

夏逸, 胡利民, 黄元辉, 等. 北极拉普捷夫海夏、秋季颗粒有机碳的分布与来源[J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 58–70. doi:10.12284/hyxb2022102
Xia Yi, Hu Limin, Huang Yuanhui, et al. Distribution and source of particulate organic carbon in the Arctic Laptev Sea during late summer and early fall[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(7): 58–70. doi:10.12284/hyxb2022102

北极拉普捷夫海夏、秋季颗粒有机碳的分布与来源

夏逸¹, 胡利民^{2,3*}, 黄元辉^{1,3}, 白亚之^{1,3}, 叶君^{2,3}, 范迪⁴, 孟宪伟^{1,3}, 石学法^{1,3}

(1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 中国海洋大学 海洋地球科学学院 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋同位素与地质年代测定平台, 山东 青岛 266237)

摘要: 随着全球变暖的加剧, 北极陆架边缘海碳的源汇过程对全球碳循环的影响及其气候环境效应日益显著。拉普捷夫海作为北冰洋典型的陆架边缘海, 在大河、海冰、海洋初级生产力及海岸侵蚀的影响下, 该区沉积有机碳的来源、输运和埋藏等过程独具特色。本文基于 2018 年中俄第二次北极联合科考获得的悬浮颗粒物样品和水文资料, 研究了夏末秋初拉普捷夫海颗粒有机碳的分布特征、来源及其影响因素。结果表明, 颗粒有机碳 (POC) 的浓度位于 35.27~1 185.58 $\mu\text{g/L}$ 之间, 平均为 172.65 $\mu\text{g/L}$ 。受河流输入、海岸侵蚀和海洋初级生产力的影响, 表层 POC 浓度分布呈现近岸高、远岸低趋势; 底层 POC 浓度分布主要受控于沉积再悬浮作用, 高浓度 POC 出现在勒拿河三角洲的东部区域。总悬浮颗粒物浓度与 POC 浓度总体呈显著正相关, 显示出其对 POC 空间分布的直接影响, 且两者在底层中的相关性要高于表层, 表明不同层位的 POC 可能存在来源差异。研究区 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值处于 -31.03‰ ~ -25.79‰ 之间, 表层 $\delta^{13}\text{C}$ 值较底层明显偏负, 且部分站位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值甚至低于周边陆源有机碳的端元, 这反映了可能除陆源输入的贡献外, 近海浮游植物直接利用大量陆源有机质降解产生的溶解无机碳的过程也对该区域 POC 的供应和来源解析具有重要的影响。

关键词: 北极; 拉普捷夫海; 颗粒有机碳; 总悬浮颗粒物; 来源; 陆源输入

中图分类号: P736.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)07-0058-13

1 引言

海洋作为地球表层系统中最为活跃的碳库, 其碳储量约为大气的 50 倍, 在全球碳循环中起着重要作用^[1-3]。全球各大河流每年向海输送的有机碳总量约为 4.0×10^8 t, 其中颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 约占 50%^[4-5]。河口-陆架边缘海区域是 POC 迁移、埋藏、再矿化等一系列生物地球化学过程的重要场所^[6-7], 对该区有机碳源汇过程的系统研究有助

于加深对全球碳循环以及气候变化等问题的认知和理解^[8-9]。

随着全球变暖加剧, 北极海冰快速退缩, 北冰洋尤其是其巨大的北极陆架已逐渐成为全球碳循环过程中的重要“汇”^[10-13]。北极陆架作为全球最大的陆架, 有机碳的埋藏量约为全球海洋总量的 11%^[14]。其中, 北极东西伯利亚陆架 (包括拉普捷夫海、东西伯利亚海和楚科奇海) 约占北极大陆架面积的 40%; 与一般中低纬度的陆架边缘海不同, 该区域季节性海冰

收稿日期: 2021-09-14; 修订日期: 2021-12-10。

基金项目: 国家自然科学基金 (42130412, 42076074); 山东省“透明海洋”科技创新工程专项 (2018SDK0104-3); 山东省“泰山学者”建设工程专项 (TSQN20182117)。

作者简介: 夏逸 (1997—), 男, 湖北省鄂州市人, 主要从事海洋沉积地球化学研究。E-mail: xy1997@fio.org.cn

* 通信作者: 胡利民, 男, 教授, 主要从事海洋沉积地球化学研究。E-mail: hulimin@ouc.edu.cn

过程和富冰冻土沉积的广泛发育显著影响着海洋“生物泵”过程以及陆源 POC 对海洋的输入及埋藏保存^[15], 使得北极东西伯利亚陆架 POC 的源汇特征独具特色^[16-18]。

拉普捷夫海位于北极东西伯利亚陆架西部, 东经新西伯利亚群岛间的海峡(德米特里-拉普捷夫海峡等)与东西伯利亚海相连, 西经北地群岛间的维利基茨基海峡等与喀拉海相通, 北临北冰洋深水盆地(图 1), 超 2/3 的区域水深小于 20 m^[19]。受北大西洋、太平洋和北冰洋洋流和水团的影响^[20], 水动力条件复

杂。作为北冰洋的“冰工厂”^[19], 拉普捷夫海冬季发育有陆架冰间湖^[21], 海洋初级生产力较周边海域显著提高^[22-23]。夏季接收北极大河勒拿河巨量的淡水和物质输入^[19](勒拿河 POC 入海通量达 1.2×10^6 t/a), 并在东西伯利亚沿岸流的影响下大部分向东输送, 少数可通过德米特里-拉普捷夫海峡影响东西伯利亚海^[24-25]。除径流输入外, 海岸富冰冻土侵蚀也为其提供了大量的陆源 POC^[26-27], 每年向海贡献约 1.88×10^6 t 陆源有机碳(含溶解态)^[28]。此外, 海洋浮游植物的初级生产也是该区 POC 的重要来源^[29]。在全球变暖的背景下, 受陆

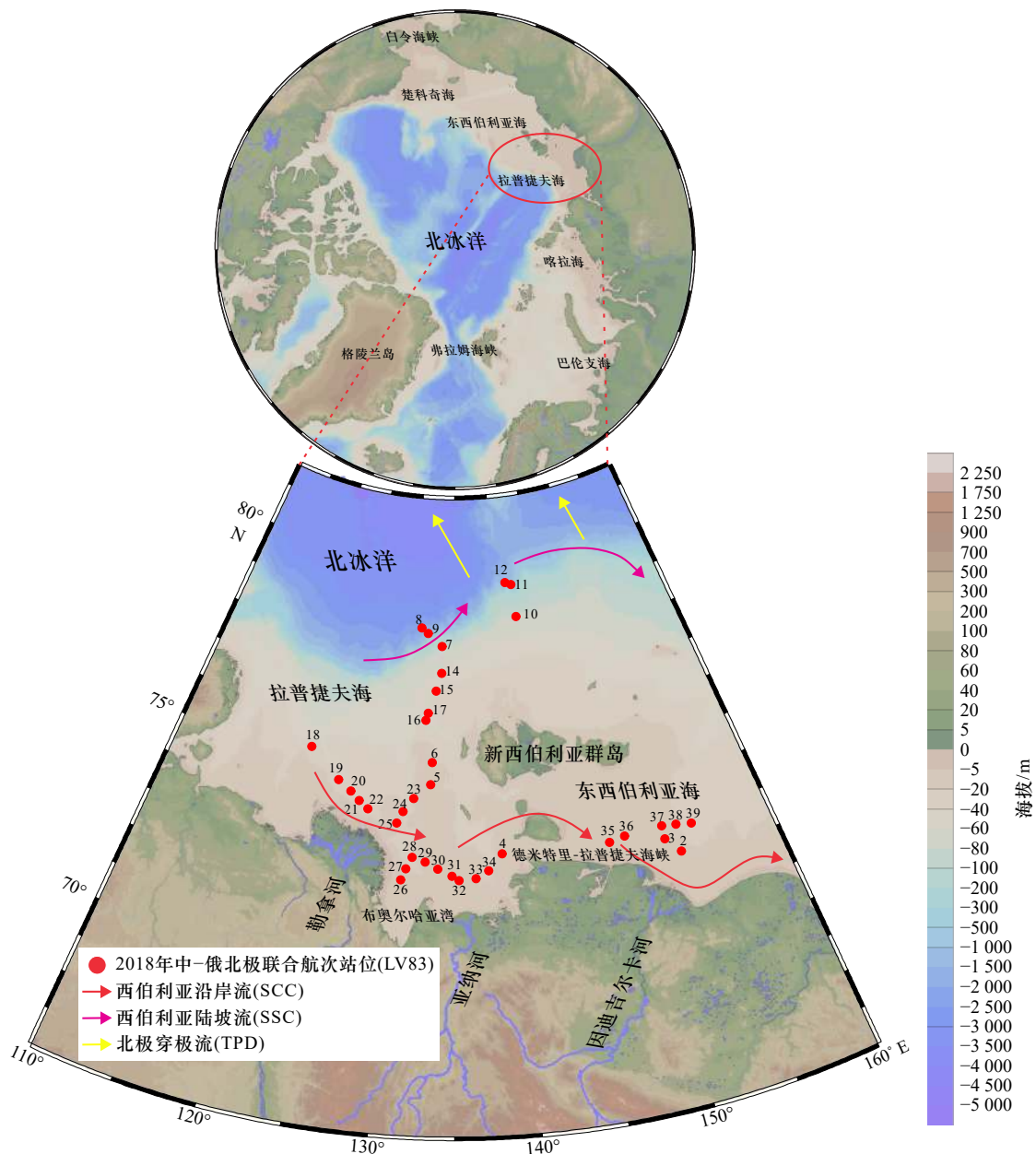


图 1 北极东西伯利亚陆架区域概况及采样站点

Fig. 1 Survey and sampling stations of the East Siberian Shelf in the Arctic

环流模式改自文献 [14, 32]

Circulation model modified from references [14, 32]

源输入和海冰退化等因素综合影响,拉普捷夫海 POC 的生产、输运和沉积模式都发生着相应的变化,使其成为北极陆架有机碳源汇过程研究最具代表性的海区之一。

前人对拉普捷夫海有机碳来源和沉积埋藏等方面做了较多的研究,发现夏季冰融期陆源 POC 占主导地位^[15];大量陆源 POC 向海洋输送途中发生了显著降解^[30];水体中的 POC 多数与来自流域表层土壤的碳的输入有关,而沉积物中有机碳更多来自于沿岸侵蚀冻土老碳的输入^[31];由此可见,该区域不同环境介质中颗粒有机质的来源及其地球化学行为特征具有显著的时空差异。为进一步了解和评估 POC 的分布特征及其生物地球化学过程,本文依据 2018 年第二次中-俄北极联合科考在拉普捷夫海河口、陆架及陆坡等不同地区获得的悬浮颗粒物样品,重点探讨 POC 的空间分布特征,阐明 POC 来源及其控制影响因素,为进一步评估极地高纬度海域沉积有机碳的源汇过程及其气候环境效应提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 样品采集

2018 年 9-10 月在拉普捷夫海及其毗邻海域采样,此时拉普捷夫海冰覆盖面积处于年际最小时期(<https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-ice-graph/>)。利用海鸟 SBE 19plus V2 CTD 采水器分层取样,共取得 37 站悬浮体样品,取样站位(LV83)如图 1 所示。除北部靠近北冰洋的站位较深外,其余站位水深基本小于 100 m。采样层位分为表层、中间层以及底层(底层仅限于水深小于 200 m 的站位)。同时获得水体的温度、盐度等环境参数。采集到的海水样品用预先称量好的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜(孔径为 0.7 μm,直径为 47 mm,预先在 450℃ 下灼烧 4 h)进行抽滤,1 000 mL 水样经过滤后,以少量的去离子水洗去盐分,然后将滤膜置于-20℃ 环境中冷冻保存至上机测试。

2.2 样品分析

悬浮体和颗粒有机碳氮分析在自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室完成。将滤膜冷冻干燥后用 10⁻⁵ g/g 的电子分析天平称量,得到带有悬浮体的滤膜总质量,减去原空白膜的质量,可得到总悬浮颗粒物(Total Suspended Solids, TSS)的质量,除以过滤体积即为总悬浮颗粒物浓度。然后将滤膜置于密闭干燥器内经浓度为 12 mol/L 的浓盐酸熏蒸 48 h 以除去无机碳,滴加 1 滴浓度为 120 mol/L 的浓盐酸于滤膜上以检验无机碳是否完全去除,之后使用超纯水

冲洗滤膜背面至淋洗液为中性,之后将滤膜置于 60℃ 下低温烘干 12 h 以去除水分。将处理好的膜样分为两份,一份用锡纸包裹好用 Vario EL III 型元素分析仪(德国,Elementar)测定颗粒有机碳和颗粒氮(Particulate Nitrogen, PN)的含量。每 20 个样品运行 1 个标准样品(GSD-9)以检测仪器的稳定性,标准样品的标准偏差均小于 8%。标准偏差(Standard Deviation, STD)的计算公式为

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (1)$$

式中, \bar{x} 代表样品 x_1, x_2, \dots, x_n 的均值; N 代表样品总数。有机碳稳定同位素($\delta^{13}C$)分析在青岛海洋科学与技术试点国家实验室完成,稳定同位素分析测试采用高温氧化法。另一份膜样使用锡纸包好(约含 30 μg 有机碳)上机测试,测试质谱仪型号为 MAT 253 plus,进样设备为 EA-Isolink,选择 IAEA-600 和 USGS-40 标准作为质量监控,碳稳定同位素比值采用国际标准 V-PDB,用 $\delta^{13}C$ 表示,计算公式为

$$\delta^{13}C (\text{‰}) = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准物}} - 1) \times 10^3, \quad (2)$$

式中, R 代表 $^{13}C/^{12}C$, 标准偏差小于 0.1‰。

3 结果与讨论

3.1 拉普捷夫海 POC 浓度及区域对比

研究区 TSS 浓度范围为 0.36~66 mg/L, 平均浓度为(4.56±8.84)mg/L; POC 浓度介于 35.27~1 185.58 μg/L 之间, 平均浓度为(172.65±175.25) μg/L(表 1)。勒拿

表 1 不同海域海水中 POC 的浓度

Table 1 The concentrations of POC in different oceanic areas

海区	采样时间	POC浓度/(μg·L ⁻¹)	资料来源
勒拿河口	2018年9-10月	141.06~1 185.58	本文
拉普捷夫海陆架	2018年9-10月	35.27~104.07	本文
东西伯利亚海陆架	2018年9-10月	57.80~243.90	本文
东西伯利亚海	2016年8-9月	13.15~453.27	文献[32]
拉普捷夫海陆架	2014年7-8月	38.00~138.00	文献[33]
布奥尔哈亚湾及拉普捷夫海陆架	2008年8-9月	18.00~1 850.40	文献[25]
楚科奇海	2012年7-9月	60.93~466.60	文献[34]
喀拉海	2007年9月	6.30~2 404.70	文献[35]
东西伯利亚海陆架	2018年9-10月	57.80~243.90	本文
长江口及其东海陆架	2015年11月	650.00~8 250.00	文献[36]
黄河口及莱州湾	2012年9月	42.25~1 018.87	文献[37]

河口附近 29 站位的底层 TSS 浓度最大, 其对应的 POC 浓度也达到最大值(图 2)。拉普捷夫海 POC 在近岸区域分层明显, 受沉积物再悬浮作用影响表现为底层浓度普遍高于表层; 靠近陆坡由于水深增大和光合作用的减弱, POC 浓度垂向上呈现出先增大后减小的趋势。与前人在陆架区的研究结果比较发现, POC

浓度范围基本一致(表 1)。与其他毗邻海区相比较, 拉普捷夫海的 POC 浓度高于东西伯利亚海和楚科奇海, 低于喀拉海, 反映出河流输入的直接影响^[28]。与中纬度河口-陆架区域进行比较, 发现本区 POC 浓度远低于长江口区域, 与黄河口及其附近海区的 POC 浓度相当(表 1)。

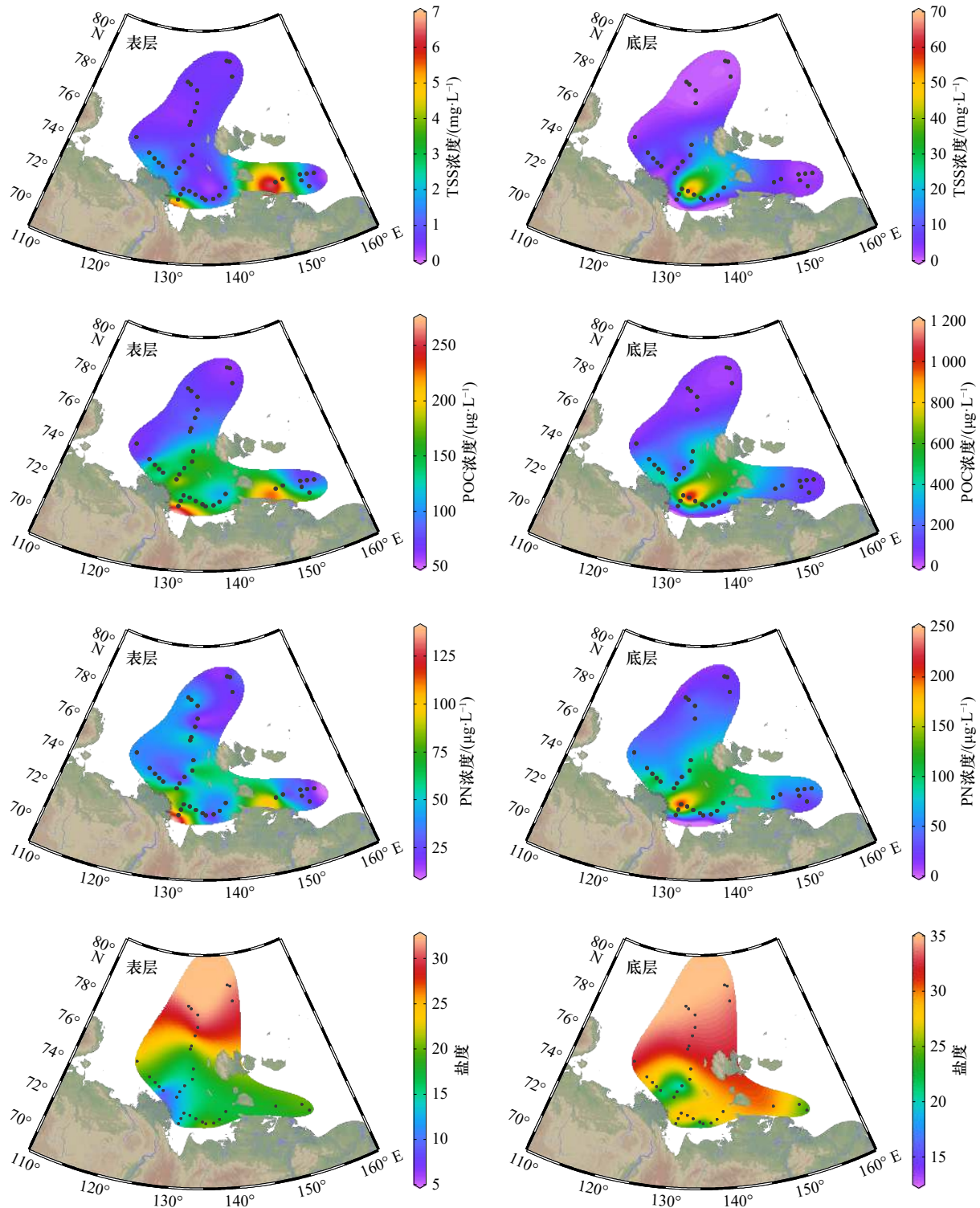


图 2 研究区 TSS 浓度、POC 浓度、PN 浓度、盐度水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of TSS concentration, POC concentration, PN concentration and salinity in the study area

3.2 POC 空间分布特征及其影响因素

3.2.1 POC 水平分布

表层 POC 浓度介于 60.79~261.84 $\mu\text{g/L}$ 之间, 平均浓度为 $(123.74\pm 47.43)\mu\text{g/L}$ (图 2)。水平分布呈现出近岸高远岸低的趋势, 最大值在勒拿河口附近 (26 站位)。研究区内出现两个高值区, 一个位于勒拿河口附近布奥尔哈亚湾 (Buor-Haya Bay) 以北的区域, 可能反映勒拿河的径流输入的直接影响^[19]; 另一个位于德米特里-拉普捷夫海峡的南侧, 此处的海岸类型以富冰冻土为显著特征, 易受到近岸侵蚀作用影响^[26], 体现了海岸侵蚀对陆源物质输入的影响; TSS、PN 在水平分布上与 POC 一致 (图 2), 同样呈现近岸高、远岸低的分布特征, TSS 极大值出现在德米特里-拉普捷夫海峡附近, 显示出海岸侵蚀的直接影响。

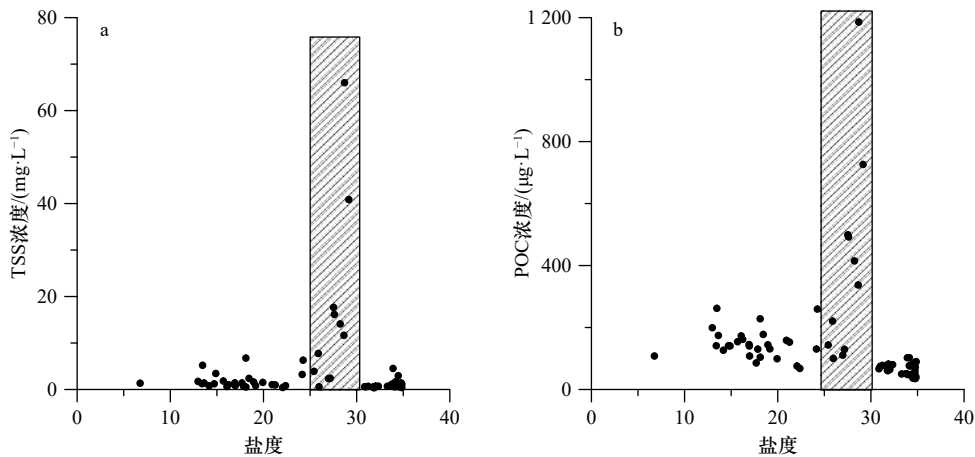


图 3 底层 TSS 浓度(a)和 POC 浓度(b)与盐度相关性分析

Fig. 3 Correlation between TSS concentration (a), POC concentration (b) and salinity at the bottom

研究区 POC 浓度与 TSS 浓度整体呈正相关 ($R^2=0.87, p<0.01$) (图 4a), 表明 TSS 的组成和分布直接影响 POC 浓度的多少^[42]; 同时两者在底层水体的相关性更高 ($R^2=0.88, p<0.01$) (图 4c), 这主要是由于不同层位 TSS 的来源不同。研究指出, TSS 中 POC 的质量分数——POC% ($\text{POC}\% = \frac{m_{\text{POC}}}{m_{\text{TSS}}} \times 100\%$, 其中 m 为质量) 能大体指示不同层位 TSS 的来源; 若 POC% 趋于稳定则来源一致, POC% 波动大则说明不同层位的 TSS 来源不同^[42-43]。由图 5 可知, 研究区 POC% 随着 TSS 浓度的降低而快速升高, 当 TSS 浓度大于 10 mg/L 时, POC% 开始趋于稳定, 保持在 3% 附近; 当 TSS 浓度小于 10 mg/L 时, POC% 快速增大, 而且这一趋势在底层更为显著 (图 5), 这可能是由于随着 TSS 浓度的增大, 水体透光性减弱, 海洋自生生产力下降, 河流和海岸侵蚀带来的 POC 含量较海洋浮游生物产生的 POC 含量低, 海洋自生 POC 被陆源物质稀释^[43]。底

层 POC 浓度在 40.25~1 185.58 $\mu\text{g/L}$ 之间, 平均浓度为 $(285.47\pm 246.87)\mu\text{g/L}$ (图 2), 整体浓度大于表层。受沉积物再悬浮作用的影响^[19, 33, 38], 底层 POC 的水平分布与表层不同, POC 浓度高值出现在勒拿河三角洲东部区域; 底层 TSS、PN 的浓度整体也大于表层, 与 POC 具有较好的一致性, TSS、PN 的极大值均出现在勒拿河三角洲附近 (图 2)。

结合盐度的空间分布发现, 当盐度为 27~30 时, 底层 POC 的浓度出现显著高值, 对应勒拿河和因迪吉尔卡河的河口附近站位 (图 3b)。这可能与河口区的絮凝沉降作用有关^[39-40]; 底层 TSS 浓度与盐度的相关性也有同样的现象 (图 3a)。这可能是由勒拿河所携带的大量物质在絮凝沉降作用下快速沉积所导致^[41]。

层受沉积物影响较大, 也进一步推测出沉积物多来自于陆源。通过 TSS 浓度与不同层位 POC 浓度及 POC% 相关性可以看出, 不同层位颗粒物质的来源组成存在差异, 受到沉积物再悬浮的影响^[44], 底层 TSS 和 POC 来源可能更为一致, 而表层 TSS 和 POC 受陆源输入和生物活动等多重因素的影响, 两者相关性较弱。

3.2.2 POC 剖面分布

为进一步了解颗粒物由陆向海的输运及分布特征, 本文选取了一条从河口向外至陆架边缘的典型剖面 (垂直于岸线, 图 6), 探讨水体不同层位 POC 的分布及其影响因素。结果显示, 表层 POC 浓度随离岸距离的增加先逐渐减小而后保持不变 (图 6), 结合盐度变化 (图 2), 表明勒拿河径流的影响向北逐渐减弱; 底层 POC 浓度沿陆架向外表现出增大-减小-增大的趋势, 除勒拿河口处 28 站位的一个极大值外, 整

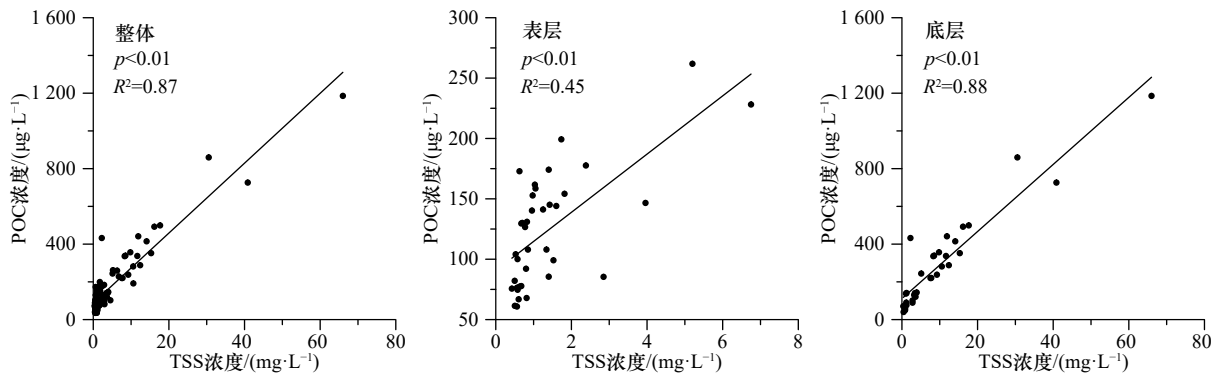


图4 不同层位 TSS 浓度与 POC 浓度的相关关系

Fig. 4 Correlation between TSS concentration and POC concentration in different layers

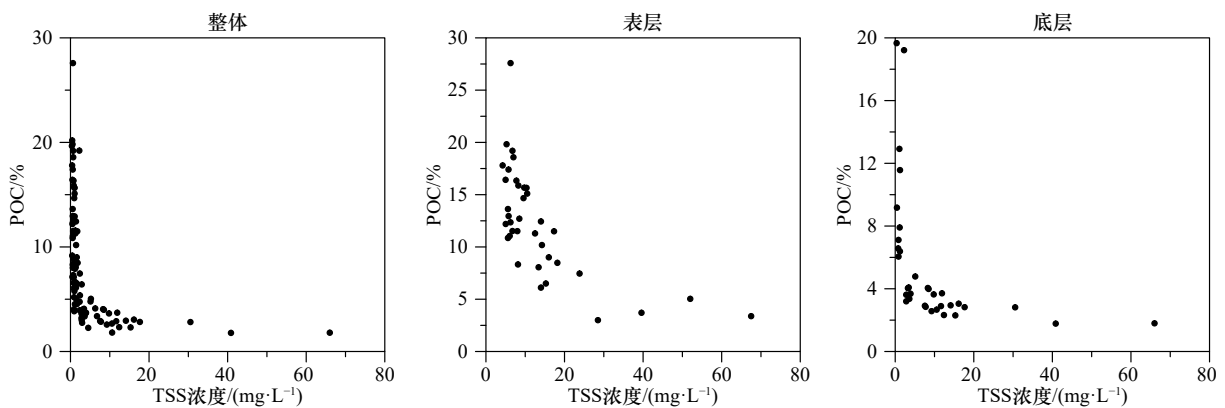


图5 不同层位 POC 质量分数(POC%)与 TSS 浓度相关关系

Fig. 5 Correlation between POC% and TSS concentration in different layers

体变化不大而且表层在 28 站位处于低值(图 6), 表明勒拿河输入的 POC 可能在河口区大量沉降。底层 POC 浓度整体大于表层, 可能与沉积再悬浮作用有关。TSS 的剖面分布整体与 POC、PN 相一致。已有研究表明, 拉普捷夫海 POC 由陆架向外海输运主要通过勒拿河径流输入的扩散和沉积物再悬浮形成底部雾状层等方式^[33, 45-46]。另一方面, 除了水动力条件的影响, 作为北冰洋重要的冰工厂, 海冰也是 POC 跨陆架运输的重要载体^[15, 47]。据估算, 拉普捷夫海通过海冰输出的 POC 占河流输入的 1/5~1/2^[48-49]。冬季有大量沉积物通过一系列物理过程进入到海冰中(如冰盖对海水中悬浮体的捕获、锚冰对沉积物的刮蚀、河流对沿岸海冰的作用以及风尘输入等)^[50-53], 并在洋流和风的驱动下进行跨越北冰洋的输运。

3.3 POC 物源分析

为了评估北极拉普捷夫海不同来源颗粒有机碳的贡献, 本文利用 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$) 值和 POC/PN (即二者浓度的比值) 这两个典型指标, 通过区域对比研究, 对拉普捷夫海不同区域 POC 组成和来源进行进一步解析。结果显示, 拉普捷夫海 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

范围在 -31.03% ~ -25.79% 之间, 与前人在拉普捷夫海获取的 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围 (-30.90% ~ -25.90%) 基本一致^[33]; 表层 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -30.99% ~ -26.85% , 平均值为 -28.71% , 水平呈现出近岸低远岸高的分布趋势(图 7); 底层 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -31.03% ~ -25.79% (图 7), 平均值为 -27.26% , 最低值出现在勒拿河的河口附近(图 7)。

结合前人在北极地区报道的颗粒有机碳同位素的陆、海端元值(表 2), 指示底层 POC 主要受陆源输入的影响。尽管瑞利分馏作用会造成极地整体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值较中低纬度更加偏负^[54], 但部分表层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值出现异常偏负的信号, 甚至较一般陆源有机碳更加偏负 (-30.99% ~ -29.81%)(图 8), 这可能说明不同海区 POC 的输入和产生过程中还受其他因素的影响, 为进一步探究该区 POC 的来源和生物地球化学过程, 本文将从以下几个方面进行阐述。

3.3.1 不同来源 POC 输入及其影响因素

研究显示, 拉普捷夫海大约每年接收 745 km^3 的淡水径流, 其中勒拿河的贡献就超过了 $2/3$ (566 km^3)^[19]。河流在向拉普捷夫海输送淡水的同时, 也带来了大量

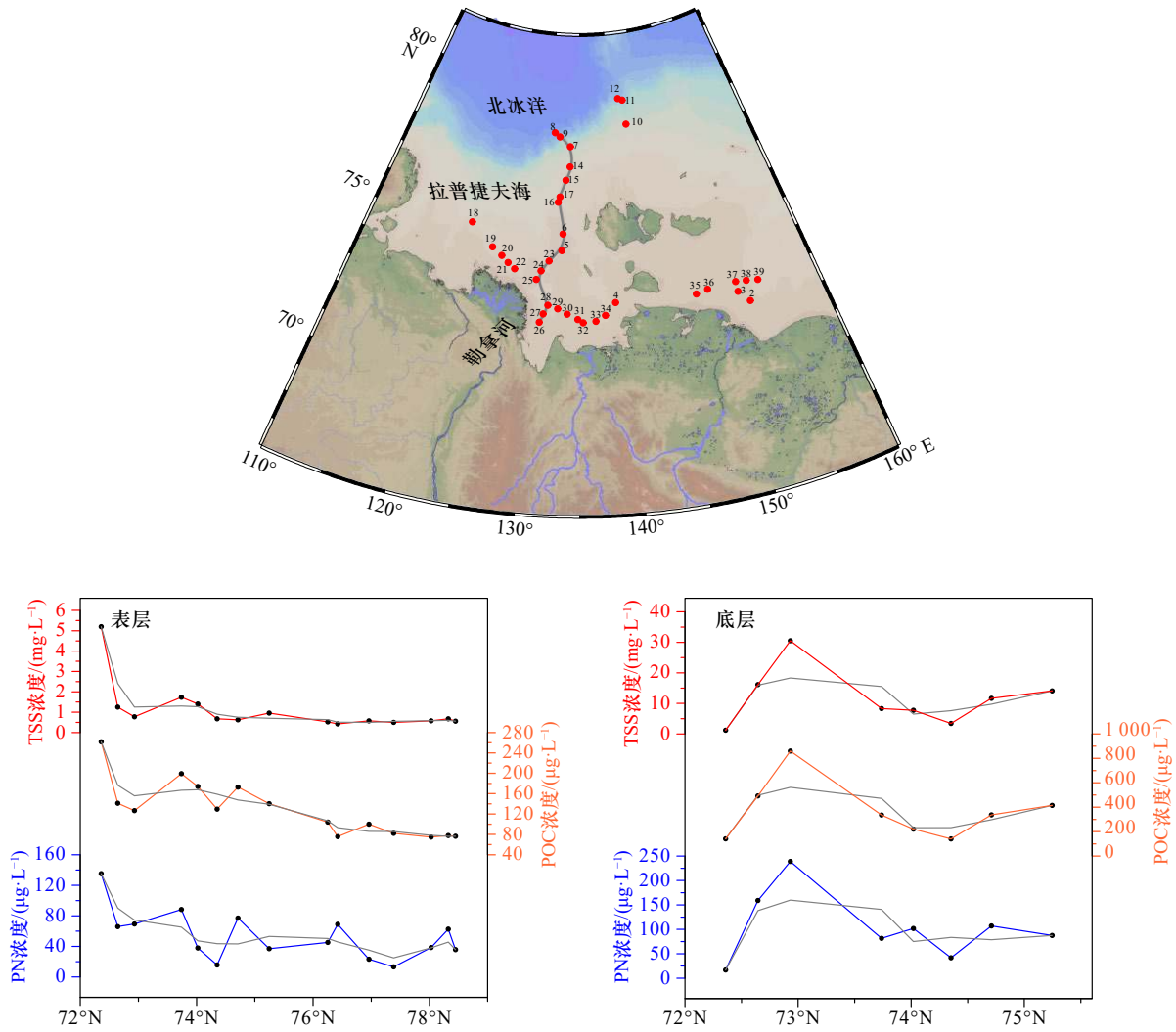


图 6 剖面站位及不同层位 TSS、POC、PN 浓度变化趋势

Fig. 6 Section stations and change trend of TSS, POC and PN concentrations in different layers

灰色趋势线利用三点平滑法获得

The gray trend line is made by three-point smoothing method

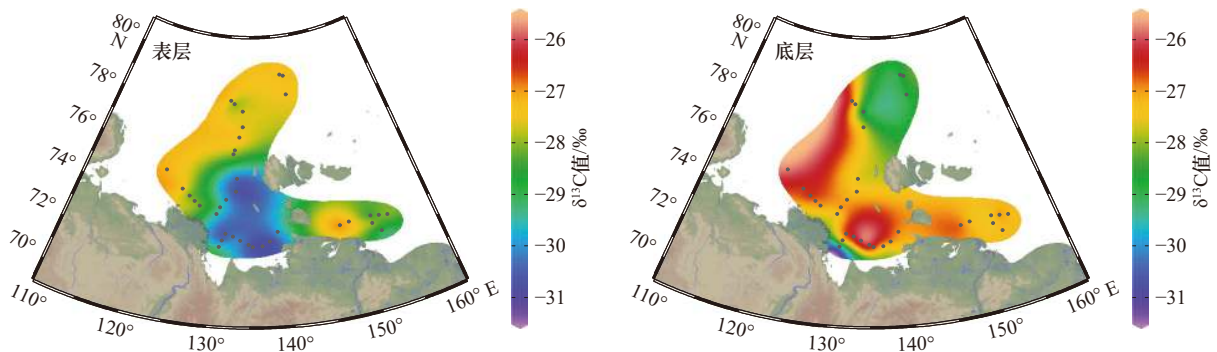


图 7 研究区表层和底层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值水平分布

Fig. 7 Horizontal distribution of $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ in surface and bottom layers in the study area

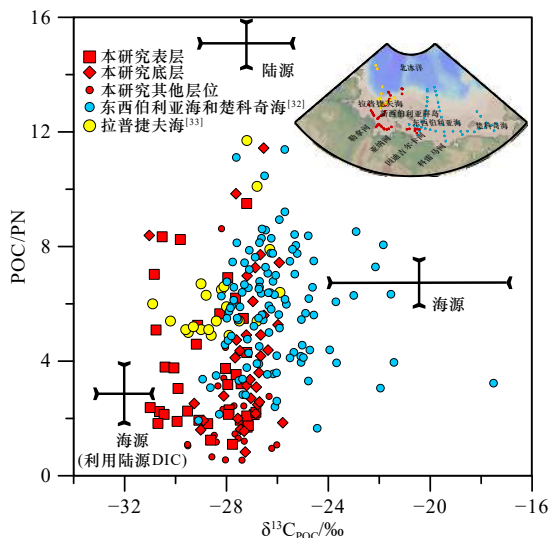
的有机碳供应 ($6.8 \times 10^6 \text{ t/a}$), 勒拿河输送的溶解有机碳和颗粒有机碳年供应量分别为 $3.6 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $1.2 \times 10^6 \text{ t}$ ^[19]。冬季由于海冰的限制, 导致河流输入的物质只占年际

的 4%, 而每年夏季冰融期, 河流的供应量随着海冰的融化显著增长^[60]。前人研究表明, 勒拿河流域 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围较大, 介于 $-36.1\text{‰} \sim -24.3\text{‰}$ 之间^[56], 表明

表2 不同 POC 端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 值Table 2 The characteristic $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratio of different POC end members

端元POC	$\delta^{13}\text{C}$ 值/‰	C/N	参考文献
陆源POC(河流、冻土)	-29.50~-25.63	14~16	文献[25-26, 55-58]
海洋POC	-24.00~-17.00	6~8	文献[26, 32, 59]

POC 的来源较为多样; 考虑到径流量的季节性差异以及河流中 POC 的降解变化, 认为勒拿河 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 的端元值约为 $-29.5\% \sim -28.0\%$ [57, 61]。另一方面, 勒拿河所输送的 POC 多来自于表层土壤和植物碎屑 [62], 这类 POC 抗降解能力差 [63], 除少数粗粒悬浮颗粒物(泥沙等)携带的有机碳因粒度和水动力条件的改变易在河口三角洲处沉降 [19] (从近岸底层水体中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值可以看出底层 POC 有来自河流的贡献) (图 8) 外, 大多都在陆架区降解成溶解态跟随洋流向陆架外运输 [25, 63]。

图8 拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海 POC/PN 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值散点图Fig. 8 The scatter plot of POC/PN and $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ in the Laptev Sea, East Siberian Sea and Chukchi Sea

此外, 陆源输入除河流供给外, 海岸侵蚀所带来的 POC 的输入也是不可忽略的。研究显示, 全球约 50% 的土壤有机碳埋藏在北极冻土中 [64], 除流域外, 还有一部分以沿岸冻土与海冰混合物的形式存在。这类沿岸富冰的冻土沉积有机碳的含量比普通土壤高 10~30 倍, 是北极陆架地区一类非常特殊且重要的陆源有机碳 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值介于 $-26.97\% \sim -25.63\%$) [26, 65]。拉普捷夫海近岸发育的这类冻土沉积导致海岸侵蚀作用非常强烈, 造成大量的陆源有机碳输入到拉普捷夫海中, 该区海岸侵蚀输入的陆源有机碳几乎是河流

输入的 2 倍 [19, 26]。而且, 来自富冰冻土的陆源 POC 的抗降解能力强, 可选择性地沉降到陆架区, 并在水动力作用下通过再悬浮向远洋运输 [33, 63, 66]。因此, 从海岸侵蚀程度高的区域内底层可以看到来自富冰冻土的供给 (图 8)。

另一方面, 随着全球变暖的加剧, 北冰洋夏季海冰逐年退减 [67-68]。拉普捷夫海作为北极最高产冰量的海区, 海冰在有机碳的组成、分布以及与海冰相关的“生物泵”过程中发挥重要作用 [69]。冬季拉普捷夫海由于大部分被海冰所覆盖, 影响了海洋生物的光合作用, 同时河道结冰也使得大量的陆源营养物质无法通过河流向拉普捷夫海输送, 导致海洋初级生产力较低 [19]。夏季, 海冰融化以及勒拿河的径流输入, 将大量的营养盐输入到拉普捷夫海。海洋浮游植物由于吸收了大量的营养盐在短时间内大量繁殖(浮游植物勃发), 其中微型和小型浮游植物会优先大量繁殖 [70-71]。已有研究表明, 微型和小型浮游植物所产生的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值会较一般浮游植物偏低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值一般在 $-31\% \sim -29\%$ 之间 [32, 72], 较一般陆源端元更为偏负。浮游植物一般生活在表层水体, 从而使得近岸表层水体中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值较底层相对更偏负 (图 8)。

3.3.2 区域比较

本文的 POC/PN 值介于 0.54~11.44 之间, 与前人在拉普捷夫海测得的 POC/PN 结果(黄色数据点)相比偏小 (图 8)。由于海洋中的 PN 分为颗粒有机氮 (Particulate Organic Nitrogen, PON) 和颗粒无机氮 (PIN) 两部分, PON 的来源和 POC 基本一致, 而 PIN 则主要是来自于海水中的一些含氮化合物(例如硝酸盐和亚硝酸盐等)和细颗粒物(例如黏土矿物)对水体中 NH_4^+ 的吸附 [73], 夏季勒拿河大量营养盐的输入使得水体中无机氮大量增加 [60], 这些无机氮的存在会使得 POC/PN 中的 PN 值偏大, 导致该区 POC/PN 相对偏低。此外, 由于北极地区冰盖的限制, 使得水体中的浮游生物(浮游植物和细菌)受到的光照减少, 部分浮游生物会产生少碳的化合物, 从而使得 POC/PN 值偏小 [74-75]。

与前人在东西伯利亚海和楚科奇海的 POC 数据对比 (图 8), 发现本研究 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较陆源输入贡献端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 值更加偏负, 尤其是表层 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(如前所述)。较早的研究认为, 此种现象是陆源植物碎屑输入导致的 [19]; 也有人表示可能是由于河流中的一种特殊淡水硅藻(丝状绿藻, $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 -37%) 的供给 [76]; 但近年来的研究发现, 这种现象的出现与海洋中的浮游植物密切相关, 即海洋端元的贡献。已有

研究表明^[25,33], 北极区域大量的陆源有机碳在广阔的陆架上发生降解, 伴随二氧化碳脱气作用, 产生较多溶解无机碳(DIC)。这种由陆源有机碳降解形成的DIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较一般海洋捕获大气中 CO_2 所产生的DIC偏负, 并且容易在近海区域被海洋浮游植物所利用, 从而导致海洋浮游植物产生的POC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏负^[25]。结合以上前人的说法, 如图9所示, 表层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值偏负的点所处的盐度范围大多在15~20之间, 这也进一步证实了表层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值偏负与海洋浮游植物利用陆源有机碳降解形成的DIC有关。

4 结论

拉普捷夫海夏季POC浓度的空间分布整体受陆源输入、海洋浮游植物和沉积再悬浮作用的影响, 表层POC浓度呈现近岸高远岸低的分布趋势; 底层POC浓度分布主要受控于沉积物再悬浮等因素。POC浓度与TSS浓度总体上呈正相关关系, 底层相关性更高, 这说明不同来源的TSS也是控制POC浓度分布特征的重要因素, 表层相对接受了更多新鲜有机质的输入, 而底层POC主要受沉积物再悬浮作用, 更多体现陆源输入的影响。除了受河流和海岸侵蚀等外部供应, 部分站位表层POC偏负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值反映了海洋浮游植物可直接利用陆源有机碳降解形成的DIC, 这对于应用端元混合模型评估北极陆架边缘海POC来

参考文献:

- [1] Siegenthaler U, Sarmiento J L. Atmospheric carbon dioxide and the ocean[J]. *Nature*, 1993, 365(6442): 119–125.
- [2] 张海波, 杨鲁宁, 王丽莎, 等. 2013年夏季黄、渤海颗粒有机碳分布及来源分析[J]. *海洋学报*, 2016, 38(8): 24–35.
Zhang Haibo, Yang Luning, Wang Lisha, et al. Distribution and source analyses of particulate organic carbon in the Yellow Sea and Bohai Sea during summer, 2013[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(8): 24–35.
- [3] Stocker T, Plattner G K, Dahe Q. IPCC climate change 2013: the physical science basis—findings and lessons learned[C]//Proceedings of the EGU General Assembly Conference. London: EGU, 2014.
- [4] Li Mingxu, Peng Changhui, Wang Meng, et al. The carbon flux of global rivers: A re-evaluation of amount and spatial patterns[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 80: 40–51.
- [5] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(1): 23–41.
- [6] Blair N E, Aller R C. The fate of terrestrial organic carbon in the marine environment[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4(1): 401–423.
- [7] 王雪景, 金春洁, 王丽莎, 等. 2016年夏季黄、渤海颗粒有机碳的分布特征及影响因素[J]. *海洋学报*, 2018, 40(10): 200–208.
Wang Xuejing, Jin Chunjie, Wang Lisha, et al. Distribution characteristics and influencing factors of particulate organic carbon in the Yellow Sea and the Bohai Sea in summer of 2016[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(10): 200–208.
- [8] McKee B A, Aller R C, Allison M A, et al. Transport and transformation of dissolved and particulate materials on continental margins influenced by major rivers: benthic boundary layer and seabed processes[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(7/8): 899–926.
- [9] Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 597–607.
- [10] 陈建芳, 金海燕, 李宏亮, 等. 北极快速变化对北冰洋碳汇机制和过程的影响[J]. *科学通报*, 2015, 60(35): 3406–3416.
Chen Jianfang, Jin Haiyan, Li Hongliang, et al. Carbon sink mechanism and processes in the Arctic Ocean under arctic rapid change[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(35): 3406–3416.

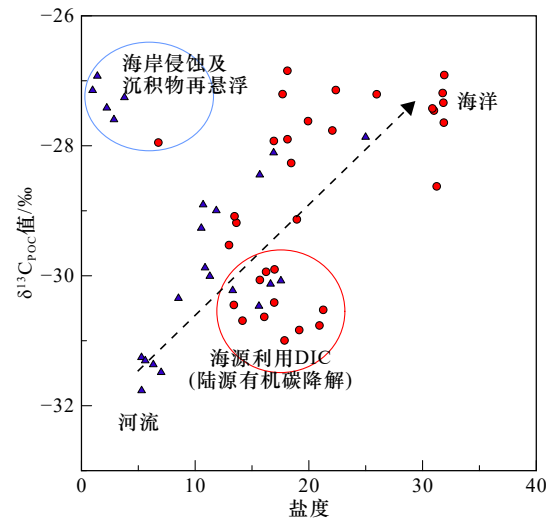


图9 拉普捷夫海、东西伯利亚海表层POC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和盐度的散点图

Fig. 9 The scatter plot of $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ and salinity in the Laptev Sea and East Siberian Sea surface layer

图中红色数据点为研究区表层数据(本文); 紫色数据点为拉普捷夫海和部分东西伯利亚海表层数据^[25]

The red data points in the figure are the surface data of the study area (this paper); the purple data points are the surface data of Laptev Sea and East Siberian Sea^[25]

源或具有重要影响, 对精确阐明北极陆架碳的源汇过程及其对碳循环和气候变化的反馈作用具有重要指示意义。

- [11] Walsh J J. Arctic carbon sinks: Present and future[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1989, 3(4): 393–411.
- [12] Parmentier F J W, Christensen T R, Sørensen L L, et al. The impact of lower sea-ice extent on Arctic greenhouse-gas exchange[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 195–202.
- [13] Bruhwiler L, Parmentier F, Crill P, et al. The arctic carbon cycle and its response to changing climate[J]. *Current Climate Change Reports*, 2021, 7(1): 14–34.
- [14] Stein R, Macdonald R W. Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. global ocean[M]//Stein R, MacDonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004.
- [15] Stein R, MacDonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [16] 胡利民, 石学法, 叶君, 等. 北极东西伯利亚陆架沉积有机碳的源汇过程研究进展[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(10): 1073–1086.
Hu Limin, Shi Xuefa, Ye Jun, et al. Advances in the sources and sink of sedimentary organic carbon in the East Siberian Arctic Shelf[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(10): 1073–1086.
- [17] Bianchi T S, Cui Xingqian, Blair N E, et al. Centers of organic carbon burial and oxidation at the land-ocean interface[J]. *Organic Geochemistry*, 2018, 115: 138–155.
- [18] Macdonald R W, Kuzyk Z Z A, Johannessen S C. The vulnerability of Arctic Shelf sediments to climate change[J]. *Environmental Reviews*, 2015, 23(4): 461–479.
- [19] Stein R, Fahl K. The Laptev Sea: distribution, sources, variability and burial of organic carbon[M]//Stein R, Macdonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004: 213–237.
- [20] Kassens H, Hubberten H W, Pryamikov S M, et al. Russian-German Cooperation in the Siberian Shelf Seas: Geo-System Laptev Sea[M]. Bremen: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 1994.
- [21] Dmitrenko I A, Tyshko K N, Kirillov S A, et al. Impact of flaw polynyas on the hydrography of the Laptev Sea[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(1/3): 9–27.
- [22] Tremblay J E, Gratton Y, Fauchot J, et al. Climatic and oceanic forcing of new, net, and diatom production in the North Water[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(22/23): 4927–4946.
- [23] Arrigo K R. Chapter 7 physical control of primary productivity in Arctic and Antarctic polynyas[J]. *Elsevier Oceanography*, 2007, 74: 223–238.
- [24] Semiletov I, Dudarev O, Luchin V, et al. The East Siberian Sea as a transition zone between pacific-derived waters and Arctic Shelf waters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(10): L10614.
- [25] Alling V, Porcelli D, Mörth C, et al. Degradation of terrestrial organic carbon, primary production and out-gassing of CO₂ along the Laptev and East Siberian seas as inferred from $\delta^{13}\text{C}$ values of DIC[C]//EGU General Assembly 2012. Vienna, Austria: EGU, 2012.
- [26] Vonk J E, Sánchez-García L, Van Dongen B E, et al. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia[J]. *Nature*, 2012, 489(7414): 137–140.
- [27] Semiletov I P, Pipkov I I, Shakhova N E, et al. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(9): 2407–2426.
- [28] Grigoriev M N, Rachold V, Schirmeister L, et al. Organic carbon input to the Arctic seas through coastal erosion[M]//Stein R, Macdonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic: Present and Past. Berlin: Springer, 2004: 41–45.
- [29] Boucsein B, Stein R. Particulate organic matter in surface sediments of the Laptev Sea (Arctic Ocean): application of maceral analysis as organic-carbon-source indicator[J]. *Marine Geology*, 2000, 162(2/4): 573–586.
- [30] Sánchez-García L, Alling V, Pugach S, et al. Inventories and behavior of particulate organic carbon in the Laptev and East Siberian seas[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(2): GB2007.
- [31] Karlsson E S, Charkin A, Dudarev O, et al. Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of terrestrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(7): 1865–1879.
- [32] Jia Renming, Mu Xinyue, Chen Min, et al. Sources of particulate organic matter in the Chukchi and Siberian shelves: clues from carbon and nitrogen isotopes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(9): 96–108.
- [33] Salvadó J A, Tesi T, Sundbom M, et al. Contrasting composition of terrigenous organic matter in the dissolved, particulate and sedimentary organic carbon pools on the outer East Siberian Arctic Shelf[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(22): 6121–6138.
- [34] 于晓果, 雷吉江, 姚旭莹, 等. 楚科奇海表层海水颗粒物组成与来源[J]. *极地研究*, 2014, 26(1): 89–97.
Yu Xiaoguo, Lei Jijiang, Yao Xuying, et al. The composition and sources of suspended particles of in the Chukchi Sea and the central Arctic Ocean[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 89–97.
- [35] Belyaev N A, Peresykin V I, Ponyaev M S. The organic carbon in the water, the particulate matter, and the upper layer of the bottom sediments of the West Kara Sea[J]. *Oceanology*, 2010, 50(5): 706–715.
- [36] 张珊珊, 线薇薇, 梁翠. 2015年秋季长江口有机碳的分布特征及其影响因素[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(1): 55–61.
Zhang Shanshan, Xian Weiwei, Liang Cui. Distribution characteristics of total organic carbon and influence factors in the Yangtze River Estuary in autumn 2015[J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(1): 55–61.
- [37] 白亚之, 刘季花, 胡利民, 等. 2012年秋季黄河河口及莱州湾颗粒有机碳的地球化学特征及其影响因素[J]. *地球化学*, 2016, 45(5):

- 462–474.
- Bai Yazhi, Liu Jihua, Hu Limin, et al. Study on the geochemical characteristics of particulate organic carbon and its controlling factors in the Yellow River Estuary and the Laizhou Bay in autumn, 2012[J]. *Geochimica*, 2016, 45(5): 462–474.
- [38] Tesi T, Semiletov I, Hugelius G, et al. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 133: 235–256.
- [39] Van Leussen W. Aggregation of particles, settling velocity of mud floes a review[M]//Dronkers J, Van Leussen W. *Physical Processes in Estuaries*. Berlin: Springer, 1988.
- [40] Gebhardt A C, Gaye-Haake B, Unger D, et al. Recent particulate organic carbon and total suspended matter fluxes from the Ob and Yenisei rivers into the Kara Sea (Siberia)[J]. *Marine Geology*, 2004, 207(1/4): 225–245.
- [41] Semiletov I P, Pipko I I, Shakhova N E, et al. On the biogeochemical signature of the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2011, 8(2): 2093–2143.
- [42] Zhang S, Gan W B, Ittekkot V. Organic matter in large turbid rivers: the Huanghe and its estuary[J]. *Marine Chemistry*, 1992, 38(1/2): 53–68.
- [43] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏, 等. 北江流域有机碳侵蚀通量的初步研究[J]. *环境科学*, 2001, 22(2): 12–18.
- Gao Quanzhou, Shen Chengde, Sun Yanmin, et al. A preliminary study on the organic carbon weathering fluxes in Bei-Jiang River drainage[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(2): 12–18.
- [44] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of the sea water[M]//Hill M N. *The Sea*. New York: Interscience Publishers, 1963: 26–77.
- [45] Rachold V, Grigoriev M N, Are F E, et al. Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 89(3): 450–460.
- [46] Rachold V, Grigoriev M N, Bauch H. An estimation of the sediment budget in the Laptev Sea during the last 5 000 years[J]. *Polarforschung*, 2002, 70(1): 151–157.
- [47] Eicken H, Reimnitz E, Alexandrov V, et al. Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export[J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(2): 205–233.
- [48] Gordeev V V, Martin J M, Sidorov I S, et al. A reassessment of the Eurasian River input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean[J]. *American Journal of Science*, 1996, 296(6): 664–691.
- [49] Romankevich E A, Vetrov A A, Vinogradov M E, et al. Carbon cycling components in the Arctic seas of Russia: Carbon fluxes from land, carbon in the bottom sediments, elements of balance[J]. *Oceanology*, 2000, 40(3): 335–344.
- [50] Dethleff D, Nuernberg D, Reimnitz E, et al. East Siberian Arctic Region Expedition '92: the Laptev Sea-Its Significance for Arctic Sea Ice Formation and Transpolar Sediment Flux[M]. Bremen: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 1993, 120: 3–37.
- [51] Eicken H, Kolatschek J, Freitag J, et al. A key source area and constraints on entrainment for basin-scale sediment transport by Arctic sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(13): 1919–1922.
- [52] Osterkamp T E, Gosink J P. Observations and analyses of sediment-laden sea ice[M]//Barnes P W, Schell D M, Reimnitz E. *The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments*. Orlando: Academic Press, 1984.
- [53] Reimnitz E, Barnes P W, Weber W S. Particulate matter in pack ice of the Beaufort Gyre[J]. *Journal of Glaciology*, 1993, 39(131): 186–198.
- [54] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5/6): 213–250.
- [55] Lobbes J M, Fitznar H P, Kattner G. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(17): 2973–2983.
- [56] Kutscher L, Mörth C M, Porcelli D, et al. Spatial variation in concentration and sources of organic carbon in the Lena River, Siberia[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(8): 1999–2016.
- [57] McClelland J W, Holmes R M, Peterson B J, et al. Development of a pan-arctic database for river chemistry[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008, 89(24): 217–218.
- [58] McClelland J W, Holmes R M, Peterson B J, et al. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30(5): 629–643.
- [59] Martiny A C, Vrugt J A, Primeau F W, et al. Regional variation in the particulate organic carbon to nitrogen ratio in the surface ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, 27(3): 723–731.
- [60] Cauwet G, Sidorov I. The biogeochemistry of Lena River: organic carbon and nutrients distribution[J]. *Marine Chemistry*, 1996, 53(3/4): 211–227.
- [61] Semiletov I P, Dudarev O, Pipko I I, et al. Transport and fate of terrestrial organic carbon in the East Siberian land-shelf system: Riverine input vs. coastal erosion[J]. *Biogeosciences*, 2010, 8: 2407–2426.
- [62] Rachold V, Eicken H, Gordeev V V, et al. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean[M]//Stein R, MacDonald R W. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer, 2004.
- [63] Karlsson E S, Charkin A, Dudarev O, et al. Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of ter-

- restrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2011, 8(8): 3463–3496.
- [64] Tarnocai C, Canadell J G, Schuur E A G, et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2023.
- [65] Rivkina E, Gilichinsky D, Wagener S, et al. Biogeochemical activity of anaerobic microorganisms from buried permafrost sediments[J]. *Geomicrobiology Journal*, 1998, 15(3): 187–193.
- [66] Tesi T, Semiletov I, Dudarev O, et al. Matrix association effects on hydrodynamic sorting and degradation of terrestrial organic matter during cross-shelf transport in the Laptev and East Siberian Shelf seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 731–752.
- [67] Comiso J C, Meier W N, Gersten R. Variability and trends in the Arctic sea ice cover: Results from different techniques[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(8): 6883–6900.
- [68] Kinnard C, Zdanowicz C M, Fisher D A, et al. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1, 450 years[J]. *Nature*, 2011, 479(7374): 509–512.
- [69] Boetius A, Albrecht S, Bakker K, et al. Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice[J]. *Science*, 2013, 339(6126): 1430–1432.
- [70] Pesant S, Legendre L, Gosselin M, et al. Size-differential regimes of phytoplankton production in the Northeast Water Polynya (77°–81°N)[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 142(1/3): 75–86.
- [71] 魏皓, 赵伟, 罗晓凡, 等. 北冰洋浮游生物空间分布及其季节变化的模拟[J]. *海洋学报*, 2019, 41(9): 65–79.
Wei Hao, Zhao Wei, Luo Xiaofan, et al. Simulation of spatial distribution and seasonal variation of plankton in the Arctic Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(9): 65–79.
- [72] Tremblay J É, Michel C, Hobson K A, et al. Bloom dynamics in early opening waters of the Arctic Ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(2): 900–912.
- [73] Müller P J. CN ratios in Pacific deep-sea sediments: Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41(6): 765–776.
- [74] Cronin G, Lodge D M. Effects of light and nutrient availability on the growth, allocation, carbon/nitrogen balance, phenolic chemistry, and resistance to herbivory of two freshwater macrophytes[J]. *Oecologia*, 2003, 137(1): 32–41.
- [75] Martiny A C, Pham C T A, Primeau F W, et al. Strong latitudinal patterns in the elemental ratios of marine plankton and organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(4): 279–283.
- [76] Nagel B, Gaye B, Kodina L A, et al. Stable carbon and nitrogen isotopes as indicators for organic matter sources in the Kara Sea[J]. *Marine Geology*, 2009, 266(1/4): 42–51.

Distribution and source of particulate organic carbon in the Arctic Laptev Sea during late summer and early fall

Xia Yi¹, Hu Limin^{2,3}, Huang Yuanhui^{1,3}, Bai Yazhi^{1,3}, Ye Jun^{2,3}, Fan Di⁴, Meng Xianwei^{1,3}, Shi Xuefa^{1,3}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Mineralization, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Seabed Science and Exploration Technology, Ministry of Education, School of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Marine Geological Process and Environmental Function Laboratory, Pilot National Laboratory of Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4. Marine Isotope and Geological Dating Platform, Pilot National Laboratory of Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: With the intensification of global warming, the source sink process of carbon in the Arctic shelf-edge sea is becoming more and more important in the study of global carbon cycle. As a typical continental shelf marginal sea in the Arctic Ocean, the source, transportation and burial of sedimentary organic carbon in this area are unique under the influence of rivers, sea ice, marine primary productivity and coastal erosion. Based on the sampling of suspended particulate matter (SPM) and hydrological data obtained from the second Sino-Russian Arctic joint expedition during late summer and early fall in 2018, we focus on the distribution characteristics, sources and influencing factors of particulate organic carbon (POC) in the Laptev Sea. The results show that POC ranges from 35.27 $\mu\text{g/L}$ to 1 185.58 $\mu\text{g/L}$, with an average of 172.65 $\mu\text{g/L}$. Under the effect of river input, coastal erosion and marine primary productivity, the distribution of surface POC shows a decreased trend from near shore towards off-

shore; the bottom POC is mainly controlled by sediments resuspension, and the high content of POC appears in the east of Lena River Delta. There was a significant positive correlation between SPM concentration and POC concentration, indicating its direct impact on the occurrence of POC; a more positive relation is found among the bottom layer samples, which may indicate the varied origin of POC in different layers. The value of $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ in study area value is between -31.03‰ and -25.79‰ , and the value of $\delta^{13}\text{C}$ in surface layers is obviously depleted compared with the bottom layer, which is even lower than the end-member of the surrounding terrestrial contributor, suggesting that these POC is not derived from land-based origin. The utilization of the terrestrial POC degraded dissolved inorganic carbon by offshore phytoplankton maybe responsible for this depletion of $\delta^{13}\text{C}$ offshore, which could also be an important process on the supply and source apportionment of POC in this Arctic coastal area.

Key words: Arctic; Laptev Sea; particulate organic carbon; total suspended solids; source; terrigenous input