



北极东西伯利亚陆架黑碳的地球化学特征及其环境意义

于文秀, 胡利民, 石学法, 张钰莹, 叶 君, 白亚之, 夏 逸, 杨 刚, Anatolii Astakhov

Geochemical characteristics of black carbon in surface sediments of the East Siberian Arctic Shelf and their environmental implications

YU Wenxiu, HU Limin, SHI Xuefa, ZHANG Yuying, YE Jun, BAI Yazhi, XIA Yi, YANG Gang, and Anatolii Astakhov

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022022001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151

东海陆坡—冲绳海槽水体剖面地球化学特征与指示意义

Geochemistry of the water profiles at the slope of East China Sea and Okinawa Trough and its implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 102

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

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

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

生物载体对海底冷泉—热液极端环境的地球化学记录

Geochemical records of biological carriers on deepsea hydrothermal vent and methane seep fields

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 42

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

于文秀, 胡利民, 石学法, 等. 北极东西伯利亚陆架黑碳的地球化学特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 50-60.

YU Wenxiu, HU Limin, SHI Xuefa, et al. Geochemical characteristics of black carbon in surface sediments of the East Siberian Arctic Shelf and their environmental implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 50-60.

北极东西伯利亚陆架黑碳的地球化学特征及其环境意义

于文秀¹, 胡利民^{1,2,3}, 石学法^{2,3}, 张钰莹¹, 叶君^{1,3}, 白亚之^{2,3}, 夏逸², 杨刚^{2,3},
Anatolii Astakhov⁴

1. 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, 青岛 266100

2. 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, 青岛 266061

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, 青岛 266237

4. 俄罗斯科学院远东分院太平洋海洋研究所, 符拉迪沃斯托克, 690041

摘要: 热成因黑碳与气候变化和人类活动关系密切。在全球变暖背景下, 这类碳的排放、从陆向海的转移及其环境归宿对于理解北极快速变化下陆源有机碳的源汇过程及其气候环境效应具有重要的科学意义。北极东西伯利亚陆架是全球最为宽浅的陆架, 接收了大量来自径流和海岸侵蚀输入的陆源物质, 尤其近年来环北极野火的频繁发生, 因而成为研究北极沉积黑碳源-汇过程的理想区域。本研究对东西伯利亚陆架表层沉积物中黑碳的含量和组成、空间分布特征及其影响因素等进行了研究, 结果表明, 黑碳的含量为 0.1~2.3 mg/g, 平均为 0.99 mg/g, 其中来自生物质燃烧贡献为主的焦炭平均占 70% 以上。黑碳总体空间分布具有显著的异质性, 拉普捷夫海和东西伯利亚海西部地区黑碳含量较高, 与海岸侵蚀和河流输入关系密切; 陆架东部 (包括楚科奇海) 陆源输入相对较少, 黑碳含量相对较低。不同类型黑碳的空间分布格局显著不同; 对于近岸区, 来自径流和海岸侵蚀的输入可能是焦炭从陆向海的主要输入方式。

关键词: 黑碳; 源汇; 表层沉积物; 北极快速变化; 东西伯利亚陆架

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022022001

Geochemical characteristics of black carbon in surface sediments of the East Siberian Arctic Shelf and their environmental implications

YU Wenxiu¹, HU Limin^{1,2,3}, SHI Xuefa^{2,3}, ZHANG Yuying¹, YE Jun^{1,3}, BAI Yazhi^{2,3}, XIA Yi², YANG Gang^{2,3}, Anatolii Astakhov⁴

1. College of Marine Geosciences, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

3. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

4. V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok 690041, Russia

Abstract: Pyrogenic black carbon (BC) is closely related to climate change and human activities. In the context of global warming, the BC emission and transfer from land to sea and the environmental fate provide important scientific clues for understanding the source-sink course of terrigenous organic carbon and its climate and environmental effects under rapid climate change in the Arctic area. The East Siberian Arctic Shelf is the widest and shallowest shelf in the world, receiving a large amount of terrestrial material input from runoff and coastal erosion. Especially in recent years, frequent occurrence of wildfires around the Arctic makes it an ideal area for studying the course and route of source-sink of BC deposited in the Arctic waters. Based on the data of samples collected from the East Siberian shelf, the content, composition, spatial distribution, and influencing factors of BC in surface sediments were studied. Preliminary results show that the content of BC is 0.1~2.3 mg/g, on average of 0.99 mg/g. Among them, char from biomass combustion contributed more than 70% on average. The spatial distribution of BC is

资助项目: 国家自然科学基金项目“末次冰消期以来北极东西伯利亚陆架快速气候变化及其环境效应”(42130412), “近百年亚欧北极陆架沉积有机碳源汇差异性演化: 海冰变化与冻土碳输入的制约”(42076074); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目(TSQN20182117); 中央高校基本科研业务费项目(202241001)

作者简介: 于文秀 (1997—), 女, 硕士研究生, 从事海洋沉积地球化学研究, E-mail: ywx17853321386@163.com

通讯作者: 胡利民 (1983—), 男, 教授, 主要从事海洋沉积地球化学研究, E-mail: hulimin@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-02-20; **改回日期:** 2022-03-31. 周立君编辑

very heterogeneous. BC in the Laptev Sea and the western part of the East Siberian Sea is high, which is closely related to coastal erosion and river input. The eastern part of the shelf (including the Chukchi Sea) has less terrigenous input and relatively low BC content. The spatial variability of different types of BC is obvious. In the nearshore region, runoff and coastal erosion is probably the main input pathway of char.

Key words: black carbon; source and sink; surface sediments; Arctic rapid change; East Siberian Arctic Shelf

海洋沉积有机碳的源汇过程是全球碳循环研究的重要组成部分^[1-2], 而具有高度稳定性的黑碳 (Black Carbon, BC) 的地球化学过程及其归宿对于了解碳排放、流域环境变化和精确评估全球碳库储量等方面具有重要的科学意义^[3-5]。化石燃料和生物质等不完全燃烧产生的黑碳具有很强的抗氧化、耐分解的能力, 能够长期保存在海洋、土壤等沉积物中, 在碳循环中具有重要作用^[3-4, 6-7]。在地质时间尺度上, 黑碳的形成大约可减少 2%~18% 的 CO₂ 净排放, 是大气 CO₂ 的一个重要“汇”^[8-10]。沉积物被认为是黑碳最终的归宿^[11-12], 尽管沉积物中的黑碳可能只占其总量的一小部分, 但其对全球碳循环有重要影响^[6-7, 13-14]。研究显示, 全球约 90% 的黑碳沉积发生在陆架-边缘海地区^[10, 15], 前人也对不同纬度、不同地区的陆架边缘黑碳的源汇过程开展了较多的研究, 如热带东南亚的泰国湾^[16], 中国边缘海的黄渤海^[17-18]、莱州湾^[19]、东海^[20-21]、缅甸湾^[22], 北欧边缘海^[15], 泛北极河流^[23-24], 北极陆架^[11]等, 这些工作都突显了陆架沉积黑碳在全球黑碳从源到汇过程中的关键性作用。

近几十年来, 在全球变暖背景下, 北极地区出现了野火异常增多、夏季海冰减退、径流加大, 冻土退化和初级生产力提高等显著变化^[25-28]; 北极地区作为全球气候变化的“放大器”和“晴雨表”^[29-31], 对陆地生态系统碳循环也产生了深刻的影响^[32]。而且, 围绕当前应对气候变化和“碳中和”、“碳达峰”等国家战略, 对极地碳的生物地球化学过程及其气候环境效应的研究也更加具有现实意义。北极东西伯利亚陆架作为全球最大的陆架系统, 接受了巨量的陆源物质输入, 陆海相互作用强烈, 冻土沉积广泛发育, 海岸侵蚀作用显著, 周边更是当前北极野火发生率最高的地区^[33]。一方面, 西伯利亚地区野火活动的不断增加导致了邻近陆架沉积物中黑碳含量的升高^[34-35]; 随着气候变暖加剧, 输入北冰洋的陆源物质也在增加, 使得更多的黑碳从陆地进入海洋^[9, 11, 33-35]。另一方面, 低纬地区排放的黑碳气溶胶可通过大气传输到北极地区, 其中相当一部分将埋藏到沉积物中^[36-37]。因此, 北极东西伯利亚陆架是研究北极快速变化背景下沉积黑碳的地球化学特征及其环境意义的天然实验室。

前人围绕北极海域沉积黑碳已开展了一些研究, 主要报道了黑碳含量的空间分布, 发现大气沉降和河流输入是其主要的来源, 沿岸侵蚀的海冰-冻土复合体中的老碳排放也是其重要的来源, 此外还有冰筏作用等贡献方式^[11]。不同来源的黑碳贡献以及埋藏通量也有报道^[11, 15, 22-24]。这些研究表明了北极陆架在黑碳埋藏上的重要性, 发现了冻土融化在黑碳输送过程中起的关键作用。

根据燃烧物和温度的不同, 一般可将黑碳分成焦炭(char)和烟炱(soot)^[3-4, 19, 38-39]。char 颗粒物粒径较大(微米级, 1~100 μm), 主要在低温(300~600 °C)明火燃烧或焖烧阶段形成; 而烟炱是在高温下(>600 °C)浓缩聚合而成, 颗粒物粒径较小(亚微米级, <1 μm)^[4, 38-39]。研究表明, 生物质燃烧为主形成的 char 主要先停留在原地; 而化石燃料产生的 soot 更容易远距离传输^[38]。已有研究发现 soot 比 char 更耐氧化, 显示出更难降解的性质和长期碳汇的意义^[40]。因此, 不同类型黑碳对碳循环的影响和意义也具有显著的差异, 这就需要进一步了解和评估沉积环境中不同来源的黑碳及其地球化学行为和环境效应。在这方面, 上述北极地区已有的工作主要是针对高温黑碳(soot 为主)进行的研究; 但考虑到环北极地区植被火灾的频繁发生^[41-42], 沉积环境中来自生物质燃烧(低温燃烧为主)产生的 char 可能占有相当的比例, 因此, 需要对不同黑碳的赋存特征、输入及其环境意义等进行进一步评估。本文依据 2016 年和 2018 年两次中俄北极联合科考在东西伯利亚陆架获得的表层沉积物样品, 重点探讨不同类型黑碳的空间分布特征及输入方式, 阐明 char 和 soot 的空间分布格局及其控制影响因素, 为进一步评估极地高纬海域沉积黑碳的源汇过程及其气候环境效应提供科学依据。

1 研究区概况

东西伯利亚陆架是全球最为宽浅的陆架, 面积约为北冰洋的三分之一(约 1800×10³ km²), 包括拉普捷夫海、东西伯利亚海和俄罗斯西部的楚科奇海(图 1)。陆架水动力条件复杂, 该区主要环流系统由太平洋入流水、穿极流、波弗特环流和西伯利亚

沿岸流等构成,并受到径流输入、大气和海冰过程的共同影响^[43-45]。其海岸线约为数千千米,主要由细颗粒的富冰沉积物组成^[46],与北极其他由泥炭和矿质土壤构成的永久冻土相比,这类海岸冻土更加脆弱,更易受侵蚀作用的影响^[47]。受北极大河勒拿河输入的影响^[48],拉普捷夫海陆海相互作用强烈,流域植被和海岸冻土侵蚀深刻影响该区的物质组成和性质^[46,49]。东西伯利亚海东西两侧的沉积环境和物质来源等具有显著的差异,以 160°E 为界,东部受到太平洋流入水的影响,初级生产力较高^[43,50];西部受河流输入和海岸融化冻土侵蚀的影响较大,周边野火活动频繁发生^[44]。楚科奇海作为初级生产力最高的海区之一^[51],因受太平洋入流水输入的影响,陆源输入较低^[52]。

2 材料与方法

2.1 样品

本次研究基于 2016 年和 2018 年两次中俄北极联合科考航次在拉普捷夫海、东西伯利亚海和楚科奇海所取得的沉积物样品(水深 6~2542 m),表层沉积物(75 站)采用箱式采样器采集,取上层浮泥于 4 °C 下进行保存,具体采样站位如图 1 所示。

2.2 方法

目前对于定量沉积物中的黑碳还没有一个确定且统一的方法,使用的测试方法不同,得出的结果也不同,并且有较大差异^[39]。本研究中表层沉积物样品的黑碳分析采用湿化学预处理结合热光反

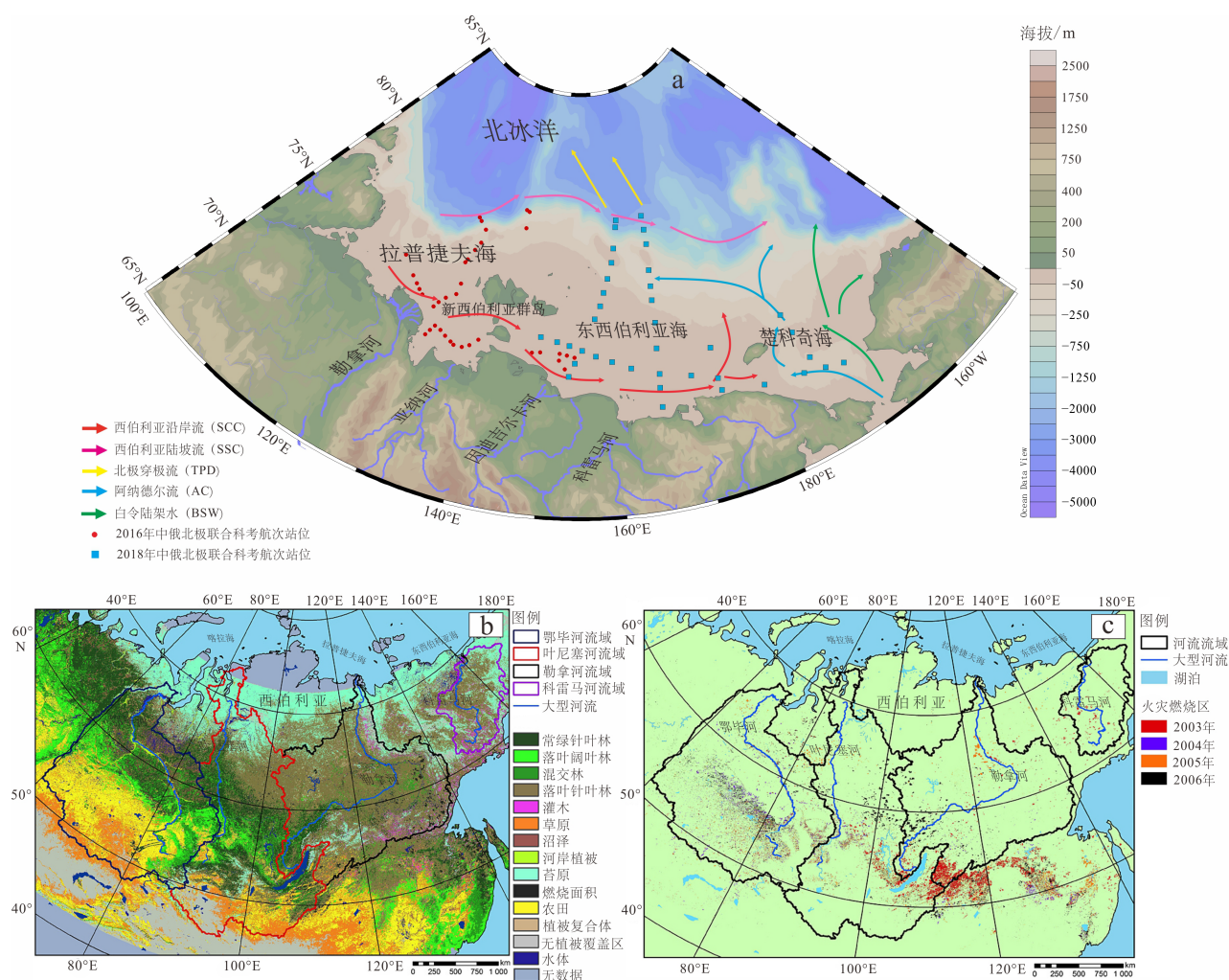


图 1 北极东西伯利亚陆架内采样站位分布 (a)、植被类型的空间分布^[34] (b) 及 2003—2006 年西伯利亚主要流域内的火灾燃烧区^[34] (c)

Fig.1 Deployment of sampling stations in the East Siberian Arctic Shelf (a), spatial distribution of vegetation types^[34] (b), and fire burning areas in the major Siberian watersheds during 2003-2006^[34] (c)

射法来进行检测 (Thermal Optical Reflectance, 简称 TOR 法), 该方法被广泛应用于土壤、扬尘、湖泊及海洋沉积物中进行黑碳含量的测定^[16,53-55]。湿化学预处理的操作步骤详见方引等^[19]。黑碳含量采用 DRI Model 2001A 型有机碳/元素碳 (OC/EC) 分析仪测定。将预处理后沉积物样品过滤至石英纤维膜上, 干燥后在膜上钻取 0.544 cm² 的样品置于石英舟中, 以 100% 的 He 为载气, 分阶段逐步升温至 140、280、480 和 580 °C, 生成 4 种有机碳组分 (OC1-OC4); 然后通入 2% 的 O₂ 和 98% 的 He 混合气体, 分阶段性升温至 580、740 和 840 °C, 生成 3 种黑碳组分 (EC1-EC3)。由于纯 He 氛围下加热会造成有机质的焦化, 使得部分 OC 转变为黑碳, 形成裂解碳 (Pyrogenic Organic Carbon, POC), 因此, 利用 He-Ne 激光全程照射样品以扣除 POC 对黑碳结果的影响。根据 IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environment) 协议, 将黑碳定义为 EC1+EC2+EC3-POC。Han 等^[53-54] 利用 TOR 法对 char 和 soot 的标准样品进行分析, 结果显示 EC1 阶段 char 首先被氧化, 在 EC2 和 EC3 阶段时 soot 被氧化, char 和 soot 这两种黑碳亚组分最终被分离出来。

质量保证和质量控制 (QA/QC): 湿化学预处理后的样品在滤膜上的均匀性会直接影响黑碳含量的准确程度^[39,53-54], 结果显示, 不同位置滤膜分析得到的黑碳含量偏差 < 10%, 说明样品在滤膜上分布均匀。同时, 在每批次约 20 个沉积物样品分析中, 加入 5 个空白样品和 4 个重复样品, 以检验样品处理流程的可靠性。重复样品分析表明, 相对误差 < 5%, 空白样品中没有黑碳检出。

粒度和有机碳分析测试在自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室完成。取适量沉积物样品加入双氧水 (H₂O₂) 和盐酸 (HCl) 以去除有机碳和碳酸盐, 完全反应后超声震荡, 使样品分散均匀, 使用英国 Master sizer 3000 激光粒度仪进行上机测试, 测试范围为 0.01~3 500 μm, 样品重复测量相对误差 < 3%, 沉积物类型根据福克法命名^[56]。有机碳分析: 取适量冻干研磨好的样品进行酸处理 (加入 1M HCl 以去除碳酸盐), 经洗酸、烘干、研磨等步骤后, 称量约 30 mg 样品进行锡舟包样, 使用 Elementar-Vario EL III 元素分析仪进行上机测试, 实验中添加 GSD-9 标样和重复样品用于质量保证和控制, 结果偏差 < 0.05%^[57]。比表面积分析: 取适量冻干研磨过的样品, 高温 (350 °C) 下灼烧 3.5 h, 于 200 °C 下脱气 2 h, 使用 3H-2000PS4 比表面积分析仪进行上机测试, 经氮气 (N₂) 吸附后, 采用 5 点 BET 法进行比

表面积的测定^[58], 测试结果相对标准偏差小于 3.46%。

3 结果与讨论

3.1 黑碳含量、空间分布及控制因素

3.1.1 表层沉积物中黑碳的含量及空间分布

研究区表层沉积物中黑碳含量范围为 0.1~2.3 mg/g, 平均为 0.99 mg/g ($n=75$)。其中, 拉普捷夫海黑碳的含量范围为 0.1~2.3 mg/g, 平均为 1.24 mg/g ($n=26$), 楚科奇海为 0.28~1.38 mg/g, 平均为 0.94 mg/g ($n=9$), 东西伯利亚海为 0.36~1.55 mg/g, 平均为 0.83 mg/g ($n=40$)。与基于 TOR 法的已有工作进行比较, 如莱州湾海岸带沉积黑碳的含量为 0.02~9.35 mg/g^[19], 渤海为 0.02~3.55 mg/g^[17], 太湖为 0.31~1.09 mg/g^[59] 等, 对比发现上述地区黑碳含量相当, 具有一定的可比性。

相比于利用化学热氧化法 (CTO-375) 获得的北极陆架区黑碳含量, 如北极永久冻土 (0.2~1.5 mg/g)^[11]、泛北极河流河口 (0.2~1.5 mg/g)^[23]、北极东西伯利亚陆架海岸线 (0.1~2.5 mg/g)^[24]、马更些陆架 (1.4~2.5 mg/g)^[36]、楚科奇陆架 (0.41~0.53 mg/g)^[36], 本次研究中的黑碳含量处于中—较高的水平, 但低于北欧海陆架 (0.58~17.66 mg/g)^[15]。Salvadó 等^[11] 用 CTO-375 的方法测得的東西伯利亚陆架远岸站位的黑碳含量范围为 0.1~2.1 mg/g, 与本研究中的结果相当。事实上, CTO-375 法获得黑碳指具有高度难熔特性的组分^[39,60], 而 TOR 法采用逐步升温的程序, 得到的黑碳含量是 char 和 soot 这两种亚组分的和, 因此在进一步研究中需首先注意不同方法上的差异。

如图 2 所示, 东西伯利亚陆架不同海区的黑碳分布具有显著的空间异质性, 拉普捷夫海黑碳含量最高, 东西伯利亚海次之, 楚科奇海的黑碳含量最低。拉普捷夫海和东西伯利亚海西部地区 (160°E 为界) 较高的黑碳含量与海岸侵蚀、融化冻土和河流输入的影响有关^[61-62]; 楚科奇海陆源输入相对较少, 沉积物主要来自于洋流输入和海岸侵蚀^[63], 黑碳含量整体上偏低。东西伯利亚海东部临近楚科奇海, 陆源输入相对较少, 相比于西部地区, 整体黑碳含量也较低。研究发现, 富冰冻土海岸和勒拿河河口处的黑碳浓度较高 (1.57~2.30 mg/g, 图 2), 勒拿河是泛北极河流入海物质输入最主要的贡献者之一^[64], 全新世以来由于勒拿河流量的增加使拉普捷夫海陆坡沉积物中有机质成分发生了显著变化^[65]。

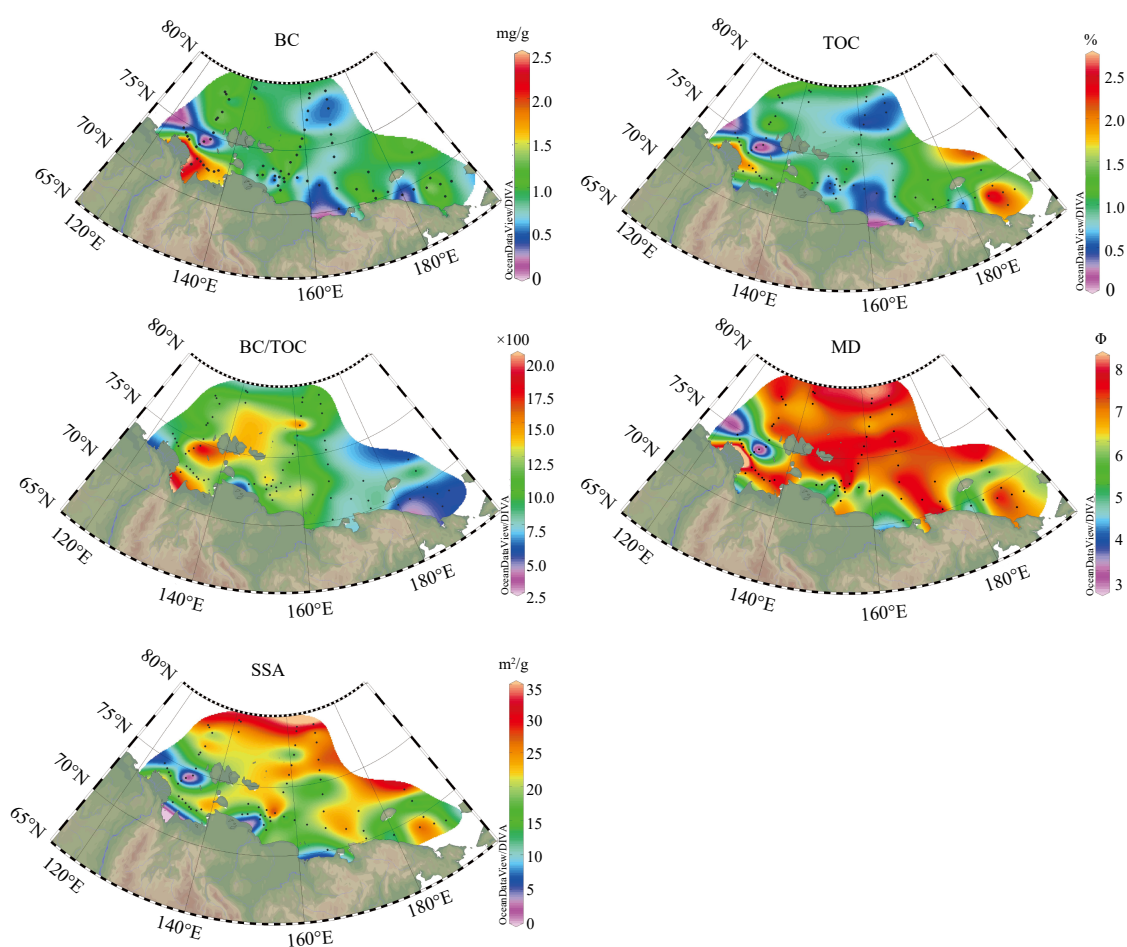


图2 北极东西伯利亚陆架表层沉积物中BC、TOC、BC/TOC、中值粒径(MD)、比表面积(SSA)的空间分布特征
Fig.2 Spatial distribution characteristics of BC, TOC, BC/TOC, MD, and SSA of surface sediments in the East Siberian Arctic Shelf

因此,勒拿河的直接输入可能是河口区黑碳高值的直接原因。随着离岸距离的增加,黑碳含量明显下降。东西伯利亚陆架周边海岸侵蚀作用强烈,侵蚀速率较高,粗颗粒物会被截留在近岸陆架区,黑碳含量较低;而远岸深水区常年被海冰覆盖,受水动力分选、降解及海冰的拦截作用影响^[66],来自陆源输入(包括海岸侵蚀、河流、冻土融化等)的黑碳相对较少。

3.1.2 黑碳与TOC、沉积物粒度等的相关性

研究区黑碳占TOC的14.78%~39.72%(平均为29.02%),与其他海岸系统相比处于中—较高水平,表明黑碳是北极、亚北极海洋沉积有机碳库的重要组成部分^[11,15,23-24]。TOC的空间变化规律与黑碳相似,但黑碳/TOC的空间分布与黑碳和TOC分布相比有较大的差异(图2)。以160°E为界,东部海区黑碳/TOC比值明显低于西部海区,最高值出现在勒拿河口附近,楚科奇海区呈现最低值。楚科奇海是初级生产力最高的海区之一,有机碳含量高,加上该区无直接的大河输入所导致的低黑碳

值,使得黑碳/TOC呈现出最低值(图3b)。东西伯利亚海近岸西部和拉普捷夫海近岸海域受勒拿河输入、沿岸冻土侵蚀及东西伯利亚沿岸流的影响,接收了较高的黑碳含量,因此有相对较高的黑碳/TOC值。北部远岸深水区黑碳/TOC值相对较高,可能是相当一部分TOC在向外海运输过程中发生了优先降解^[11],而黑碳作为TOC中难降解的一种组分,能更大程度地输运到外陆架。三个海区中,黑碳和TOC均呈显著的正相关关系(图3a),东西伯利亚海相对更高,这可能与不同地区的沉积环境和物源输入有关。如前所述,楚科奇海和东西伯利亚海东部,陆源输入较少,黑碳和TOC之间的关系可能受控于区域沉积水动力环境的影响,而物源的影响较弱^[16];拉普捷夫海和东西伯利亚海西部黑碳和TOC的分布则主要受控于较强的陆源输入(例如海岸侵蚀、河流输入等)。

黑碳与沉积物粒径(MD)呈现较高的相关性(图3),表明黑碳更容易在细颗粒沉积物中富集,体现出细粒物质的吸附作用^[67],反映出粒度可能是影

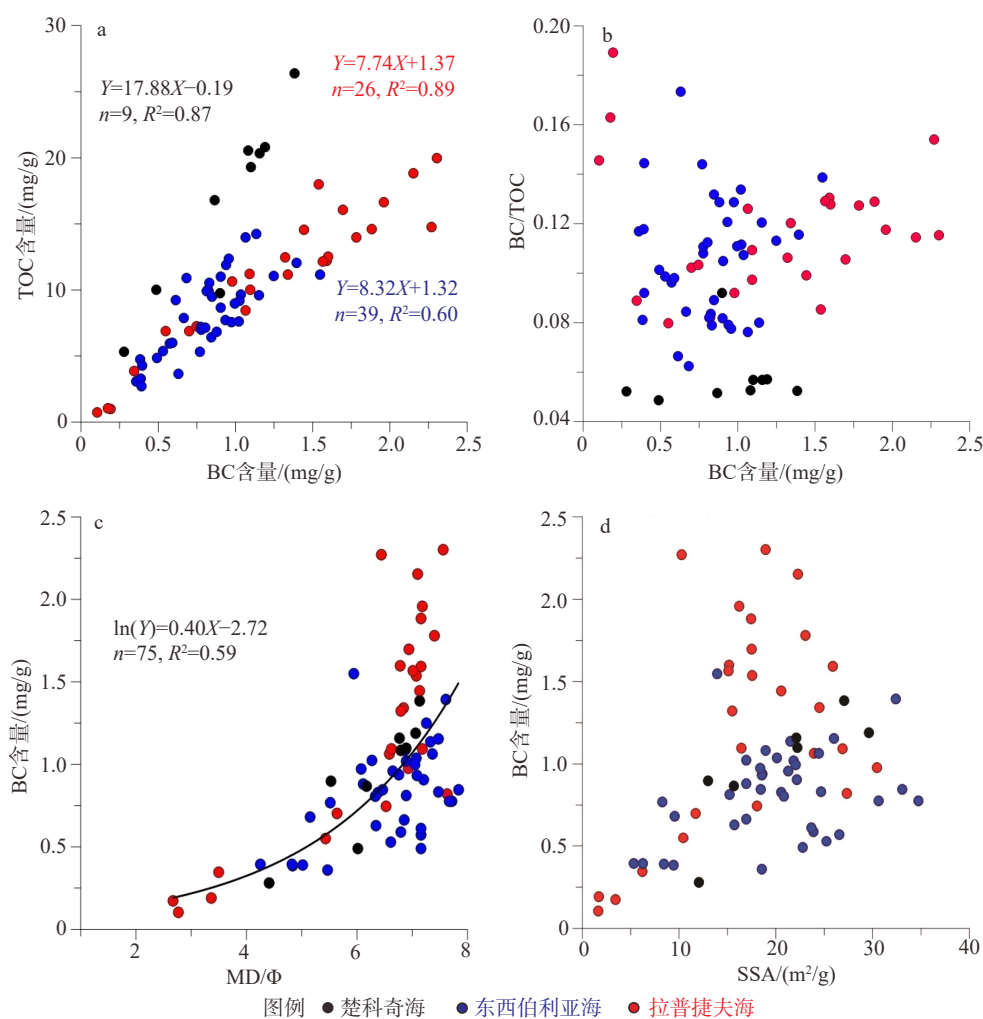


图 3 楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海表层沉积物中 TOC 与 BC (a)、BC/TOC 与 BC (b)、MD 与 BC (c)、SSA 与 BC (d) 的散点图

c 中黑色曲线代表所有样品的相关趋势。

Fig.3 Scatter plot of TOC-BC (a), BC/TOC-BC (b), MD-BC (c), and SSA-BC (d) in surface sediments in the Chukchi Sea (black spots), the East Siberian Sea (blue spots), and the Laptev Sea (red spots)

The black curve in Figure 3c represents the correlation trends of all samples.

响沉积物黑碳分布的重要因素。由于东西伯利亚陆架的部分海岸侵蚀强烈,粗颗粒物受水动力分选作用会被截留在近岸陆架区^[66],导致沉积物粒度相对“粗化”,这一定程度上不利于黑碳的近岸富集(河口区除外);而在冬季,受冰间湖和海冰运输的影响,可将细颗粒物向外搬运^[68]。因此,沉积水动力作用可能是影响黑碳整体空间格局的重要因素。

3.2 char 和 soot 的空间分布及影响因素

黑碳是化石燃料和生物质不完全燃烧产生的连续体^[4,8]。基于分析程序中的温度控制,可进一步将其分为两个亚型(即 char 和 soot)^[3,54-55]。为了更好地了解北极近海环境中不同类型黑碳的分布、来源和输入方式,本文使用改进的热光法对 char 和

soot 这两种黑碳组分进行分析^[53-55]。

char 和 soot 的空间分布如图所示(图 4a、b),含量分别为 0.03~1.79 mg/g(平均为 0.72 mg/g)、0.07~0.59 mg/g(平均为 0.27 mg/g),char 约占黑碳含量的 73%。与前人的研究结果相比较为合理,如泛北极河流中的黑碳区分为 21%的现代生物质来源和 79%的化石来源(化石燃料燃烧和源岩)^[23],东西伯利亚气溶胶中生物质燃烧产生的黑碳约 31%±19%^[37]。由于 char 在表层沉积物样品的黑碳中占据绝大部分,故 char 和黑碳呈现较一致的空间特征;另一方面,随着离海岸距离的增加,soot 含量不降反升,这与 char 的离岸趋势显著不同(图 4b),反映 soot 可能更容易受到长距离传输的影响。如前言所述,char 和 soot 作为不同的黑碳类型,燃烧

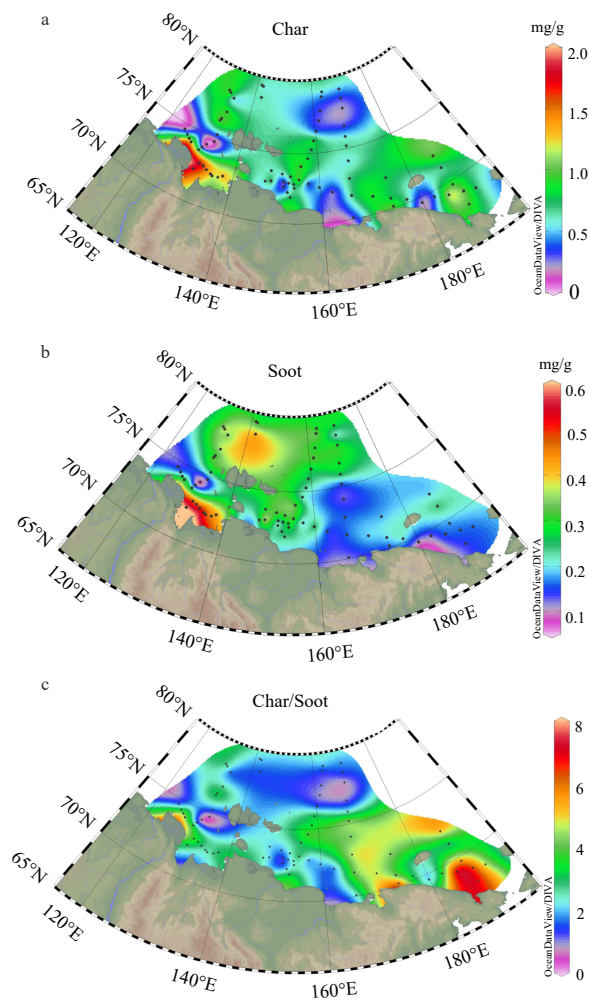
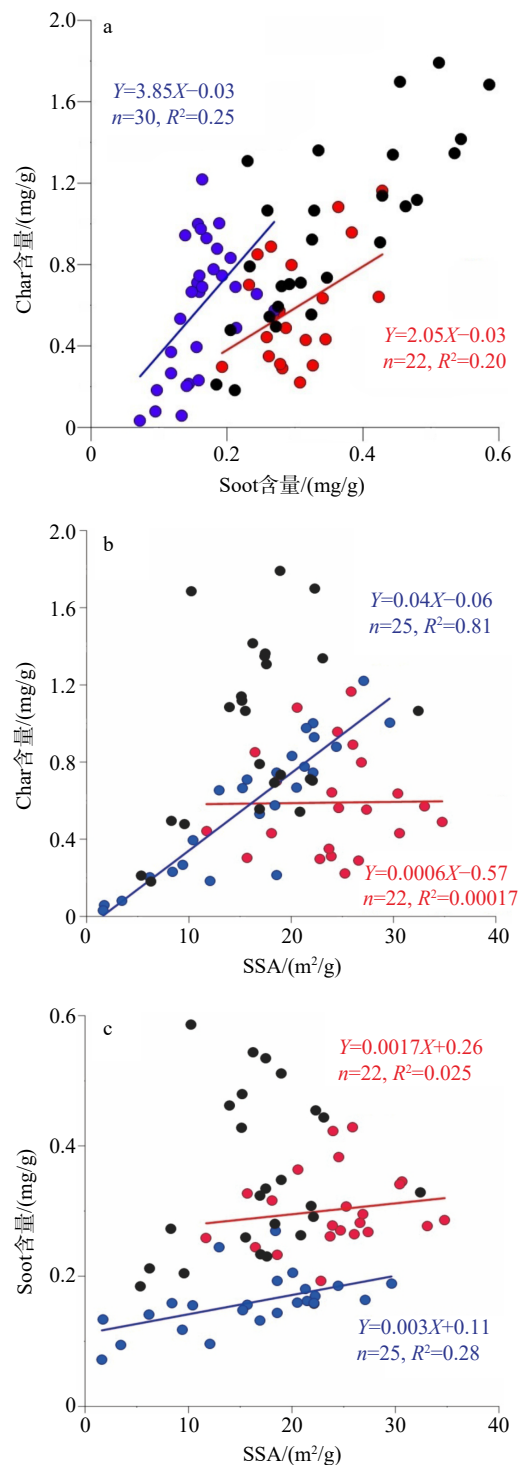


图 4 北极东西伯利亚陆架表层沉积物中 char (a)、soot (b)、char/soot (c) 的空间分布特征

Fig.4 Characteristics in spatial distribution of char (a), soot (b), and char/soot (c) in surface sediments in the East Siberian Arctic Shelf

机制和颗粒的粒径有明显区别^[4,38-39], 导致 char/soot 的比值也有差异。通常化石燃料燃烧产生的黑碳颗粒更细, char/soot 的比值也比生物质燃烧的结果偏低^[18], 相对更易受大气和水的长距离迁移的影响。

本研究以水深 100 m 为界^[69], 将东西伯利亚陆架大体分为近岸区和远岸区, 同时考虑河口在近岸区中的特殊性(图 5), 对不同地区 char 和 soot 进行相关性分析。从整体上来看, 近岸区 char/soot 的比值较高, 远岸区 char/soot 较低(图 4c, 图 5a), 表明来自低温燃烧的生物质黑碳是北极陆架沉积黑碳的重要组成部分。尤其对于近岸区, 来自地表径流和海岸侵蚀的输入可能是这类黑碳从陆向海的主要输入方式; 而随着离岸距离的增加, soot 在黑碳中所占比例相对增加, 除了来源的差别, 这可能也反映了其不同的输入方式(大气沉降)和水动力搬运的影响。



图例 ● 河口 ● 近岸 ● 远岸

图 5 北极东西伯利亚陆架近岸、远岸及河口处表层沉积物中 char 与 soot (a)、char 与 SSA (b)、soot 与 SSA (c) 的散点图

Fig.5 Scatter plot of char-soot (a), char-SSA (b), and soot-SSA (c) in surface sediments in near shore, distant shore, and estuary of the East Siberian Arctic Shelf

此外, 考虑到细颗粒的吸附作用, 进一步对不同黑碳与沉积物比表面积 (SSA) 进行相关性分析, 发现近岸区 char 与比表面积的相关性明显高于远

岸区(图 5b); 远岸区 soot 与比表面积的相关程度更高(图 5c), 反映了水动力分选和细颗粒物吸附作用的综合影响。综上, 不同燃烧源生成的 char 和 soot 的物理性质差异(即粒径大小)和沉积水动力条件的共同作用是造成二者上述空间分布的主导因素。上述不同类型黑碳在北极陆架海区具有不同的地球化学行为和沉积特征, 这对认识区域陆源有机碳的源汇过程及其环境效应具有重要意义^[23-24]。

3.3 区域对比与环境指示意义

在全球变暖的背景下, 北极地区冻土退化、海冰覆盖面积减退、海岸侵蚀加剧、野火频繁发生, 这些变化使该区碳的生物地球化学过程和生态系统也受到影响^[70]。围绕北极陆架区黑碳的源汇过程已有不少研究, 例如北欧陆架相对偏高的黑碳含量(0.6~17.7 mg/g)主要是由来自高度工业化和人口稠密地区的大气沉降所致^[15], 而大气沉降和河流输入则是海冰边缘区和楚科奇陆架海水中颗粒黑碳(PBC)的主要输入方式^[71]。相比之下, 由于西伯利亚远东地区泥炭和森林火灾发生频繁, 近岸河口处的黑碳更多的是来自流域内植被或野火燃烧^[24], 其中绝大部分为 char(图 4, 图 5), 由于粒径较大, 因此更容易停留在原地; 除径流外, 沿岸侵蚀和冻土融化对黑碳的贡献也不可忽视^[11]。另一方面, 勒拿河流域广泛发育永久冻土和森林植被, 大约一半的北极火灾发生在这些区域, 并且极易复燃^[35, 72-74]。研究表明, 北极 4 条西伯利亚河流流域内裸子植物燃烧对水体中 Py-DOC(热成溶解有机碳)有重要贡献^[34], 另外, 低温野火的不完全燃烧过程也对土壤和沉积物中颗粒态黑碳有贡献, 增加了这一“难降解”碳库的储量^[74], 这对认识北极快速变化下野火对黑碳的源-汇过程具有重要意义; 而通过对燃烧物的进一步划分(如植被类型, 草本/木本、裸子/被子植物等), 还可进一步评估野火的燃烧程度和规模大小^[34]。随着全球变暖和野火的发生频率及规模的不断增加^[33, 75], 下一步应重视利用黑碳等地球化学指标建立陆架沉积记录与周边广阔流域野火活动和植被演化的联系, 探究其对区域气候环境变化的响应与反馈机制。

4 结论

(1) 北极东西伯利亚陆架沉积物中黑碳的含量为 0.1~2.3 mg/g, 平均为 0.99 mg/g。黑碳对 TOC 的贡献为 14.78%~39.72%, 平均为 29.02%, 该值与其

他海岸系统相比处于中—较高水平, 表明黑碳是该区沉积有机碳库的重要组成部分。

(2) 黑碳的空间分布具有显著的异质性: 拉普捷夫海和东西伯利亚海西部地区受海岸融化冻土侵蚀和河流输入影响较大, 黑碳的含量较高; 陆架东部(包括楚科奇海), 陆源输入较少, 黑碳含量相对较低; 勒拿河河口处的黑碳含量最高, 显示出受径流输入的直接影。

(3) char 含量为 0.03~1.79 mg/g(平均为 0.72 mg/g), soot 含量为 0.07~0.59 mg/g(平均为 0.27 mg/g), 其中 char 占黑碳的 70% 以上。两种不同类型黑碳的空间分布格局显著不同, 对于近岸区, 地表径流和海岸侵蚀输入可能是 char 从陆向海的主要输入方式; 离海岸越远, soot 在黑碳中所占比例相对增加。在水动力分选和细颗粒物吸附的综合影响下, 远岸处 soot 与 SSA 的相关程度相对更为显著。

致谢: 本次使用样品为 2016 年与 2018 年两次中俄北极联合科学考察航次中获得, 感谢参加调查工作的全体考察队员。

参考文献 (References)

- [1] Burdige D J. Preservation of organic matter in marine sediments: controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets? [J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107 (2): 467-485.
- [2] Bianchi T S, Cui X Q, Blair N E, et al. Centers of organic carbon burial and oxidation at the land-ocean interface [J]. *Organic Geochemistry*, 2018, 115: 138-155.
- [3] Masiello C A. New directions in black carbon organic geochemistry [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92 (1-4): 201-213.
- [4] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14 (3): 777-793.
- [5] Bird M I, Wynn J G, Saiz G, et al. The pyrogenic carbon cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43 (1): 273-298.
- [6] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118 (11): 5380-5552.
- [7] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1 (4): 221-227.
- [8] Gustafsson A Ö, Gschwend A P M. The flux of black carbon to surface sediments on the New England continental shelf [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62 (3): 465-472.
- [9] Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle [J]. *Science*, 1998, 280 (5371): 1903-1904.

- [10] Suman D O, Kuhlbusch T A J, Lim B. Marine sediments: a reservoir for black carbon and their use as spatial and temporal records of combustion[M]//Clark J S, Cachier H, Goldammer J G, et al. Sediment Records of Biomass Burning and Global Change. Berlin: Springer, 1997: 271-293.
- [11] Salvadó J A, Bröder L, Andersson A, et al. Release of black carbon from thawing permafrost estimated by sequestration fluxes in the east siberian arctic shelf recipient [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31 (10): 1501-1515.
- [12] Klinedinst D B, Currie L A. Direct quantification of PM_{2.5} fossil and biomass carbon within the northern front range air quality study's domain [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33 (23): 4146-4154.
- [13] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 等. 全球碳循环中的失汇及其形成原因 [J]. *生态学报*, 2002, 22 (1): 94-103. [WANG Xiaoke, BAI Yanying, OUYANG Zhiyun, et al. Missing sink in global carbon cycle and its causes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (1): 94-103.]
- [14] Druffel E R M. Comments on the importance of black carbon in the global carbon cycle [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92 (1-4): 197-200.
- [15] Sánchez-García L, Cato I, Gustafsson Ö. The sequestration sink of soot black carbon in the Northern European Shelf sediments [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26 (1): GB1001.
- [16] Hu L M, Shi X F, Bai Y Z, et al. Distribution, input pathway and mass inventory of black carbon in sediments of the Gulf of Thailand, SE Asia [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 170: 10-19.
- [17] Fang Y, Chen Y J, Tian C G, et al. Flux and budget of BC in the continental shelf seas adjacent to Chinese high BC emission source regions [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29 (7): 957-972.
- [18] 方引. 渤海黑碳的区域地球化学行为[D]. 中国科学院烟台海岸带研究所博士学位论文, 2016 [FANG Yin. Regional geochemical behavior of black carbon in Bohai and Yellow Seas, China[D]. Doctor Dissertation of Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [19] 方引, 陈颖军, 林田, 等. 莱州湾海岸带表层沉积物的黑碳及其与POPs的相关性研究[J]. *地球化学*, 2014, 43 (4): 329-337. [FANG Yin, CHEN Yingjun, LIN Tian, et al. Distribution of black carbon and its correlation with persistent organic pollutants (POPs) in the surface sediments of coastal zone, Laizhou Bay [J]. *Geochimica*, 2014, 43 (4): 329-337.]
- [20] 林田, 方引, 陈颖军, 等. 东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究[J]. *环境科学*, 2012, 33 (7): 2335-2340. [LIN Tian, FANG Yin, CHEN Yingjun, et al. Distribution of black carbon in the surface sediments of the east China sea and their correlations with persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science*, 2012, 33 (7): 2335-2340.]
- [21] 黄亮, 张国森, 吴莹, 等. 东海内陆架表层沉积物中黑碳的分布及来源[J]. *地球与环境*, 2012, 40 (1): 63-69. [HUANG Liang, ZHANG Guosen, WU Ying, et al. Distribution and source of black carbon in the surface sediments of the inner continental shelf of the east China sea [J]. *Earth and Environment*, 2012, 40 (1): 63-69.]
- [22] Flores-Cervantes D X, Plata D L, MacFarlane J K, et al. Black carbon in marine particulate organic carbon: Inputs and cycling of highly recalcitrant organic carbon in the Gulf of Maine [J]. *Marine Chemistry*, 2009, 113 (3-4): 172-181.
- [23] Elmquist M, Semiletov I, Guo L D, et al. Pan-Arctic patterns in black carbon sources and fluvial discharges deduced from radiocarbon and PAH source apportionment markers in estuarine surface sediments [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22 (2): GB2018.
- [24] Guo L D, Semiletov I, Gustafsson Ö, et al. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: implications for terrestrial organic carbon export [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18 (1): GB1036.
- [25] Running S W. Is global warming causing more, larger wildfires? [J]. *Science*, 2006, 313 (5789): 927-928.
- [26] Peterson B J, Holmes R M, McClelland J W, et al. Increasing river discharge to the arctic ocean [J]. *Science*, 2002, 298 (5601): 2171-2173.
- [27] Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. Arctic sea ice decline: faster than forecast [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (9): L09501.
- [28] Bröder L, Andersson A, Tesi T, et al. Quantifying degradative loss of terrigenous organic carbon in surface sediments across the Laptev and East Siberian Sea [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33 (1): 85-99.
- [29] Stuecker M F, Bitz C M, Armour K C, et al. Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8 (12): 1076-1081.
- [30] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification [J]. *Nature*, 2010, 464 (7293): 1334-1337.
- [31] 张廷军. 全球多年冻土与气候变化研究进展[J]. *第四纪研究*, 2012, 32 (1): 27-38. [ZHANG Tingjun. Progress in global permafrost and climate change studies [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32 (1): 27-38.]
- [32] Lim S, Lee M, Lee G, et al. Ionic and carbonaceous compositions of PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} at Gosan ABC superstation and their ratios as source signature [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12 (4): 2007-2024.
- [33] Soja A J, Tchekakova N M, N. H. F. French N H F, et al. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations [J]. *Global Planet. Change*, 2007, 56 (3-4): 274-296.
- [34] Myers-Pigg A N, Louchouart P, Amon R M W, et al. Labile pyrogenic dissolved organic carbon in major Siberian Arctic rivers: implications for wildfire-stream metabolic linkages [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (2): 377-385.
- [35] Turetsky M R, Benscoter B, Page S, et al. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8 (1): 11-14.
- [36] Yang W F, Guo L D. Sources and burial fluxes of soot black carbon in sediments on the Mackenzie, Chukchi, and Bering Shelves [J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 155: 1-10.
- [37] Winiger P, Andersson A, Eckhardt S, et al. Siberian Arctic black carbon sources constrained by model and observation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114 (7): E1054-E1061.
- [38] Goldberg E D. *Black Carbon in the Environment*[M]. New York: John Wiley, 1985.
- [39] Hammes K, Schmidt M W I, Smernik R J, et al. Comparison of quanti-

- fication methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21 (3): GB3016.
- [40] Elmquist M, Cornelissen G, Kukulska Z, et al. Distinct oxidative stabilities of char versus soot black carbon: Implications for quantification and environmental recalcitrance [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20 (2): GB2009.
- [41] Rein G, Cohen S, Simeoni A. Carbon emissions from smouldering peat in shallow and strong fronts [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32 (2): 2489-2496.
- [42] Rodionov A, Amelung W, Haumaier L, et al. Black carbon in the zonal steppe soils of Russia [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169 (3): 363-369.
- [43] Stein R, Macdonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean[M]. Berlin: Springer, 2004: 315-322.
- [44] 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.]
- [45] 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 (3): 193-201. [CHEN Jianfang, ZHANG Haisheng, JIN Haiyan, et al. Accumulation of sedimentary organic carbon in the Arctic shelves and its significance on global carbon budget [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16 (3): 193-201.]
- [46] Günther F, Overduin P P, Sandakov A V, et al. Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10 (6): 4297-4318.
- [47] Schirrmeister L, Kunitzky V, Grosse G, et al. Sedimentary characteristics and origin of the late Pleistocene ice complex on north-east Siberian Arctic coastal lowlands and islands-a review [J]. *Quaternary International*, 2011, 241 (1-2): 3-25.
- [48] Semiletov I P, Savelieva N I, Weller G E, et al. The dispersion of Siberian River flows into coastal waters: Meteorological, hydrological and hydrochemical aspects[M]//Lewis E L, Jones E P, Lemke P, et al. The Freshwater Budget of the Arctic Ocean. Dordrecht: Springer, 2000: 323-366.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Xu F L, Jin H Y, Ji Z Q, et al. Sources and distribution of sedimentary organic matter along the northern Bering and Chukchi Seas [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 52: 66-75.
- [52] Shimada K, Kamoshida T, Itoh M, et al. Pacific Ocean inflow: influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (8): L08605.
- [53] Han Y M, Cao J J, An Z S, et al. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for quantification of elemental carbon in sediments [J]. *Chemosphere*, 2007, 69 (4): 526-533.
- [54] Han Y M, Cao J J, Chow J C, et al. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between char-and soot-EC [J]. *Chemosphere*, 2007, 69 (4): 569-574.
- [55] Han Y M, Bandowe B A M, Wei C, et al. Stronger association of polycyclic aromatic hydrocarbons with soot than with char in soils and sediments [J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 1335-1345.
- [56] 李秋玲, 乔淑卿, 石学法, 等. 北极东西伯利亚陆架沉积物物源: 来自黏土矿物和化学元素的证据[J]. *海洋学报*, 2021, 43 (3): 76-89. [LI Qiuling, QIAO Shuqing, SHI Xuefa, et al. Sediment provenance of the East Siberian Arctic Shelf: evidence from clay minerals and chemical elements [J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43 (3): 76-89.]
- [57] 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.
- [58] Yao P, Zhao B, Bianchi T S, et al. Remineralization of sedimentary organic carbon in mud deposits of the Changjiang Estuary and adjacent shelf: Implications for carbon preservation and authigenic mineral formation [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 91: 1-11.
- [59] 韩永明, 曹军骥, 金章东, 等. 岱海与太湖沉积物焦碳和烟炱最近200年历史对比研究[J]. *第四纪研究*, 2010, 30 (3): 550-558. [HAN Yongming, CAO Junji, JIN Zhangdong, et al. Comparison of char and soot variations in sediments from lakes Daihai and Taihu [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30 (3): 550-558.]
- [60] Gustafsson Ö, Haghseta F, Chan C, et al. Quantification of the dilute sedimentary soot phase: implications for PAH speciation and bioavailability [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 31 (1): 203-209.
- [61] Karlsson E S, Brüchert V, Tesi T, et al. Contrasting regimes for organic matter degradation in the East Siberian Sea and the Laptev Sea assessed through microbial incubations and molecular markers [J]. *Marine Chemistry*, 2015, 170: 11-22.
- [62] 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]. *Am. J. Sci*, 1996, 296: 664-691, 1996.
- [63] 李宏亮, 陈建芳, 金海燕, 等. 楚科奇海表层沉积物的生源组分及其对碳埋藏的指示意义[J]. *海洋学报*, 2008, 30 (1): 165-171. [LI Hongliang, CHEN Jianfang, JIN Haiyan, et al. Biogenic constituents of surface sediments in the Chukchi Sea: implications for organic carbon burying efficiency [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30 (1): 165-171.]
- [64] Lara R J, Rachold V, Kattner G, et al. Dissolved organic matter and nutrients in the Lena River, Siberian Arctic: Characteristics and distribution [J]. *Marine Chemistry*, 1998, 59 (3-4): 301-309.
- [65] Boucein B, Fahl K, Stein R, et al. Variability of river discharge and Atlantic-water inflow at the Laptev Sea continental margin during the past 15, 000 years: Implications from maceral and biomarker records [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 89 (3): 578-591.

- [66] Bröder L, Tesi T, Salvadó J A, et al. Fate of terrigenous organic matter across the Laptev Sea from the mouth of the Lena River to the deep sea of the Arctic interior [J]. *Biogeosciences*, 2016, 13 (17): 5003-5019.
- [67] Hedges J I, Keil R G, Benner R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27 (5-6): 195-212.
- [68] Dethleff D, Kuhlmann G. Fram Strait sea-ice sediment provinces based on silt and clay compositions identify Siberian Kara and Laptev Seas as main source regions [J]. *Polar Research*, 2010, 29 (3): 265-282.
- [69] 叶君, 胡利民, 石学法, 等. 基于木质素示踪北极东西伯利亚陆架沉积有机碳的来源、输运与埋藏[J]. *第四纪研究*, 2021, 41 (3): 752-765. [YE Jun, HU Limin, SHI Xuefa, et al. Sources, transport and burial of terrestrial organic carbon in the surface sediments across the East Siberian Arctic shelf, insights from lignin [J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41 (3): 752-765.]
- [70] 陈立奇, 高众勇, 杨绪林, 等. 北极地区碳循环研究意义和展望[J]. *极地研究*, 2004, 16 (3): 171-180. [CHEN Liqi, GAO Zhongyong, YANG Xulin, et al. Prospects of research on carbon cycle in the arctic [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16 (3): 171-180.]
- [71] Fang Z M, Yang W F, Chen M, et al. Abundance and sinking of particulate black carbon in the western Arctic and Subarctic Oceans [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (1): 29959.
- [72] Kozlov V S, Panchenko M V, Yausheva E P. Mass fraction of black carbon in submicron aerosol as an indicator of influence of smoke from remote forest fires in Siberia [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (11): 2611-2620.
- [73] Huang X Y, Rein G. Smouldering combustion of peat in wildfires: inverse modelling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161 (6): 1633-1644.
- [74] Hugelius G, Loisel J, Chadburn S, et al. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117 (34): 20438-20446.
- [75] Kharuk V I, Ranson K J, Dvinskaya M L, et al. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6 (4): 045208.