

DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2015. 03037

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

胡利民^{1,2}, 石学法^{1,2}, 刘焱光^{1,2}, 白亚之^{1,2}, 董林森^{1,2}, 黄元辉^{1,2}

(1 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 国家海洋局 第一海洋研究所, 青岛 266061;
2 青岛国家海洋科学技术实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061)

摘要:基于 2012 年中国第 5 次北极科学考察专项调查获得的样品资料, 重点探讨了百年来白令海西部柱样沉积物中有机碳(TOC)的地球化学特征及其埋藏记录, 结果显示, 基于两柱样²¹⁰Pb_{ex}随深度的指数衰变趋势, 整体能反映出调查区相对稳定的现代沉积环境, 可获得两沉积柱约 70 年以来的海洋沉积环境序列。陆架区 BL16 柱样中 TOC 的垂向分布与 TN 及粒度具有较好的一致性, 反映出有机质来源较为一致, 粒度可能对沉积有机碳的赋存起控制作用; 而陆坡区 BL10 柱样粒度相对略粗, 且 TOC 与 TN、粒度无明显相关关系, 这可能与该区复杂的沉积水动力环境、有机质输入和较强的细菌微生物作用有关。两柱样上层样品(近 20 年以来)都不同程度表现出 TOC 含量增加和 CaCO₃ 含量下降, 这可能指示了近期北极地区变暖和海洋酸化加剧等过程对沉积有机质的影响。计算得到两柱样沉积有机碳的埋藏通量分别为 3 100 mmol C · m⁻² · a⁻¹(BL16)和 1 400 mmol C · m⁻² · a⁻¹(BL10), 通过对有机碳埋藏保存效率的分析和区域对比, 认为该区较高的有机碳埋藏通量, 可能主要受控于较高的上层水体初级生产力 and 有机碳输出效率, 较为有利的沉积有机碳保存代谢机制以及较快的沉积速率等因素的共同作用。

关键词:有机碳; 沉积记录; 物源; 沉积环境; 埋藏通量; 白令海

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2015)03-0037-11

近几十年来, 北极地区海洋环境已经发生了明显变异, 主要表现为海冰消融和面积减少、海平面上升及水温升高、冻土层融化、海岸侵蚀加剧、海洋酸化和混合层厚度的改变等^[1-4]。这些生态环境的变异对海洋浮游植物初级生产力和生态群落结构的变化有直接的影响, 并可能影响或改变区域乃至全球尺度海洋碳循环的生物地球化学过程^[5-6]。白令海是亚北极纬度最高和面积最大的北太平洋边缘海, 是连接北冰洋和太平洋的重要通道, 西部和北部以宽阔的陆架为特征, 南部为深海盆。陆架水经白令海峡向北流入北冰洋, 表层环流为气旋型环流^[7-8]。由于白令海峡水深较浅, 其垂直水团结构主要受太平洋水团的影响。由于特殊的区域地理位置、季节性的海冰形成过程和较高的初级生产力, 白令海在全球碳循环过程和气候变化中起着重要作用^[9], 对全球气候和环境变化具有很强的敏感性, 并存在明显的作用和反馈^[10]。研究表明, 白令海生物泵作用

活跃, 是大气 CO₂ 的“汇”^[11-12]; 其水团交换过程对大洋环流、物质热量平衡方面起着重要作用, 并对全球气候变化产生重要的影响^[11-13]。

近期, 有关白令海沉积有机碳及相关有机分子标志物的研究已有一些报道, 例如, 有研究报道了白令海或北极周边陆架表层沉积物中的有机碳、典型有机分子的组成分布特征及其生态环境意义^[14-19]; 还有研究发现白令海颗粒有机碳的输出通量较高^[20]。此外, 也有研究从更长时间尺度建立了全新世乃至末次冰消期以来的沉积有机质记录及其对古海洋、古环境演变的响应^[21-23]。上述工作多是针对表层沉积物中有机质组分的组成分布及其影响因素, 或是更长时间尺度的有机地球化学记录研究。卢冰等^[24]基于陆坡有机分子标志物的百年沉积记录, 对白令海近百年的海洋环境变异进行了系统研究, 但由于样品采集时间较早, 对近十几年沉积有机质的埋藏记录及其环境响应过程尚不清楚。有关白令海东部陆架区的现代沉积过程也有一些研究^[25-26], 但对中部陆架、陆坡和西部陆架的沉积记录还较少有见报道。最新研究则表明, 白令海陆架及南部相邻陆坡的现代沉积速率较高, 能够获得 5—10 年的高分辨率的沉积序列^[27]。

据此, 本文依据 2012 年在白令海中、西部陆架—

基金项目:南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2015-03-02, CHINARE2015-04-03); 国家自然科学基金项目(41476054, 41306205)

作者简介:胡利民(1983—), 男, 博士, 主要从事海洋地球化学和海洋沉积学研究, E-mail: hulimin@fio.org.cn

收稿日期:2015-04-13; **改回日期:**2015-04-27 周立君编辑

陆坡区获得的多管柱样,重点探讨了百年来白令海沉积有机碳的地球化学特征与埋藏保存记录,并与周边已有的工作进行对比,这对于认识和了解该区百年来沉积有机质的输入、来源、埋藏保存及沉积环境演变等方面具有重要的科学意义,还可为评价北极周边近海生态环境变异及其影响提供必要的科学依据。

1 样品与分析

1.1 样品采集

研究采用的两根多管短柱样品为 2012 年中国第 5 次北极科学考察专项调查所采集。沉积柱由自制多管取样器采集获得,样品长度约 30 cm。其中,BL16 柱样位于陆架区,在圣劳伦斯岛西南方向,水深为 68.2 m;BL10 站位于上陆坡区,水深 2 611 m。采样站位如图 1 所示。沉积柱采集后现场按照 1 cm 间隔进行分样,样品放入冰柜于-20℃下冷冻保存直至分析。

1.2 样品分析

沉积柱²¹⁰Pb 测年分析在中科院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室完成。分析仪器采用 EG&G Ortec 公司生产高纯锗低本底 γ 谱分析测定系统。¹³⁷Cs 和²²⁶Ra 标准样品由中国原子能科学研究院提供,²¹⁰Pb 标准样品由英国利物浦大

学做比对标准,测试误差小于 10%。沉积物有机碳测定采用酸洗去除碳酸盐再上元素分析仪分析的方法。具体步骤如下:称取 2 g 研磨均匀的沉积物样品,加入 4 mL 1 mol 的 HCl,浸泡 3 次,每次约 8 h,直至不再有气泡出现。离心弃去上清液,水洗至中性,然后 60℃下烘干过夜,放入干燥器中平衡至恒重。称取 1~10 mg 样品在元素分析仪(德国 Vario EL-III 元素分析仪)上测定有机碳的百分含量(TOC)、总碳含量(TC)、总氮含量(TN)。原始样品中的 TOC 含量为酸洗前与酸洗后的重量之差进行校正后得出。沉积物中碳酸钙的含量按如下公式进行计算:

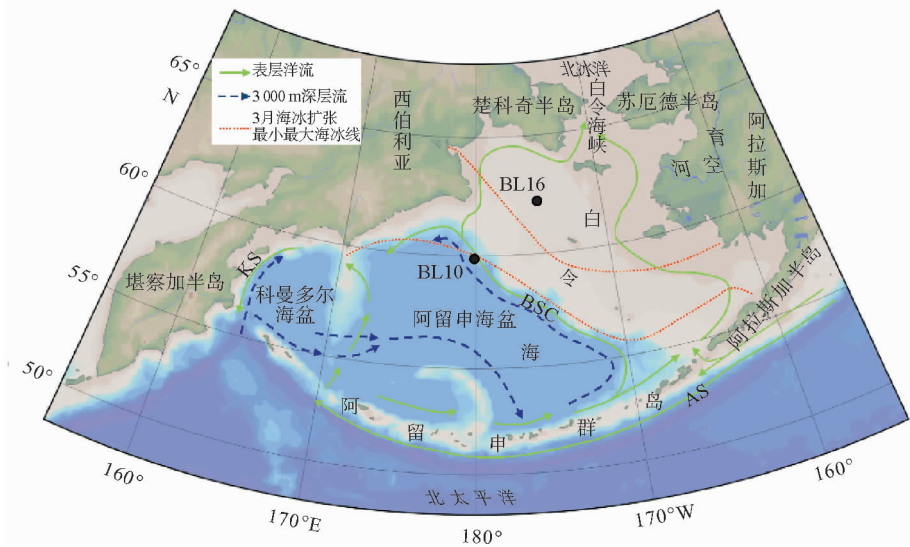
CaCO₃ = (TC - TOC) × 8.33

另取大约 1 g 的沉积物样品进行粒度分析,加入 10 mL 过量的 5%的 H₂O₂ 静置 24 h,以去除有机质组分。仪器测试前用自带的超声波振荡器超声分散 30 s 后,采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度分布测量仪进行测试。测量范围为 0.02~2 000 μm,分辨率 0.01 Φ,分析误差 ±2%。

2 结果与讨论

2.1 柱样沉积物粒度特征与²¹⁰Pb 沉积速率

如图 2 所示,白令海 BL16 和 BL10 两柱样的粒



AS-阿拉斯加流;BSC-白令海陆坡流;KS-堪察加流

图 1 研究区水深、环流与多管柱样站位(改绘自文献[23])

Fig. 1 Water Depth, Circulations and sampling sites of multi-cores in the Bering Sea (modified from reference [23])

度组成有一定差异,BL16 柱样整体为粉砂,而 BL10 则为砂质粉砂。其中,BL16 柱样黏土含量相对较高,为 11.8%~15.6%,平均含量为 14.2%;粉砂为 76.3%~81.9%,平均含量为 79.4%;砂含量为 3.4%~9.5%,平均含量为 6.4%。BL10 柱样砂含量相对较高,平均为 14.1%(11.5%~21.1%),黏土和粉砂的平均含量分别为 10.2%(8.6%~11.4%)、75.7%(70.3%~78.3%)。相比之下,BL10 柱样的粒度相对偏粗,这可能与采样站位的空间地理位置和沉积水动力条件有关。BL10 柱样处于白令海陆架坡折处,地形复杂,水深变化大,并受

白令海陆坡环流影响,沉积环境复杂多样^[28-29]。垂向上,两柱样不同粒径组分随深度基本保持不变(图 2),整体上反映了相对稳定的现代沉积环境。BL16 上部 10 cm 以内层位,砂含量略有降低,粉砂含量则稍有增加;而 BL10 短柱样品中砂含量在 22 cm 以下略有增加。

²¹⁰Pb 的分析结果如图 2 所示,两柱样总²¹⁰Pb 比活度和过剩²¹⁰Pb 比活度(²¹⁰Pb_{ex})的垂向变化趋势基本相同,两者都表现为随深度的增加而呈现出指数衰减的分布特征,²¹⁰Pb_{ex}在 20 cm 以下较为稳定,可认为达到本底值。据此,采用常量初始浓度

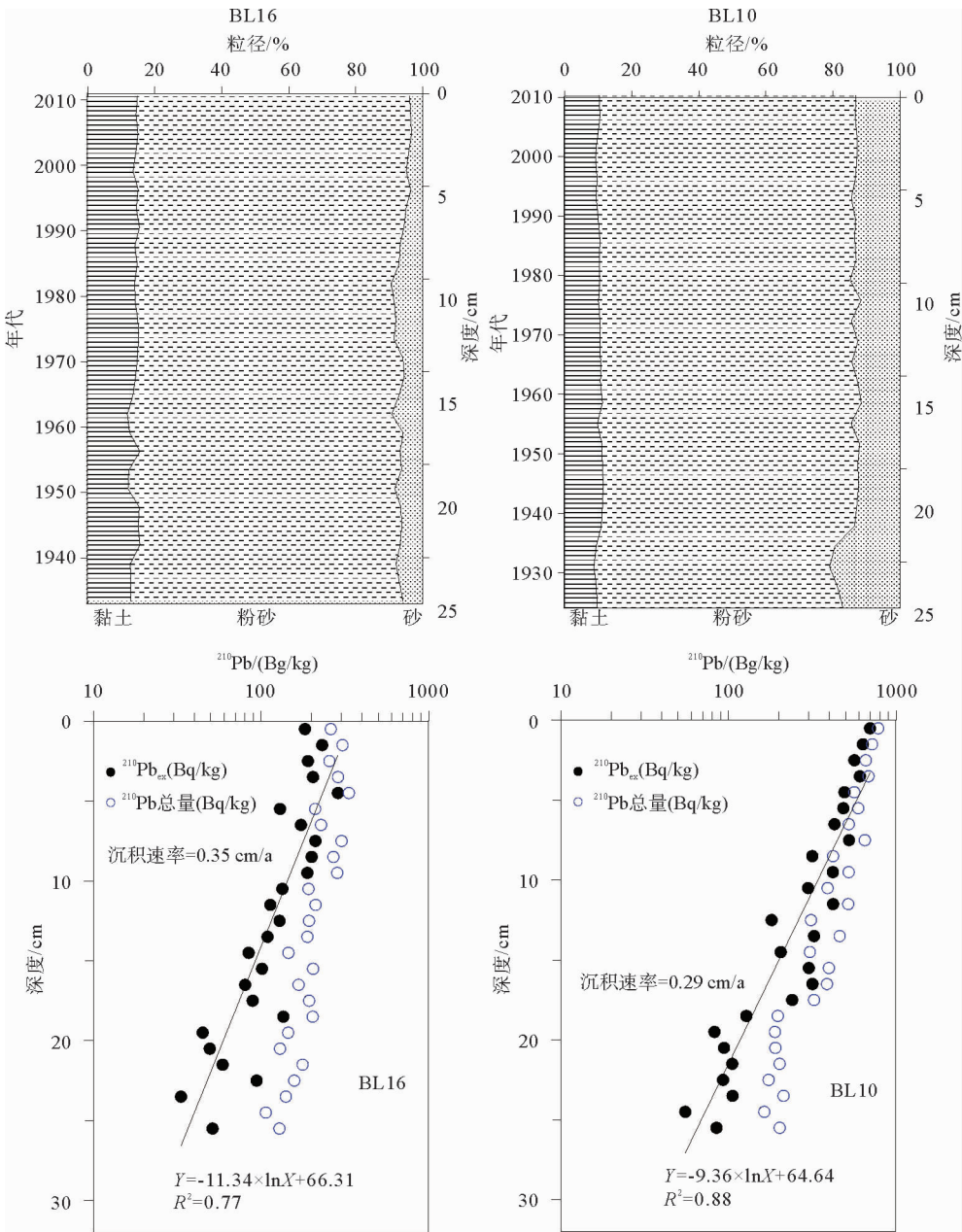


图 2 白令海西部 BL16 和 BL10 站位沉积柱样²¹⁰Pb 测年与粒度组成的垂向分布
Fig. 2 ²¹⁰Pb dating profiles and the vertical distribution of the sediment grain size in BL16 and BL10

(CIC)模式计算出它们的平均沉积速率分别约为 0.35 cm/a(BL16)和 0.29 cm/a (BL10)。该结果与近期 Oguri 等^[27]利用²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 对白令海陆架多管柱样测出的沉积质量速率结果相当(0.11~0.44 g·cm⁻²·a⁻¹),并发现白令海中、东部陆架的现代沉积速率较高,可获得 5~10 年分辨率的沉积序列;南部陆坡水深大于 2 000 m,以细颗粒沉积为主;育空河物质主要集中在北部近海区,对陆架沉积物的贡献较小^[27]。此外,卢冰等^[24]对白令海陆坡多管沉积柱也进行了²¹⁰Pb 定年,结果为 0.04~0.21 cm/a,平均为 0.11 cm/a,这与 90 年代 Iwata 等^[30]的测定结果 0.1 cm/a 相一致。

对比发现,不同层位的过剩²¹⁰Pb_{ex}比活度与深度之间具有较好的相关性(图 2),这表明该区沉积水动力环境相对稳定。位于陆坡区的 BL10 短柱上层则没有明显的扰动,²¹⁰Pb_{ex}比活度与深度的相关性也更显著。基于²¹⁰Pb 的平均沉积速率和柱子长度,大体可获得两沉积柱约 70 年以来的连续海洋沉积环境序列(图 2)。不过,也发现 BL16 柱样上层 10 cm 以内²¹⁰Pb_{ex}比活度的衰变趋势并不明显,这可能与上层沉积物受物理混合的影响有关。研究发现,白令海陆架不同地区短柱的上层样品确有不同程度(几厘米至几十厘米)的混合现象,这主要跟底栖生物和冬季沉积物再悬浮作用有关^[27]。此外,发现不同区域沉积物中²¹⁰Pb_{ex}比活度差别很大,BL10 柱样明显高于陆架区的 BL16 柱样。陆架区水深较浅,沉积物中²¹⁰Pb_{ex}可能尚未完全衰变;但陆坡区的 BL10 含明显偏高的²¹⁰Pb_{ex}比活度(图 2),这主要可归因如下:一方面可能跟陆坡区底部雾状层对细颗粒的汇聚作用有关^[27];另一方面,这也跟白令海“绿

带”的陆架边缘区具有较高的初级生产力和有机碳输出有直接的关系^[31-32],从而加大了对水体中过剩²¹⁰Pb_{ex}的清扫作用^[33]。

2.2 沉积物中有机碳与氮和碳酸钙的分布及影响因素

BL16 和 BL10 两柱样 TOC 的特征与粒度参数的分布如表 1 所示。总体来说,两根短柱的 TOC 含量比较高(>1.2%),这与前人在本区的研究结果相一致^[15,17-18]。事实上,TOC 含量的高值在北极周边海域也多有报道,如楚科奇海、波弗特海陆架等^[34]。本区沉积物相对较高的 TOC 含量主要受上层水体相对较高的初级生产力和沉积物中较有利的 TOC 埋藏保存条件所控制^[15,18,31]。研究表明,白令海区域尺度上沉积有机碳高含量分布与具有较高初级生产力的上部水体(即“白令海绿带”)有直接的关系,其下部沉积物有机碳最高可达 2%^[31],这也可从与初级生产力密切相关的叶绿素 a 的空间分布特征上得到体现^[17,32]。研究发现,基于叶绿素 a 的空间分布资料,白令海陆架(包括陆架坡折带)在 5 月会出现浮游植物的勃发,并在夏季叶绿素 a 大于 2 mg/m³,相比之下,白令海盆区全年叶绿素 a 都偏低(小于 1 mg/m³)^[35]。此外,在陆架-陆坡区由于春季海冰消融也会对浮游植物的勃发和沉积有机质的富集有一定贡献,与海冰消融过程相关的初级生产力可高达 60%以上^[36]。对比发现,BL16 和 BL10 柱样沉积物中 CaCO₃ 含量具有较大的区域差异,陆架区 BL16 短柱中 CaCO₃ 平均含量为 1.84%(0.19%~6.68%),而上陆坡区的 BL10 的 CaCO₃ 平均含量普遍低于 2%。这与前人对白令海北部表

表 1 白令海西部沉积柱样中有机碳的地球化学特征及粒度分布
Table 1 Geochemical occurrence of organic carbon and grain size distribution

有机碳及粒度特征参数	BL16		BL10	
	范围	均值	范围	均值
总有机碳(TOC)/%	1.20~1.87	1.48	1.24~1.51	1.39
总氮(TN)/%	0.11~0.32	0.25	0.20~0.27	0.22
碳酸钙(CaCO ₃)/%	0.18~6.67	1.84	0.25~2.29	1.26
C/N 比值	4.1~10.7	6.1	4.8~7.1	6.2
有机碳埋藏量(mmol C·m ⁻² ·a ⁻¹)	—	3 100	—	1 400
砂/%	3.4~9.5	6.4	11.5~21.0	14.1
粉砂/%	76.3~81.9	79.4	70.3~78.3	75.7
黏土/%	11.8~15.6	14.2	8.6~11.4	10.2
平均粒径(Mz)/Φ	6.2~6.6	6.4	5.5~5.9	5.8

层沉积物中 CaCO_3 的空间分布趋势相一致,陆架区相对较高的 CaCO_3 含量主要与陆架区上层水中钙质的颗石藻及与水深相关的 CaCO_3 的保存和溶解作用有关^[15,37]。

垂向上,BL16 柱样中 TOC 从下向上表现为不断的增加趋势,并与沉积物粒径具有较好一致性(图 3a),反映了粒度对沉积有机碳的控制作用。该柱样大体分为 3 个阶段:(1)15 cm 以下,TOC 含量偏低,平均为 1.36% (1.20%~1.49%),但具有一定的波动。最低值(1.20%)出现在最底层的样品(对应于 30 年代中期)。该段 C/N 比值和 CaCO_3 具有一定波动,但变化幅度较小,C/N 比值平均为 6.0;

(2)15~9 cm,TOC 表现为随深度减少而逐渐增加的趋势,整体含量略有上升,平均为 1.36%;该段 C/N 比值和 CaCO_3 具有一定波动;(3)9 cm 以上,

即从 20 世纪 80 年代后期开始,TOC 整体呈现不断增加的趋势,有机碳平均含量为 1.76%。该段 C/N 比值相对稳定,但是 CaCO_3 含量较下层有一定的降低(图 3a),这可能部分受到粒度变化的影响。另一方面,结合 BL10 柱样平均粒径和有机碳等的垂向分布,同样可大体分为 3 段(图 3b):(1)在 22 cm 以下的层位,TOC 含量偏低,样品中砂含量有明显的增加,粒度变粗,但 TOC 无明显变化;(2)22~10 cm,该段 TOC 整体含量略有上升,平均为 1.40%;C/N 比值和 CaCO_3 具有一定波动,但粒度变化不大;(3)从 10 cm 深度向上,对应于 20 世纪 80 年代初期开始,TOC 阶段性增加,但 TN 却表现出明显的下降(图 3b),这可能与该区上层沉积物在缺氧环境条件下受异养细菌等微生物活动的影响,反硝化作用较强有关^[38]。如图 4 所示,对两柱样的 TOC

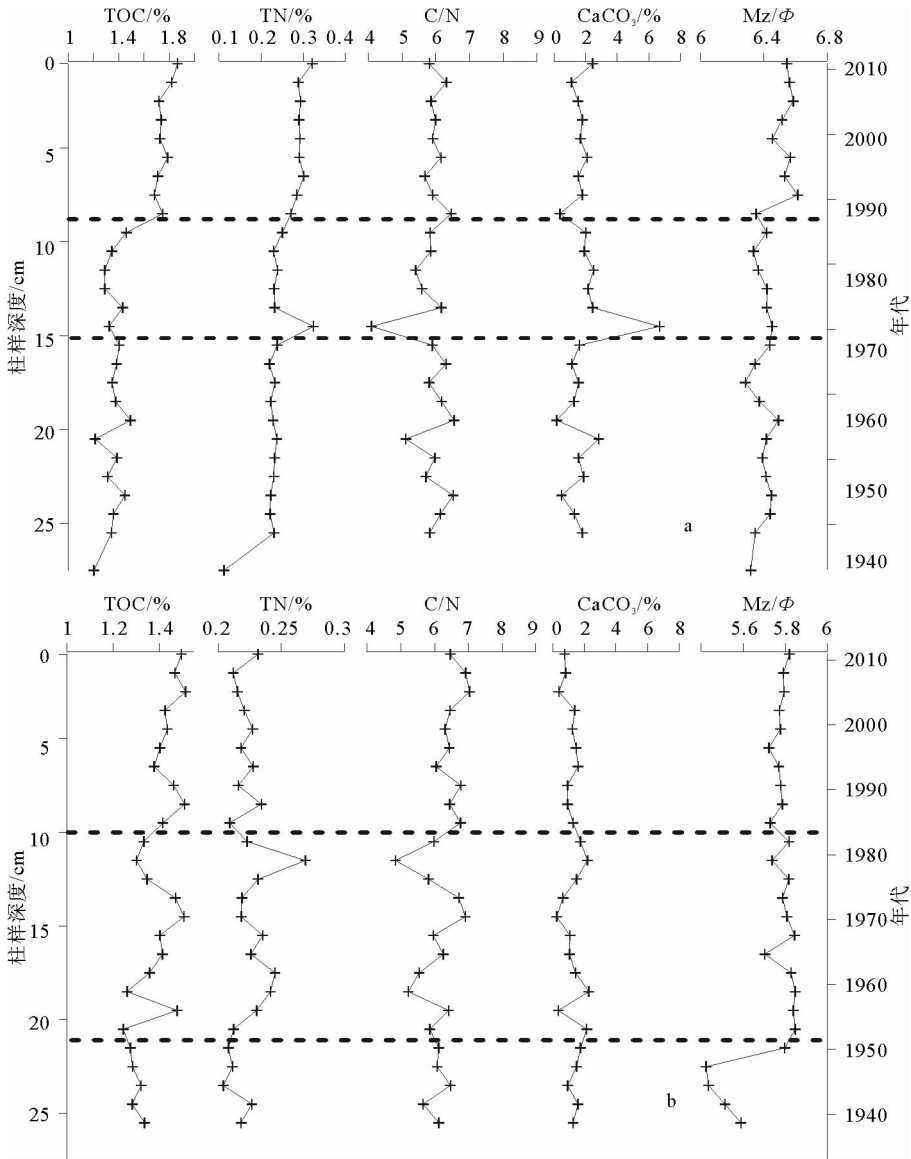


图 3 白令海西部 BL16(a)和 BL10(b)柱样中 TOC、TN、TOC/TN、 CaCO_3 和 Mz 的垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of TOC, TN, TOC/TN, CaCO_3 and median grain size for BL16 (a) and BL10 (b)

和平均粒径进行相关性分析,发现陆架区 BL16 柱样中 TOC 与平均粒径(Mz)具有较好的正相关关系($R^2=0.60, p<0.05$),反映了细颗粒的表面吸附作用可能对本区 TOC 的分布有重要影响^[39];而陆坡区 BL10 柱样中两者则基本没有相关性,这也说明存在其他因素(如细菌对有机质富集的贡献)可能对陆坡区 TOC 的分布起主导作用^[40]。最新研究表明,在上陆坡区来源于微生物贡献的 GDGTs 有机分子含量明显偏高,反映了该区海底较强的微生物作用对沉积有机质的贡献^[19]。

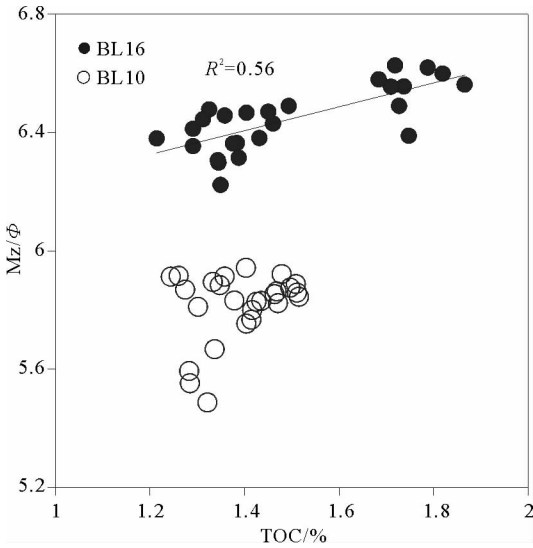


图4 白令海西部两柱样沉积物中粒度与 TOC 的相关性
Fig. 4 The correlation between sediment grain size and TOC contents for BL16 and BL10

值得注意的是,对于两柱样上层样品,尤其是近 20 年以来,与下层相比,都表现出较明显的 TOC 含量增加和 CaCO_3 含量的下降,除去粒度的部分影响,这也可能与近期北极变暖和海洋酸化的加剧有一定联系。研究证实,白令海陆坡沉积物中有机分子标志物(如甾醇)的组成对近期气候变暖有较好的响应关系,而变暖在一定程度上会对海洋初级生产力的增加有促进作用^[24],这就可能导致了上层沉积物中 TOC 的含量增加。此外,研究也发现,由于大气 CO_2 浓度的增加和极地较低的水温,该区更易受海洋酸化的影响^[41],白令海近期表层海水中文石饱和度已经出现不饱和和^[42],这将对相应的钙质生物及碳酸盐矿物的埋藏保存产生不利的影响^[43]。

2.3 白令海不同区域沉积有机碳来源

对两柱样中 TOC 和 TN 进行相关性分析,发现不同柱样沉积物中 TOC 和 TN 的相关性差异较大

(图 5),BL16 不同层位 TOC 和 TN 的相关性更加密切($R^2=0.84, p<0.01$),而 BL10 的 TOC 和 TN 则没有明显相关性,这表明不同站位之间 TOC 的来源及其影响因素可能有明显的差异,陆架区 BL16 柱样中 TOC 和 TN 的来源较为一致,而 BL10 中 TOC 和 TN 的来源则较为复杂,可能受到其他因素的影响。事实上,之前研究也发现,处于白令海陆坡环流影响区的柱样中 TOC 和 TN 的相关性也较差,并推测这可能与沉积物中氮的反硝化作用有关^[21]。BL10 站水深较大,水体中的颗粒有机质需要经过较长的沉降时间,这会加大有机质的降解程度并促进底层水体的缺氧。研究指出,白令海水深大于 2 000 m 的海底沉积物的反硝化速率远高于全球相同水深的沉积物^[38]。

沉积物中有机质 C/N 比值是判别有机质物源的经典指标。一般认为,海洋生物来源的有机质的 C/N 比值为 5~7^[44],陆源高等植物贡献的有机质 C/N 则一般大于 15^[45]。不过,研究也发现,很多因素会限制 C/N 比值对沉积有机质的指示作用,比如矿物对无机氮的吸附、土壤有机质输入、水动力分选、微生物作用及早期成岩作用等^[46-48],这些因素尤其是在大河输入影响和沉积动力活跃的陆架-边缘海地区,都将不同程度地降低沉积物中 C/N 值^[49-50],从而使得它对沉积有机质来源的指示作用不够敏感。由图 4 和图 5 可知,两柱样沉积物中 C/N 随深度的变化相对稳定,BL16 柱样 C/N 比值为 4.1~6.5,平均为 5.9;BL10 柱样 C/N 比值为 4.8~7.0,平均值为 6.2,表明沉积物中有机碳的来源主要以海洋源有机质贡献为主,这与该海区表层沉积物中来自海洋生源贡献的典型生物标志物(菜籽甾醇)高浓度的分布一致^[17,51]。本区沉积有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-21\text{‰} \sim -22\text{‰}$,同样指示了海洋源有机质贡献占主导^[52]。最新研究发现,处于白令海陆架边缘和上陆坡地区表层沉积物中来自海洋古菌(*Thaumarchaeota*)贡献的特征有机分子标志物四醚膜类脂物(GDGTs)的含量很高,而较高的海洋初级生产力是维持水柱中这类古菌进行生命活动的基础和前提^[19]。

另一方面,尽管通过各种有机质和典型有机分子标志物都表明白令海陆架和陆坡区沉积有机质以海洋浮游植物贡献为主,但最近基于典型的陆源生物标志物(木质素酚)的组成特征,发现白令海不同区域沉积有机质中都具有不同程度的陆源有机质混合,而且不同地区陆源有机分子标志物的信号不同^[18];例如,陆架区沉积陆源有机质表现出更强的

木质素和角质贡献的有机分子信号,其来源主要是有机质含量较高的土壤和泥炭贡献;而陆坡区的这种信号明显偏弱,主要来源于预陈化土壤和基岩中的古老有机质^[18],这表明陆架和陆坡地区陆源有机质的组成、来源及输运方式可能具有明显的区域差异,并可能与海流的水平输送、海岸侵蚀及海冰活动导致的沉积物输运等过程有直接的关系^[53-54]。

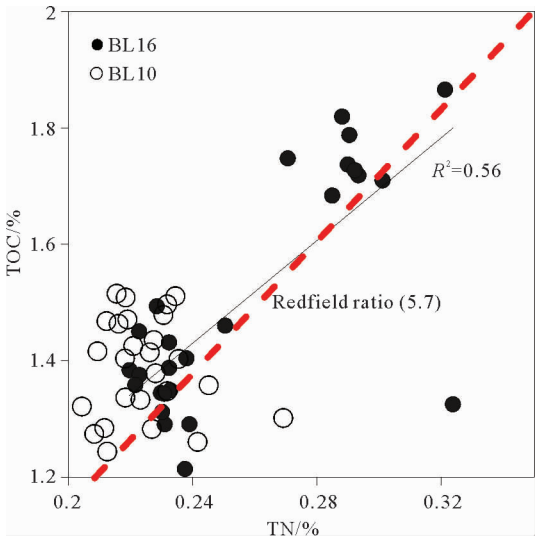


图5 白令海西部两柱样总有机碳(TOC)和总氮(TN)的相关关系

Fig. 5 Correlation between the TOC and TN for BL16 and BL10

2.4 白令海沉积有机碳的埋藏保存及区域对比

基于 BL16 和 BL10 表层沉积物(0~3 cm)的含水量和固体颗粒干密度(取 2.5 g/cm³),结合²¹⁰Pb 沉积速率,可大体估算出陆架区和陆坡区表观沉积质量的埋藏通量 F_m (kg·m⁻²·a⁻¹),其中 BL16 的表观沉积质量通量约为 1.8 kg·m⁻²·a⁻¹,BL10 的表观沉积质量通量约为 1.0 kg·m⁻²·a⁻¹。根据表层沉积物中有机碳含量 OC%(mol C/kg),可得到各自站位有机碳的表观埋藏通量 F_{OC} (mmol C·m⁻²·a⁻¹),公式如下:

$$F_{oc}=F_m\times OC\%\times 1\,000$$

据此,可分别计算出 BL16 和 BL10 的沉积有机碳表观埋藏通量约为 3 100 和 1 400 mmol C·m⁻²·a⁻¹。与北极周边海域对比发现,该结果与楚科奇海陆架西部的结果(3 141 mmol C·m⁻²·a⁻¹)^[55]相当,但整体明显高于楚科奇海(358 mmol C·m⁻²·a⁻¹)^[34]和拉普帖夫海陆架地区(517 mmol C·m⁻²·a⁻¹)^[56]。如前所述,白令海这一区域较高的沉积有机碳埋藏通量主要受控于该区较高的水体初级生

产力、较高的真光层有机碳输出效率、较为有利的有机碳保存环境以及较高的沉积速率等因素的共同作用。除表层生产力较高外,研究指出,由于高纬度海区以硅藻等较大个体的浮游植物为主,导致相对较高的颗粒有机碳从真光层向下输出(约 50%)^[20,57],加之本区沉积速率较高,故对该区沉积物中具有较高的 TOC 供给。

根据颗粒单位面积吸附的有机碳量可大体评估沉积有机碳的埋藏效率^[58-59]。近期的研究发现,白令海陆架区和楚科奇海的 TOC 埋藏效率普遍较高,大于 0.5 mg C·m⁻²^[18],这除了与较高的初级生产力对沉积有机碳供给有关外,也跟有机质的代谢机制有直接的关系。沉积物氧化还原环境及其对 TOC 保存或代谢的影响机制可通过表层氧化锰 MnO₂ 的厚度(即氧气穿透深度)的大小来表征^[18,60]。一般来说,海水中颗粒有机质作为重要的还原剂,在沉降过程中将不断消耗底层水中的氧气,使之趋向还原^[60-61],锰在水体中受富氧海水等氧化剂作用,易形成 MnO₂ 而赋存在表层沉积物中,而在氧气穿透面以下,缺氧的沉积环境将导致 MnO₂ 代替氧气成为重要的二级氧化剂,使其易被有机质还原为易溶的 Mn²⁺,从而导致下层沉积物中 Mn 含量迅速降低。因此,表层沉积物中的 Mn 富集层(MnO₂)的厚度可作为指示沉积物原位的氧化还原状况和氧气穿透深度,即 Mn 富集层越薄,说明沉积环境越还原,就更有利于沉积有机质的埋藏保存^[18]。对北极周边海域底质沉积物中的有机碳埋藏效率和 Mn 富集层厚度的分析发现,对于有机碳埋藏保存效率(0.5~1 mg C·m⁻²)较高的地区(如巴罗海峡、楚科奇海和白令海陆架等),其沉积物的 Mn 富集层厚度(即氧气穿透深度)都很浅(<2 cm),这有利于有机碳的埋藏保存;而对于 Mn 富集层厚度较大(>5 cm)的地区(如加拿大半岛北部近海),沉积有机碳的埋藏保存效率一般都低于 0.5 mg C·m⁻²^[18]。除上述因素外,沉积有机碳的埋藏保存还与沉积物传输过程中不同类型有机质分异以及矿物颗粒的性质和种类有关系^[62-63]。总之,随着北极周边海冰日益减少,冻土退化以及海岸侵蚀的加剧,这些过程将会显著改变海洋初级生产力和陆源物质(包括营养盐和有机质)的入海通量^[34,64-65],这将对本区沉积有机碳的供给、代谢和埋藏保存等过程产生重要影响,需要进一步的关注和研究。

3 结论

(1)陆架区 BL16 柱样以粉砂为主,而陆坡区

BL10 则主要为砂质粉砂,两柱样粒度组成的差异可能与区域地理位置、地形及沉积环境有关。基于²¹⁰Pb 的CIC 模式可估算得到两柱样近百年来平均沉积速率分别为 0.35 cm/a(BL16)和 0.29 cm/a(BL10)。BL16 柱样上层样品可能受到底栖生物活动和沉积物再悬浮等混合作用的影响。

(2)BL16 柱样 TOC 的垂向分布与沉积物粒度具有较好的一致性,反映了粒度对沉积有机碳的控制作用;而 BL10 柱样中两者没有明显的相关关系,可能受陆坡区较高的有机碳输入和细菌微生物作用对有机碳埋藏保存的影响。C/N 比值指示沉积有机碳的来源以海洋源有机质为主。近 20 年以来,两柱样上层样品中 TOC 和 CaCO₃ 的记录出现较明显的变化,这可能与近期北极地区变暖和海洋酸化加剧有一定联系。

(3)结合表层沉积物质量埋藏速率和有机碳含量,可估算出 BL16 和 BL10 柱样沉积有机碳表观埋藏通量约为 3 100 和 1 400 mmol C · m⁻² · a⁻¹。对比分析后,认为该区域较高的沉积有机碳埋藏通量可能主要受控于水体较高的初级生产力和真光层有机碳输出效率、较有利的有机碳保存代谢机制以及较快的沉积速率等因素的共同作用。

致谢:感谢 2012 年第 5 次北极科学考察队地质组全体成员为样品的采集付出的艰辛劳动。感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的夏威岚高工和海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室的朱影工程师对沉积物放射性核素和沉积物粒度的分析工作。

参考文献(References)

[1] Dahl K A, Repeta D J, Goericke R. Reconstructing the phytoplankton community of the Cariaco Basin during the Younger Dryas cold event using chlorin steryl esters [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19(1):19-29.

[2] Hays G C, Richardson A J, Robinson C. Climate change and marine plankton [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20: 337-344.

[3] Raven J, Caldeira K, Elderfield H, et al. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide [M]. The Royal Society, 2005.

[4] Guo L, Ping C L, Macdonald R W. Mobilization pathways of organic carbon from permafrost to arctic rivers in a changing climate [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34.

[5] 陈建芳, 张海生, 金海燕, 等. 北极陆架沉积碳埋藏及其在全球碳循环中的作用[J]. *极地研究*, 2004, 16: 193-201. [CHEN Jianfang, ZHANG Haisheng, JIN Haiyan, et al. Ac-

cumulation of sedimentary organic carbon in the Arctic shelves and its significance on global carbon budget [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16: 193-201.]

[6] McGuire A D, Anderson L G, Christensen T R, et al. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change [J]. *Ecological Monographs*, 2009, 79: 523-555.

[7] Stabenon P J, Schumacher J D, Ohtani K. The physical oceanography of the Bering Sea [C]//*Dynamics of the Bering Sea*. 1999: 1-28.

[8] Wang J, Hu H, Mizobata K, et al. Seasonal variations of sea ice and ocean circulation in the Bering Sea: A model - data fusion study [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2009, 114(C2),DOI: 10.1029/2008JC004727.

[9] Tsyban A. The BERPAC Project: development and overview of ecological investigations in the Bering and Chukchi Seas [C]//*Dynamics of the Bering Sea*. 1999: 713-729.

[10] 陈立奇. 南极和北极地区在全球变化中的作用研究[J]. *地学前缘*, 2002, 9: 245-253. [CHEN Liqi. Study of the role of the Arctic and Antarctic regions in global change[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9: 245-253.]

[11] Takahashi K, Fujitani N, Yanada M. Long term monitoring of particle fluxes in the Bering Sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990-2000 [J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 55: 95-112.

[12] Chen L, Gao Z. Spatial variability in the partial pressures of CO₂ in the northern Bering and Chukchi seas [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54: 2619-2629.

[13] Rodger Harvey H, Sigler M F. An introduction to the Bering Sea Project [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 94: 2-6.

[14] Guo L, Tanaka T, Wang D, et al. Distributions, speciation and stable isotope composition of organic matter in the south-eastern Bering Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 91: 211-226.

[15] 张海峰, 王汝建, 孙烨忱, 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 Rujian, SUN Yechen, et al. Distribution pattern of biogenic components in surface sediments of the northern Bering Sea and their paleoceanographic implications [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 79-87.]

[16] 王寿刚, 王汝建, 陈建芳, 等. 白令海与西北冰洋表层沉积物中四醚膜类脂物研究及其生态和环境指示意义[J]. *地球科学进展*, 2013, 28: 282-295. [WANG Shouguang, WANG Rujian, CHEN Jianfang, et al. Spatial distribution patterns of GDGTs in the surface sediments from the Bering Sea and Arctic Ocean and their environmental significances[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(2): 282-295.]

[17] Méheust M, Fahl K, Stein R. Variability in modern sea surface temperature, sea ice and terrigenous input in the sub-polar North Pacific and Bering Sea; Reconstruction from biomarker data [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 57: 54-64.

- [18] 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: 4017-4035.
- [19] Park Y-H, Yamamoto M, Nam S I, et al. Distribution, source and transportation of glycerol dialkyl glycerol tetraethers in surface sediments from the western Arctic Ocean and the northern Bering Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2014, 165: 10-24.
- [20] 马豪, 何建华, 曾志, 等. 白令海颗粒有机碳输出通量的初步研究[J]. *极地研究*, 2009, 21: 116-123. [MA Hao, HE Jianhua, ZHENG Zhi, et al. Preliminary study on particulate organic carbon export fluxes in the Bering Sea[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2009, 21: 116-123.]
- [21] 邹建军, 石学法, 白亚之, 等. 末次冰消期以来白令海古环境及古生产力演化[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37: 1-10. [ZHOU Jianjun, SHI Xuefa, BAI Yazhi, et al. Paleoenvironment and Paleoproductivity variations in the Bering Sea Since the Last Deglacial[J]. *Earth Science-Journal of China Univeristy of Geosciences*, 2012, 37: 1-10.]
- [22] 张海峰, 王汝建, 陈荣华, 等. 白令海北部陆坡全新世以来的生物标志物记录及其古环境意义[J]. *极地研究*, 2014, 26(1): 1-16. [ZHANG Haifeng, WANG Rujian, CHEN Ronghua, et al. Holocene biomarker records on the northern Bering Sea slope and their paleoenvironmental implications[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 1-16.]
- [23] 陈志华, 陈毅, 王汝建, 等. 末次冰消期以来白令海盆的冰筏碎屑事件与古海洋学演变记录[J]. *极地研究*, 2014, 26(1): 17-28. [CHEN Zhihua, CHEN Y, WANG Rujian, et al. Ice-rafted detritus events and paleoceanography records in the Bering Sea Basin since the Last Deglaciation[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 17-28.]
- [24] 卢冰, 陈荣华, 王自磐, 等. 亚北极白令海近百年海洋环境变化——来自分子化石的证据[J]. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(4): 367-374. [LU Bing, CHEN Ronghua, WANG Zipan, et al. The changing environment over the past century in the sub-arctic Bering Sea[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2004, 34(4): 367-374.]
- [25] Knebel H J, Creager J S. Sedimentary environments of the east-central Bering Sea continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1973, 15: 25-47.
- [26] Naidu A, Mowatt T. Sources and dispersal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental-shelf areas off Alaska [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94: 841-854.
- [27] Oguri K, Harada N, Tadaï O. Excess ^{210}Pb and ^{137}Cs concentrations, mass accumulation rates, and sedimentary processes on the Bering Sea continental shelf [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 61-64: 193-204.
- [28] Carlson P R, Karl H A. Mass movement of fine-grained sediment to the basin floor, Bering Sea, Alaska [J]. *Geo-marine letters*, 1984, 4: 221-225.
- [29] 黄元辉, 石学法, 葛淑兰, 等. 白令海深海异常沉积特征及成因分析[J]. *极地研究*, 2014, 26(1): 39-45. [HUANG Yuanhui, SHI Xuefa, GE Shulan, et al. Characteristics of abnormal deep sea sediments in the Bering Sea and their possible causes[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 39-45.]
- [30] Iwata H, Tanabe S, Aramoto M, et al. Persistent organochlorine residues in sediments from the Chukchi Sea, Bering Sea and Gulf of Alaska [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28: 746-753.
- [31] 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: 205-223.
- [32] Mizobata K, Saitoh S I. Variability of Bering Sea eddies and primary productivity along the shelf edge during 1998-2000 using satellite multisensor remote sensing [J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 50: 101-111.
- [33] Moore W S, Dymond J. Correlation of ^{210}Pb removal with organic carbon fluxes in the Pacific Ocean [J]. *Nature*, 1988, 331: 339-341.
- [34] Stein R, Macdonald R W. The organic carbon cycle in the Arctic Ocean[M]. Springer, 2004.
- [35] Iida T, Saitoh S-I. Temporal and spatial variability of chlorophyll concentrations in the Bering Sea using empirical orthogonal function (EOF) analysis of remote sensing data [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54: 2657-2671.
- [36] Gosselin M, Lévasscur M, Wheeler P A, et al. New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1997, 44: 1623-1644.
- [37] Merico A, Tyrrell T, Lessard E J, et al. Modelling phytoplankton succession on the Bering Sea shelf: role of climate influences and trophic interactions in generating *Emiliania huxleyi* blooms 1997-2000 [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2004, 51: 1803-1826.
- [38] Lehmann M F, Sigman D M, McCorkle D C, et al. Origin of the deep Bering Sea nitrate deficit: Constraints from the nitrogen and oxygen isotopic composition of water column nitrate and benthic nitrate fluxes [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19.
- [39] Tanoue E, Handa N. Differential sorption of organic matter by various sized sediment particles in recent sediment from the Bering Sea [J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1979, 35: 199-208.
- [40] Thompson S, Eglinton G. The fractionation of a recent sediment for organic geochemical analysis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42: 199-207.
- [41] 祁第, 陈立奇. 北冰洋酸化指标——海水文石饱和度变异的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 569-576. [QI Di, CHEN Liqi. Review on researches of aragonite saturation state in the Arctic Ocean; A key parameter of Arctic Ocean acidification[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5):

- 569-576.]
- [42] Yamamoto-Kawai M, McLaughlin F, Carmack E. Effects of ocean acidification, warming and melting of sea ice on aragonite saturation of the Canada Basin surface water [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38.
- [43] McNeil B I, Matear R J. Southern Ocean acidification: A tipping point at 450-ppm atmospheric CO₂ [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105: 18860-18864.
- [44] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea water [M]//*The Sea*. Wiley, New York, 1963; 26-77.
- [45] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27: 213-250.
- [46] Müller P J. C/N ratios in Pacific deep-sea sediments: Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41: 765-776.
- [47] Schubert C J, Calvert S E. Nitrogen and carbon isotopic composition of marine and terrestrial organic matter in Arctic Ocean sediments: implications for nutrient utilization and organic matter composition [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2001, 48: 789-810.
- [48] Hedges J I, Oades J M. Comparative organic geochemistries of soils and marine sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27: 319-361.
- [49] Hu L M, Shi X F, Yu Z G, et al. Distribution of sedimentary organic matter in estuarine-inner shelf regions of the East China Sea: Implications for hydrodynamic forces and anthropogenic impact [J]. *Marine Chemistry*, 2012, 142-144: 29-40.
- [50] Hu L M, Shi X F, Guo Z G, et al. Sources, dispersal and preservation of sedimentary organic matter in the Yellow Sea: The importance of depositional hydrodynamic forcing [J]. *Marine Geology*, 2013, 335: 52-63.
- [51] Volkman J K. Lipid markers for marine organic matter, *Marine Organic Matter: Biomarkers, Isotopes and DNA* [M]. Springer, 2006: 27-70.
- [52] Naidu A, Scanlan R, Feder H, et al. Stable organic carbon isotopes in sediments of the north Bering-south Chukchi seas, Alaskan-Soviet Arctic Shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 1993, 13: 669-691.
- [53] Eicken H. The role of Arctic sea ice in transporting and cycling terrestrial organic matter. The organic carbon cycle in the Arctic Ocean: present and past [M]. Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [54] Ping C L, Michaelson G J, Guo L, et al. Soil carbon and material fluxes across the eroding Alaska Beaufort Sea coastline [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005-2012), 2011: 116.
- [55] 杨伟锋, 陈敏, 刘广山, 等. 楚科奇海陆架区沉积物中核素的分布及其对沉积环境的示踪[J]. *自然科学进展*, 2002, 12: 515-518. [YANG Weifeng, CHEN Min, LIU Guangshan, et al. Distribution of the radionuclides in sediments from the Chukchi Sea shelf and its implication for the depositional regime [J]. *Progress in Natural Science*, 2002, 12: 515-518.]
- [56] 余雯, 何建华, 李奕良, 等. 基于²¹⁰Pb 测年法的楚科奇海陆架北缘有机碳沉积通量研究[J]. *极地研究*, 2012, 24(4): 391-396. [YU Wen, HE Jianhua, LI Yiliang, et al. ²¹⁰Pb-derived organic carbon deposition flux on the north Chukchi shelf [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(4): 391-396.]
- [57] Buesseler K O. The decoupling of production and particulate export in the surface ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12: 297-310.
- [58] Mayer L M. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 1271-1284.
- [59] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis [J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49: 81-115.
- [60] Hartnett H E, Keil R G, Hedges J I, et al. Influence of oxygen exposure time on organic carbon preservation in continental margin sediments [J]. *Nature*, 1998, 391: 572-575.
- [61] Schulz H D, Zabel M. *Marine Geochemistry* [M]. Springer, 2006.
- [62] Keil R G, Dickens A F, Arnarson T, et al. What is the oxygen exposure time of laterally transported organic matter along the Washington margin? [J] *Marine Chemistry*, 2004, 92: 157-165.
- [63] Connelly T L, Deibel D, Parrish C C. Biogeochemistry of near-bottom suspended particulate matter of the Beaufort Sea shelf (Arctic Ocean): C, N, P, $\delta^{13}\text{C}$ and fatty acids [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 43: 120-132.
- [64] Dunton K H, Weingartner T, Carmack E C. The nearshore western Beaufort Sea ecosystem: circulation and importance of terrestrial carbon in arctic coastal food webs [J]. *Progress in Oceanography*, 2006, 71: 362-378.
- [65] Vonk J E, Alling V, Rahm L, et al. A centennial record of fluvial organic matter input from the discontinuous permafrost catchment of Lake Torneträsk [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005-2012), 2012, 117.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND BURIAL
RECORDS OF ORGANIC CARBON IN THE
COLUMN SEDIMENTS FROM WESTERN BERING SEA

HU Limin^{1,2}, SHI Xuefa^{1,2}, LIU Yanguang^{1,2}, BAI Yazhi^{1,2}, DONG Linsen^{1,2}, HUANG Yuanhui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

2. Function Laboratory for Marine Geology, National Oceanography Laboratory, Qingdao 266061 China)

Abstract: Using the two column samples (BL16 and BL10) taken during the Fifth Chinese National Arctic Expedition Cruise at the western Bering Sea, the geochemical characteristics and burial records of total organic carbon (TOC) over the past century were studied. The results show that the depositional regime was rather stable in the study area according to the vertical distribution of ²¹⁰Pb profiles and its relationship to the core depth. Therefore, the sedimentary record of the past seventy years could be established for the two short cores respectively. As in the core BL16, there is a good correlation between TOC and total nitrogen (TN) as well as grain sizes, suggesting a consistent provenance of sedimentary organic components and the control of sediment grain size over the OM burial. On the other hand, the core BL10 from the upper slope was composed of more coarser sediments where exist poor relation between TOC and TN, probably caused by the complex depositional regime, varying OM input and microorganism activity. A clear shift of TOC and CaCO₃ abundance in the upper sections (about twenty years ago) were observed in both two cores, which may indicate the recent regional warming in the arctic area and ocean acidification. The TOC sequestration in the two cores were estimated as 3100 mmol C • m⁻² • a⁻¹ and 1400 mmol C • m⁻² • a⁻¹, respectively. After the examination of the preservation of sedimentary TOC and the regional correlation of TOC sink fluxes, the relatively higher sequestration of TOC in the study area could be constrained by the higher marine productivity, quick POC export from the upper water column, effective metabolic processing and higher sedimentation rates of the seabed.

Key words: organic carbon; sediment records; sources; depositional regime; sequestration; the Bering Sea