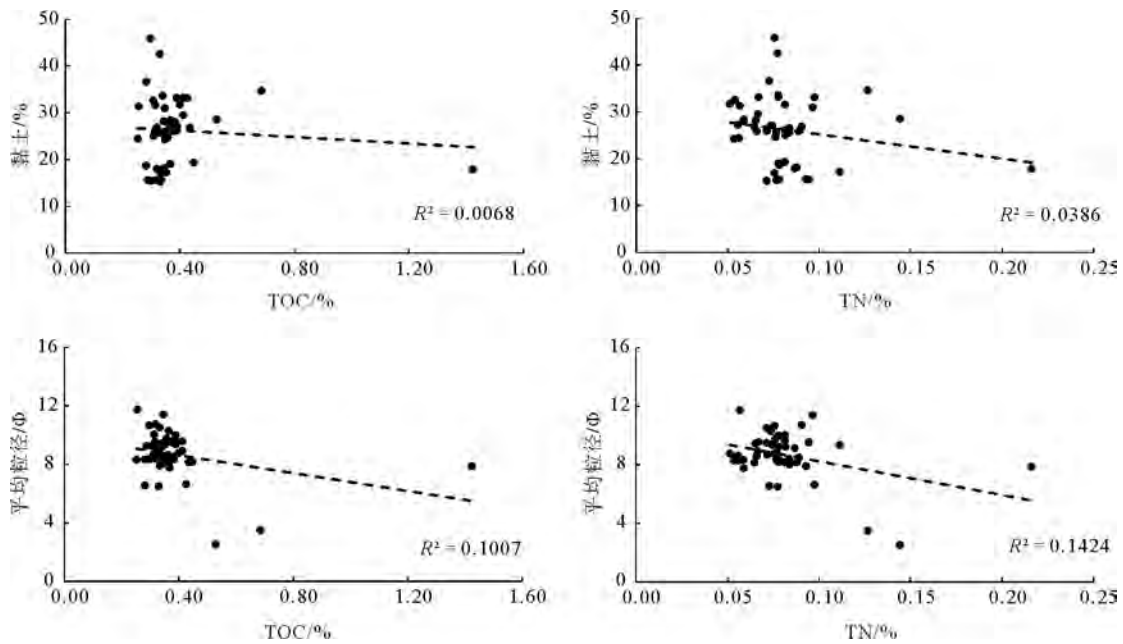


图4 RBA08C柱样沉积物中TOC、TN与平均粒径和黏土含量的相关性

Fig.4 Correlation between mean particle size, clay and TOC, TN in the Core RBA08C

明,南极布兰斯菲尔德海峡和杰拉许海峡沉积物中TOC埋藏率可达80%左右<sup>[13,14]</sup>,可见这些海区共同组成了南极海域重要的碳循环和碳储区。

## 4 结论

(1) RBA08C柱样中TOC含量在顶部0~12cm呈现随柱深增加而降低的趋势,自柱深12cm以深含量总体相对稳定。TN总体具有与TOC相同的变化趋势,两者含量变化呈现较强正相关性,说明可能具有相同来源。

(2) 沉积物TOC/TN比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值揭示RBA08C柱样有机质主要为海洋生源沉积,其含量变化应主要受控于上层水体生产力、沉积速率和氧化还原环境等因素的共同作用。

(3) RBA08C柱样的TOC埋藏率约为50%,与位于普里兹湾埃默里冰架边缘的IS-4柱样相同,加之较为相近的TOC和TN含量及变化趋势,表明两者可能具有相近的沉积速率,其所在的海区也是南极海域较重要的碳循环和碳储区。

**致谢:**感谢第32次南极科学考察队为采样样品付出的艰辛劳动;感谢自然资源部第一海洋研究所陈志华研究员给予的大力支持。

## 参考文献 (References)

- [1] Likens G E. Some perspectives of the major biogeochemical cycles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [2] 刘瑞娟, 于培松, 扈传显, 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. [LIU Ruijuan, YU Peisong, HU Chuanyu, 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.]
- [3] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? [J]. Biogeochemistry, 1991, 13(2): 87-115.
- [4] Robertson J E, Watson A J. A summer-time sink for atmospheric carbon dioxide in the Southern Ocean between 88°W and 80°E[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 1995, 42(4-5): 1081-1091.
- [5] Schneider B, Morlang J. Distribution of the CO<sub>2</sub> partial pressure in the Atlantic ocean between Iceland and the Antarctic peninsula[J]. Tellus B, 1995, 47(1-2): 93-102.
- [6] Louanchi F, Hoppema M. Interannual variations of the Antarctic Ocean CO<sub>2</sub> uptake from 1986 to 1994[J]. Marine Chemistry, 2000, 72(2): 103-114.
- [7] 张远辉, 黄宣宝, 王伟强. 南极普里兹湾及邻近海域二氧化碳的分布及其海气通量[J]. 极地研究, 1997, 9(2): 159-162. [ZHANG Yuanhui, HUANG Xuanbao, WANG Weiqiang. The distribution of CO<sub>2</sub> and its air-sea flux in the Prydz Bay of Antarctic and its adjacent waters[J]. Chinese Journal of Polar Research, 1997, 9(2): 159-162.]
- [8] 高众勇, 陈立奇, 王伟强. 南大洋二氧化碳源汇分布及其海-气

- 通量研究[J]. 极地研究, 2001, 13(3): 175-186. [GAO Zhongyong, CHEN Liqi, WANG Weiqiang, et al. Convergence and divergence of CO<sub>2</sub> in the Southern Ocean and its air-sea flux[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2001, 13(3): 175-186.]
- [9] Read J F, Lucas M I, Holley S E, et al. Phytoplankton, nutrients and hydrography in the frontal zone between the South-west Indian Subtropical gyre and the Southern Ocean[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2000, 47(12): 2341-2367.
- [10] Franck V M, Brzezinski M A, Coale K H, et al. Iron and silicic acid concentrations regulate Si uptake north and south of the Polar Frontal Zone in the Pacific Sector of the Southern Ocean [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2000, 47(15): 3315-3338.
- [11] Takeda S. Influence of iron availability on nutrient consumption ratio of diatoms in oceanic waters[J]. Nature, 1998, 393(6687): 774-777.
- [12] Hutchins D A, Bruland K W. Iron-limited diatom growth and Si: N uptake ratios in a coastal upwelling regime[J]. Nature, 1998, 393(6685): 561-564.
- [13] Isla E, Masqué P, Palanques A, et al. Sediment accumulation rates and carbon burial in the bottom sediment in a high-productivity area: Gerlache Strait (Antarctica)[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(16): 3275-3287.
- [14] Masqué P, Isla E, Sanchez-Cabeza J A, et al. Sediment accumulation rates and carbon fluxes to bottom sediments at the Western Bransfield Strait (Antarctica) [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(4): 921-933.
- [15] 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): 18501-18518.
- [16] 杜民, 邓希光, 杨永, 等. 南极罗斯海盆地油气地质条件及资源潜力研究[J]. 极地研究, 2016, 28(1): 113-122. [DU Min, DENG Xiguang, YANG Yong, et al. Geological conditions and petroleum resource potential in the Ross Sea Basin, Antarctic[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016, 28(1): 113-122.]
- [17] Cooper A K, Davey F J, Hinz K. Geology and hydrocarbon potential of the Ross Sea, Antarctica[M] // John B T, ed. Antarctica as an Exploration Frontier-Hydrocarbon Potential, Geology and Hazards. Tulsa: AAPG Studies in Geology, 1990, 31: 47-68.
- [18] Cooper A K, Davey F J, Hinz K. Crustal extension and origin of sedimentary basins beneath the Ross Sea and Ross Ice Shelf, Antarctica [M] // Thomson M R A, Crame J A, Thomson J W, eds. Geological Evolution of Antarctica. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 285-292.
- [19] Davey F J, Smith E G C. The tectonic setting of the Fiordland region, south-west New Zealand[J]. Geophysical Journal International, 1983, 72(1): 23-38.
- [20] Cooper A K, Davey F J, Behrendt J C. Seismic stratigraphy and structure of the Victoria Land basin, western Ross Sea, Antarctica[M] // Cooper A K, Davey F J, eds. The Antarctic continental margin: geology and geophysics of the western Ross Sea. Houston, Texas: CPCEMR Earth Science Series, 1987, 5B: 27-76.
- [21] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1132-1142. [CHEN Jianping, LIANG Digang, ZHANG Shuichang, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1132-1142.]
- [22] 胡利民, 石学法, 刘焱光, 等. 白令海西部柱样沉积物中有机碳的地球化学特征与埋藏记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(3): 37-47. [HU Limin, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Geochemical characteristics and burial records of organic carbon in the column sediments from Western Bering Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(3): 37-47.]
- [23] 张海峰, 王汝建, 孙焯忱, 等. 白令海北部表层沉积物中的生源组分分布特征及其古海洋学意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 79-87. [ZHANG Haifeng, WANG Ru-jian, SUN Huachen, et al. Distribution pattern of biogenic components in surface sediments of the Northern Bering Sea and their paleoceanographic implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(5): 79-87.]
- [24] Goni M A, O'Connor A E, Kuzyk Z Z, et al. Distribution and sources of organic matter in surface marine sediments across the North American Arctic margin[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(9): 4017-4035.
- [25] Springer A M, McRoy C P, Flint M V. The Bering Sea green belt: Shelf-edge processes and ecosystem production [J]. Fisheries Oceanography, 1996, 5(3-4): 205-223.
- [26] 于培松, 扈传昱, 刘小涯, 等. 南极普里兹湾海域的近现代沉积速率[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1172-1177. [YU Peisong, HU Chuanyu, LIU Xiaoya, et al. Modern sedimentation rates in Prydz Bay, Antarctic[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1172-1177.]
- [27] 薛斌, 潘建明, 张海生, 等. 北极楚科奇海地区沉积物生源物质的来源和分布 [J]. 极地研究, 2006, 18(4): 265-272. [XUE Bin, PAN Jianming, ZHANG Haisheng, et al. Sources and distribution of biogenic matter in sediments at station of Chukchi Sea area[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2006, 18(4): 265-272.]
- [28] Emerson S, Hedges J I. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments [J]. Paleoceanography, 1988, 3(5): 621-634.
- [29] Stein R. Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 217-320.
- [30] Fontugne M R, Jouanneau J M. Modulation of the particulate organic carbon flux to the ocean by a macrotidal estuary: evi-

- dence from measurements of carbon isotopes in organic matter from the Gironde system[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1987, 24(3): 377-387.
- [31] Schulz H D, Azbel M. *Marine Geochemistry*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 129-334.
- [32] O'Leary M H. Carbon isotopes in photosynthesis[J]. *Bioscience*, 1988, 38(5): 328-336.
- [33] Thornton S F, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, 38(3): 219-233.
- [34] Ogrinc N, Fontolan G, Faganeli J, et al. Carbon and nitrogen isotope compositions of organic matter in coastal marine sediments (the Gulf of Trieste, N Adriatic Sea): indicators of sources and preservation[J]. *Marine Chemistry*, 2005, 95(3): 163-181.
- [35] Prahl F G, Ertel J R, Goñi M A, et al. Terrestrial organic carbon contributions to sediments on the Washington margin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(14): 3035-3048.
- [36] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5): 213-250.
- [37] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3-4): 289-302.
- [38] 吴丹丹, 葛晨东, 高抒, 等. 长江口沉积物碳氮元素地球化学特征及有机质来源分析[J]. *地球化学*, 2012, 41(3): 207-215. [WU Dandan, GE Chendong, GAO Shu, et al. Carbon, nitrogen geochemical character and source analyses in Changjiang estuarine sediments[J]. *Geochimica*, 2012, 41(3): 207-215.]
- [39] 赵军, 于培松, 韩正兵, 等. 南极普里兹湾表层沉积物有机地球化学特征及其生态环境意义[J]. *极地研究*, 2014, 26(1): 167-174. [ZHAO Jun, YU Peisong, HAN Zhengbing, et al. Organic geochemical characteristics of surface sediments and implication for ecology and environment in Prydz Bay, Antarctic[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 167-174.]
- [40] 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. [HAN Xibin, ZHAO Jun, CHUN Fengyou, 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.]
- [41] 于培松. 南极普里兹湾海洋沉积记录及其对气候变化的响应[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013: 70-72. [YU Peisong. Prydz Bay marine sedimentary record and its response to climate change[D]. Qingdao: Institute of Oceanology of the Chinese Academy of Sciences, 2013: 70-72.]
- [42] Chen M T, Shiau L J, Yu P S, et al. 500000-Year records of carbonate, organic carbon, and foraminiferal sea-surface temperature from the southeastern South China Sea (near Palawan Island) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 197(1): 113-131.
- [43] Wilson D L, Smith W O, Nelson D M. Phytoplankton bloom dynamics of the western Ross Sea ice edge-I. Primary productivity and species-specific production[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1986, 33(10): 1375-1387.
- [44] Bathmann U V, Scharek R, Klaas C, et al. Spring development of phytoplankton biomass and composition in major water masses of the Atlantic sector of the Southern Ocean[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1997, 44(1): 51-67.
- [45] Nelson D M, Tréguer P, Brzezinski M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(3): 359-372.
- [46] 扈传昱, 韩正兵, 薛斌, 等. 2011年夏季南大洋普里兹湾颗粒态生物硅的分布与变化特征[J]. *极地研究*, 2012, 24(3): 247-253. [HU Chuanyu, HAN Zhengbing, XUE Bin, et al. The distribution and content of particulate biogenic silica in surface waters of Prydz Bay, Southern Ocean during the austral summer of 2011[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(3): 247-253.]
- [47] 扈传昱, 姚梅, 于培松, 等. 南大洋普里兹湾沉积物中生物硅含量与分布[J]. *海洋学报*, 2007, 29(5): 48-54. [HU Chuanyu, YAO Mei, YU Peisong, et al. Biogenic silica in surficial sediments of Prydz Bay of the Southern Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(5): 48-54.]