



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

初级生产力主导了辽河水系颗粒态有机碳的来源

陈崇昊, 吕纪轩, 王诗珉, 何炽鹏, 汪亚平, 高建华

Riverine primary productivity dominated the source of particulate organic carbon in Liaohe River System

CHEN Chonghao, LYU Jixuan, WANG Shimin, HE Chipeng, WANG Yaping, and GAO Jianhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024062101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水库调控下黄河口沉积有机碳的分布、来源与输运特征

Distribution, source, and transport of particulate organic carbon in the Yellow River estuary as affected by the water-sediment regulation

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 120–130

南极罗斯海阿蒙森海2019—2020年夏季表层悬浮颗粒有机质组成及其控制因素

Composition of organic materials and the control factors of suspended particulates in the surface water of the Ross Sea-Amundsen Sea in marginal sea of the southwestern Antarctic in austral summer 2019–2020

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 24–38

极地峡湾有机碳来源和埋藏研究进展

Review of organic carbon source and burial in polar fjords

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 73–83

南极罗斯海柱样沉积物中有机碳和氮元素地球化学特征及其来源

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

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 83–90

西菲律宾海26万年来古生产力变化的颗石藻证据

Variations of primary productivity in the western Philippine Sea in the past 260000 years:evidence from coccolith

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 113–121

南海南沙海区沉积有机质分布特征及其指示意义

Spatial distribution of organic matter in surface sediments from the Nansha sea area of the South China Sea and its implications for marine productivity and monsoon

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 45–54



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈崇昊, 吕纪轩, 王诗珉, 等. 初级生产力主导了辽河水系颗粒态有机碳的来源 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 107-118.
CHEN Chonghao, LYU Jixuan, WANG Shimin, et al. Riverine primary productivity dominated the source of particulate organic carbon in Liaohe River System[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 107-118.

初级生产力主导了辽河水系颗粒态有机碳的来源

陈崇昊, 吕纪轩, 王诗珉, 何炽鹏, 汪亚平, 高建华

南京大学地理与海洋科学学院, 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023

摘要:作为关键陆源物质,河流颗粒态有机碳(POC)的来源、输运及入海通量是当前关注的热点问题。然而,受水库等人类活动影响,河流颗粒碳的组分正在发生变化,这势必给陆地和海洋间碳的源汇过程和生物地球化学循环机制带来深刻影响。围绕上述问题,以辽河水系为研究区,于2023年7月沿河采集14个样品,将生物地球化学指标分析与最新的基因检测技术相结合,分析了POC含量和来源在流域内的变化规律,探讨了初级生产力主导辽河水系POC来源的可能机制,对比和总结了中国典型河流POC来源改变的共同趋势。研究结果显示,初级生产力是当前辽河水系POC的主要来源,其中球藻纲和蓝藻门生物是最主要贡献者;动物可能也是POC的重要来源,未来在分析POC来源时需加以重视;水库拦蓄效应可改变河流浮游生物的组成,进而对河流POC的来源产生重要影响;长江、黄河、珠江以及台湾岛和海南岛的诸多河流POC的浮游生物来源比例也在显著增加。上述趋势性变化,可能导致POC在流域-河口-大陆架间的源汇格局发生剧烈变化,需要持续关注。

关键词:河流颗粒态有机碳;水库;初级生产力;辽河

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024062101](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024062101)

Riverine primary productivity dominated the source of particulate organic carbon in Liaohe River System

CHEN Chonghao, LYU Jixuan, WANG Shimin, HE Chipeng, WANG Yaping, GAO Jianhua

Key Laboratory of Coast and Island Development of Ministry of Education, School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: As a crucial terrestrial source, the source, transport, and flux of riverine particulate organic carbon (POC) to the ocean are currently of significant interest. However, human activities, such as the construction of reservoirs, are changing the composition of river POC, potentially impacting the source-sink processes between land and sea, as well as biogeochemical cycles. To address this issue, the Liaohe River System was selected for this study, in which 14 samples were collected in July 2023, and the trends in POC content and sources within the drainage basin were analyzed using biogeochemical methods and gene detection technology. The potential mechanisms by which riverine primary production (Rpp) has become a dominant POC source in the Liaohe River System was explored and those in other typical Chinese rivers were compared. Results indicate that the Rpp was the predominant source of POC in the Liaohe River System, and Trebouxiophyceae and Cyanobacteria were the primary contributors. Additionally, animals may also play a significant role as POC sources in rivers, warranting further attention in future analyses. The retention effect in reservoirs could alter the composition of river plankton and thus significantly affect the POC sources. Moreover, the proportions of plankton-derived POC in the Changjiang River, Huanghe River, and Zhujiang River in the continent, and rivers in Taiwan and Hainan islands have also seen notable increases. These changing trends could lead to substantial shifts in the patterns of POC sources and sinks across watersheds, estuaries, and continental shelves, meriting considerable attention.

Key words: riverine particulate organic carbon; reservoirs; riverine primary production; Liaohe River

河流是连接陆地和海洋两大生态系统的纽带,也是陆源物质进入海洋,并参与全球物质循环的重要通道。作为影响全球气候变化的关键物质,经河

流输运至海洋的碳通量达到900 Tg C/a^[1-2],在全球碳循环中发挥着重要作用。颗粒态有机碳(particulate organic carbon, POC)是河流碳的主要形

资助项目:国家自然科学基金项目“环渤海滨海地球关键带结构和格局演变与驱动机制”(42293261),“鸭绿江流域洪水频率-强度变化的海岸带沉积记录”(42276170)

作者简介:陈崇昊(2001—),男,硕士研究生,主要从事陆海交互研究, E-mail: 191830014@smail.nju.edu.cn

通讯作者:高建华(1973—),男,教授,主要从事海洋沉积动力学研究, E-mail: jhgao@nju.edu.cn

收稿日期:2024-06-21; 改回日期:2024-07-12. 文凤英编辑

态之一,年均入海通量约为200 Tg C^[3-5],其来源复杂,生物地球化学过程活跃,形态转换迅速,对全球有机和无机碳循环过程有着重要影响^[6-8]。因此,有关河流POC来源、输运和埋藏的相关研究是当前的研究热点,也是理解全球碳循环和碳收支的重要环节。

河流POC主要有4种来源,即富含有机物的岩石、陆地植被、土壤有机质和水体初级生产力(riverine primary production, Rpp)^[9-11]。由于水体初级生产力与生物种群组成和水环境因子密切相关,深受气候变化与人类活动影响,因此Rpp来源碳的数量存在着较大的变率;此外,这部分碳的化学性质不稳定,更容易矿化分解,不易在河口和陆架形成稳定碳汇^[12-14],这也为准确估算海陆间碳的收支关系以及判断两者间的源汇格局带来很大的不确定性。

人类活动尤其修建水库,深刻改变了流域POC的来源、输运和入海通量。目前,人们对水库拦截效应导致的POC入海通量减少已经有了充分的认知^[15-17],例如三峡大坝拦截了上游80%的POC^[18],但另一方面,水库减小了河流的连通性,减弱了河流的水动力,改变了河流生态系统的组成和种群结构,进而可能导致河流Rpp来源POC贡献比例发生很大变化。有研究报道显示,受水库排蓄水等管理方式的影响,Rpp来源POC的数量有增加的趋势,导致河流的入海POC的组成已经发生了改变,如长江、萨尔河、锦江等^[19-22]。但目前对于这种趋势的变化机理仍缺乏深入的分析和探讨,例如,河流生态系统优势种群变化与POC生源贡献比例间的互馈关系,上述变化趋势是否普遍出现在不同纬度带和不同流域面积的河流中。

虽然已有研究证明水库大坝的建设导致了库区浮游植物的优势种、繁衍时间和繁殖规模发生变化^[23-24],但受制于河流生态系统组成的复杂性,人工定量鉴别生物种群类型对水库修建的响应,及其对POC组成的影响在技术上有很大的难度。然而,DNA技术的出现,使浮游生物群落的海量和快速鉴定成为可能^[25],这也为解决上述难题带来了契机。

作为一种尝试,本文选择辽河水系作为研究区,在分析颗粒态有机质POC含量、PN含量、C/N值、Chla含量、 $\Delta^{14}\text{C}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 指标在流域内分布特征的基础上,进一步利用马尔科夫链-蒙特卡洛分析辨析POC来源,并结合DNA技术评估水体中不同藻类对其的贡献,揭示人类活动影响下初级生产力正在主导辽河水系颗粒态有机碳的来源这一现

象。在此基础上,通过收集不同纬度带其他河流的相关数据,验证这一趋势在全国范围内的河流可能普遍存在。

1 研究区概况

辽河是我国第七大河流,全长1345 km,流域面积 $22.9 \times 10^3 \text{ km}^2$;属温带气候,以半湿润半干旱为典型特征,流经区域以黄壤为主,水土流失严重^[26-27]。广义上,辽河水系共包括辽河、大辽河、大凌河和小凌河4条河流(图1)。辽河有东辽河和西辽河两个主要源头,西辽河主要流经科尔沁沙地和贡格尔草原,降水少,蒸发强烈,60%的流域面积只贡献了21.6%的径流量^[28];东辽河主要流经山地和丘陵地区,降水充足,是整个流域最主要径流来源。大辽河干流长94 km,主要包括浑河(415 km)和太子河(413 km)两个子流域,流经了沈阳等多个重要工业区^[29-31]。大凌河全长435 km,流域面积2.33万km²,是辽宁省西部的重要河流^[32]。小凌河全长209 km,流域面积仅5 088 km²,与大凌河并行发育^[33]。

辽河是我国东北部的重要河流,流经区域多为富含土壤有机碳的黑土,近些年来辽河流域土地利用类型的变化带来了大量水土流失,使得释放到水体中的土壤有机质含量大量增加^[34-36]。新中国成立后,截止到1989年,辽河流域已经新建了600多座水库,已经严重影响了辽河POC的组成与输运^[37]。

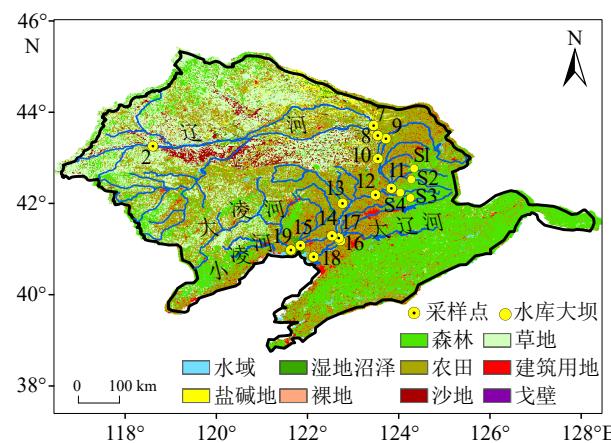


图1 研究区域及土地利用类型示意图

图中数字代表采样点编号。S1—S4依次为:南城子水库、清河水库、榛子岭水库和柴河水库;No. 12为石佛寺水库。

Fig.1 The study area and land-use type

The numbers represent the sampling point number. S1—S4 are Nanchengzi Reservoir, Qinghe Reservoir, Zhenziling Reservoir and Chaihe Reservoir, respectively; and No.12 is Shifosi Reservoir.

2 材料与方法

2.1 样品采集

2023 年 7 月采集 14 个样品, 其中辽河 10 个, 大辽河 3 个, 大凌河 1 个。由于西辽河干流断流多年, 仅在最上游和靠近与东辽河交汇处采集到 3 个水样。由于适逢雨季, 干流水流速度较快, 水体垂向混合充分, 以水深 0.5 m 处的水样代表整个水柱。使用玻璃纤维过滤器(孔径: 0.7 μm, Whatman GF/F)过滤水样, 获得悬浮颗粒物(SPM); 同时使用酸洗聚乙烯取样桶采集 1 L 水样, 在其中加入 1 mL 10 g/L 的碳酸镁悬浊液, 并用锡纸包裹确保避光, 用于叶绿素测量。过滤后的 SPM 和叶绿素样品在 -20°C 条件下保存, 用于后续的分析处理。

2.2 实验分析

将冻干后的样品浸泡在 1 mol/L 的 HCl 溶液中, 在隔绝空气和常温状态下进行反应, 以去除无机碳(如碳酸盐等)。使用元素分析仪(Flash 2000HT, Thermo Fisher Scientific)测量 POC 和颗粒物氮(PN), 其测定精度优于±0.02% 和 0.002%^[38]。用元素质谱仪(MAT253, Thermo Fisher Scientific)测定有机碳稳定同位素 δ¹³C。有机碳稳定同位素 δ¹³C 用 VPDB(Vienna Pee Dee Belemnite)标准样品进行计算, 基于重复的分析精度优于±0.1‰。悬浮颗粒物的有机碳 Δ¹⁴C 在美国 Beta 实验室测定, 测量结果使用 IRMS 单独测量的 δ¹³C 进行矫正(δ¹³C 经过归一化, 值为-25‰), 并用常规放射性碳年龄表示(相对于公元 1950 年)表示。

2.3 统计分析

采用马尔科夫链-蒙特卡洛贝叶斯方法^[39], 估算 POC 中植物、土壤、岩石和 Rpp 4 种来源的比例。该模型在 MATLAB(v.2023a, Math Works, USA) 环境中运行, 可进行 2×10⁵ 迭代, 使用 10 000 个步骤的数据处理和 100 次数据细化, 具体算法如下:

$$f_R \times \Delta^{14}C_R + f_S \times \Delta^{14}C_S + f_P \times \Delta^{14}C_P + f_{Rpp} \times \Delta^{14}C_{Rpp} = \Delta^{14}C_{POC} \quad (1)$$

$$f_R \times \delta^{13}C_R + f_S \times \delta^{13}C_S + f_P \times \delta^{13}C_P + f_{Rpp} \times \delta^{13}C_{Rpp} = \delta^{13}C_{POC} \quad (2)$$

$$f_R \times (N/C)_R + f_S \times (N/C)_S + f_P \times (N/C)_P + f_{Rpp} \times (N/C)_{Rpp} = (N/C)_{POC} \quad (3)$$

$$f_R + f_S + f_P + f_{Rpp} = 1 \quad (4)$$

其中, f_R 、 f_S 、 f_P 、 f_{Rpp} 分别代表岩石、土壤、植物和初级生产力来源的 POC 比例。

2.4 浮游生物 DNA 分析

高通量 DNA 测序在上海美吉生物医药科学有限公司完成, 使用 3NDF_V4-euk-r2r 和 CYA359F_aCYA781 两种引物进行 PCR 扩增, 核酸纯度和浓度均使用 NanoDrop2000 方法来进行检测。核酸完整性则使用琼脂糖凝胶电泳方法进行检测, 上述具体步骤可见文献[40-46]。

对于原核生物和真核生物均使用 OTU 数据集聚类到“门”这一分类学水平。原核生物检测出蓝藻、酸杆菌门、绿弯菌门、厚壁菌门、硝化螺旋菌门、变形菌门及未分类 7 个主要门类。真核生物检测出来真菌、隐藻、动物、绿藻、变形虫、未分类和无分类 7 个主要门类。其中, 未分类(No rank)是指在门这个分类学水平上没有明确的分类信息或分类名称, 而无分类(Unclassified)则是在数据库中没有找到对应序列的分类信息。

3 结果

3.1 悬浮颗粒物的元素含量及分布特征

LH2 站位于辽河上游, LH7—LH11 站地处中游, 而 LH12—LH15 为下游区域。由于西辽河上游断流, LH2 与河流下游其他采样点并不连通, 只能作为一个参考值。

辽河流域悬浮颗粒物的元素和同位素值特征如表 2 所示。辽河 PN 和 POC 含量分别为 0.1%~0.63% (0.20%±0.15%) 和 0.8%~3.92% (1.5%±0.88%); 大辽河的 PN 和 POC 含量分别为 0.25%~0.81% (0.60%±0.25%) 和 1.87%~4.87% (3.67%±1.3%)。总体来看, 除 LH11 和 LH12 站位外, 辽河全流域的 POC 和 PN 含量变化较小。大辽河流域的浑河和太子河 POC 和 PN 含量较高, 均在 4% 和 0.7% 以上; 但汇流后, 二者在大辽河干流中的含量分别降至 1.87% 和 0.25%。从整个辽河水系来看, 大辽河和大凌河的 POC 含量较高, 大辽河的 PN 含量更高, 而辽河 POC 和 PN 含量在 3 条河流中均最低。

辽河和大辽河的 δ¹³C 值分别为 -23.9‰~-22.1‰ (-23.16‰±0.56‰) 和 -27.3‰~-25.7‰ (-26.40‰±0.67‰)。辽河中游和下游 POC 的 δ¹³C

值均变化较小, 相对而言, 下游的 $\delta^{13}\text{C}$ 值更重, 最低值出现在中下游交界处的LH11和LH12站位。太子河和浑河悬浮颗粒物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为-27.3‰和-25.7‰, 两者汇流之后, 大辽河干流的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-26.2‰。

3.2 颗粒有机碳年龄

辽河和大辽河POC的 $\Delta^{14}\text{C}$ 分别为-289.89‰~-153.74‰ ($-247.45\pm44.75\text{‰}$) 和-254.57‰~-136.32‰ ($-203.54\pm49.45\text{‰}$), 相对应的 ^{14}C 年龄范围分别是1270~2750 aBP ($2297.14\pm459.56\text{ aBP}$) 和1180~2360 aBP ($1843.33\pm492.77\text{ aBP}$)。辽河中游和下游的POC年龄差异较小, 其中POC年龄最小值位于LH8站位, 为1270 aBP。太子河的POC年龄为1990 aBP, 浑河为1180 aBP; 汇流后的大辽河干流碳年龄增加至2360 aBP。

3.3 颗粒有机碳来源分析

POC/PN及有机碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 是辨析有机物来源的重要指标^[47]。陆地有机质(如植物)的OC/N比值>12, 而浮游植物为4~8^[48-51]。C3植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-25‰~-28‰, C4植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较C3植物明显偏重^[48]。根据前人的研究, 本文使用C/N值和 $\delta^{13}\text{C}$ 定性识别了辽河水系POC的来源(图2)。结果显示大辽河的水体POC主要由淡水藻类提供, 而辽河水体POC则较复杂, 土壤有机质及C4植物等或许也是其重要来源。为了进一步探究POC的来源, 本文基于N/C值、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta^{14}\text{C}$ 端元值, 使用马尔科夫链-蒙特卡洛贝叶斯方法计算POC的组成。根据已有研究经验, PN/POC值在利用贝叶斯分析

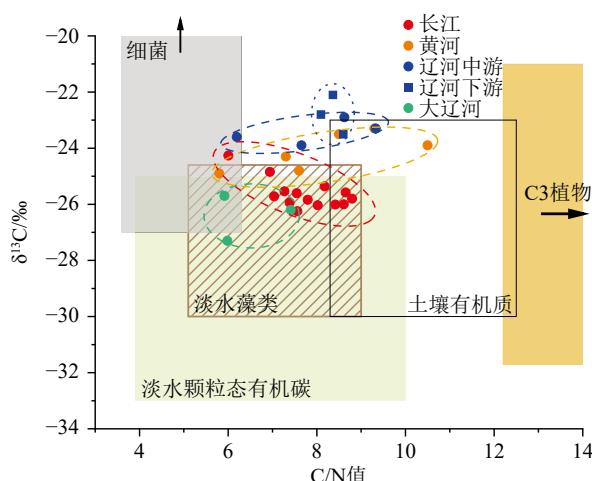


图2 根据C/N值和 $\delta^{13}\text{C}$ 指示POC来源

Fig.2 The source of POC grouped in C/N vs $\delta^{13}\text{C}$ plot

有机碳来源时更加敏感^[52-53], 因此本文应用该值进行POC来源分析。用于计算的各端元值见表1。

端元分析与上述定性分析的结果一致。端元分析显示(表2), Rpp是辽河POC最主要的来源, 平均占比为44%, 其最大值出现在LH11站位, 为67.69%; 最小值出现在LH10站位, 为31.85%。土壤是辽河POC的第二大来源, 平均占比为37%, 最大值出现在LH13, 为44.05%; 最小值出现在LH11, 为21.14%。岩石和植被对POC的贡献较小, 均在10%左右。浑河和太子河Rpp占比均超过80%; 交汇后, 大辽河干流Rpp来源POC所占比重迅速降低至2%, 而植被贡献上升到96%, 这可能与海水上涨带来的河口湿地区域芦苇和碱蓬等植物有关。

水体叶绿素含量与河流中Rpp来源POC比例展现了高度的一致性(表2), 相关系数为0.80。辽河和大辽河水体Chla含量分别为0.02~0.32 μg/L ($0.28\pm0.23\text{ }\mu\text{g/L}$) 及1.10~3.78 μg/L ($2.38\pm1.10\text{ }\mu\text{g/L}$)。辽河中游Chla含量较高, 最高值出现在LH11站位, 达到0.82 μg/L。浑河和太子河Chla含量均较高, 而交汇后大辽河的Chla含量则明显降低, 仅为1.1 μg/L。

3.4 悬浮颗粒物中浮游生物种类分析

辽河中原核生物以无分类含量最高(76.98%), 其次为蓝藻(16.64%)、酸杆菌门(3.06%)、绿弯菌门(1.31%), 其他几类均为细菌, 含量均不足1%(图3)。在空间上, 下游站位的蓝藻、酸杆菌和绿弯菌门等主要细菌门类含量更高, 可达中游站位的两倍。太子河和浑河水系只检测出无分类、蓝藻和酸杆菌3种主要的原核生物, 其中, 太子河的蓝藻和酸杆菌含量更高。两条河流交汇后, 大辽河蓝藻数量介于两条支流之间, 为14.75%; 而酸杆菌的数量显著上升, 达到1.93%。

辽河中真核生物数量以未分类含量最高, 平均

表1 来自岩石、土壤、植被和Rpp的POC的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\Delta^{14}\text{C}$ 和N/C端元值(用平均值±标准差表示)

Table 1 $\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$, and N/C endmembers of POC from rocks, soils, vegetation, and Rpp (expressed as mean ± standard deviation)

来源	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\Delta^{14}\text{C}/\text{‰}$	N/C值
岩石	-22.4±4.9	1000±0	0.045±0.066
土壤	-21.8±4.9	276±30	0.075±0.018
植被	-28.5±2.0	0±50	0.038±0.019
Rpp	-28.0±1.1	-161±22	0.184±0.011

注: 由于辽河数据有限, 部分端元值参考长江^[22]。

表 2 辽河水系 SPM 元素特征、同位素特征和 POC 来源分析

Table 2 Elemental and isotopic characteristics and POC source analysis of SPM in Liaohe River system

编号	流系	PN /%	POC /%	C/N	Chla /($\mu\text{g/L}$)	$\Delta^{14}\text{C} / \text{‰}$	^{14}C 年龄/aBP	$\delta^{13}\text{C} / \text{‰}$	POC来源占比/%			
									岩石	土壤	植被	Rpp
LH2	辽河	0.16	1.30	7.92	0.02							
LH7	辽河	0.17	1.35	8.11	0.29							
LH8	辽河	0.13	1.01	7.66	0.26	-153.74	1270	-23.9	1.55	25.89	19.60	52.96
LH9	辽河	0.14	1.19	8.62	0.33	-269.35	2450	-22.9	8.69	43.88	9.91	37.51
LH10	辽河	0.13	1.23	9.33	0.47	-291.74	2700	-23.3	12.33	42.19	13.63	31.85
LH11	辽河	0.63	3.92	6.19	0.83	-248.13	2220	-23.6	7.88	21.14	3.28	67.69
LH12	辽河	0.25	2.18	8.60	N.D.	-250.00	2240	-23.5	7.21	41.83	11.45	39.52
LH13	辽河	0.13	1.10	8.36	0.07	-296.14	2750	-22.1	11.28	44.05	7.59	37.07
LH14	辽河	0.12	0.97	8.09	0.21	-269.35	2450	-22.8	8.53	41.34	7.68	42.45
LH15	辽河	0.10	0.80	8.25	0.32							
LH16	太子河(大辽河)	0.81	4.87	5.98	2.25	-226.29	1990	-27.3	7.09	7.55	4.99	80.37
LH17	浑河(大辽河)	0.72	4.26	5.92	3.78	-144.21	1180	-25.7	1.34	7.65	8.11	82.90
LH18	大辽河	0.25	1.87	7.41	1.10	-261.12	2360	-26.2	0.57	1.25	95.73	2.45
LH19	大凌河	0.20	1.88	9.31	0.29							

表中“N.D.”代表未测出相关指标。

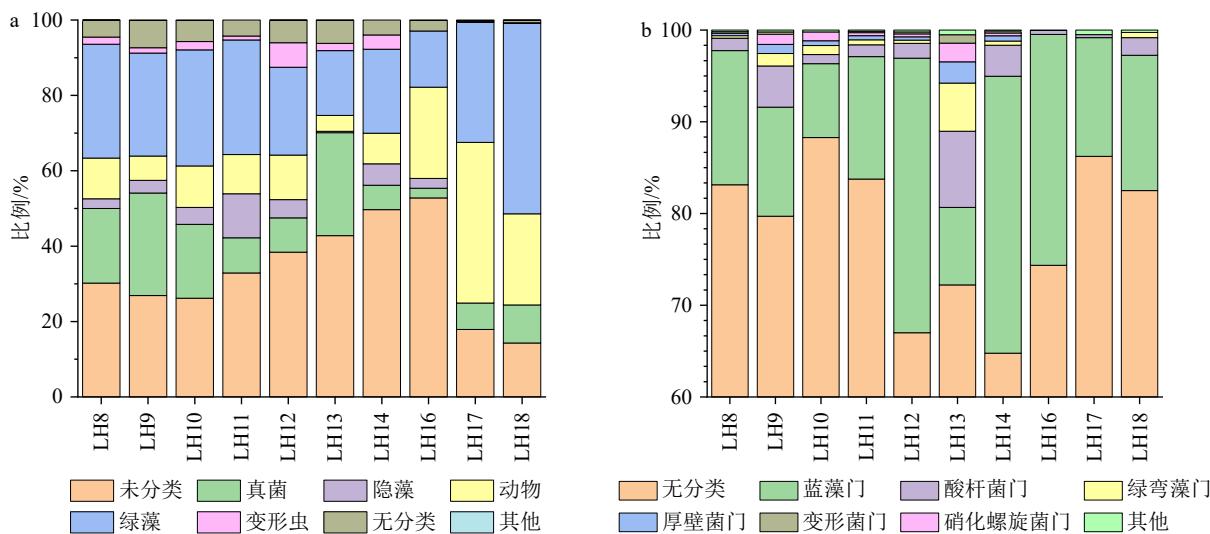


图 3 基于辽河水系悬浮颗粒物的 DNA 分析

a. 真核生物, b. 原核生物。

Fig.3 DNA analysis of SPM in Liaohe River System

a. Eukaryotes, b. prokaryotes.

为 35.3%; 其次为绿藻和真菌, 含量分别为 25.93% 和 16.97%; 而动物(8.96%)、隐藻(4.72%)和变形虫(2.69%)含量相对较低(图 3)。但在辽河中游, 除变形虫外, 其他门类的生物含量均高于下游。浑河有着极高的动物和绿藻含量, 分别达到了 42.60% 和

31.90%; 二者在太子河中含量较少, 分别只有 24.20% 和 14.90%。此外, 浑河中真菌的含量高于太子河, 而其余真核生物则低于太子河; 二者交汇后, 大辽河干流绿藻 DNA 含量显著增加, 达到了 50.50%, 真菌含量也有小幅度增加, 达到了 7.02%; 但动物

DNA含量有所下降,仅占24.20%。

为便于有针对性的定量对比,在剔除未分类、无分类及占比不足1%的生物门类后,本文计算了几个主要门类的生物基因百分比(图4)。辽河流域基因数量最低值出现在LH9站位,为 2.01×10^9 copies/g,最高值则出现在河口附近的LH14,为 7.59×10^9 copies/g;整体而言,中游的生物量要低于下游。太子河生物量达到 5.46×10^{10} copies/g,浑河基因量为 8.70×10^9 copies/g;两者交汇后,大辽河干流基因数量介于两个支流之间,为 1.00×10^{10} copies/g。太子河流经本溪、辽阳等重要化工城市,因此位于辽阳下游的LH16是全水系生物量最高的站位;而LH11站位虽然同样位于重要化工城市铁岭,但其位于城区和主要化工区上游,因此生物量较低,为 6.55×10^9 copies/g。

从流域内藻类组成的空间分布来看(图4),靠近河口区域的站位,如LH16和LH14等,蓝藻是其浮游生物的主要组成部分,其次为绿藻和动物;而在河口区以上及库区,如LH8、LH9和LH11等站位,绿藻、蓝藻和真菌在浮游生物中占比最高。

4 讨论

4.1 辽河悬浮颗粒物来源和组成的控制性因素分析

以往研究表明,河流POC的4个重要来源中,土壤有机质为最主要来源^[54-56]。而本文的四端元模型计算结果却显示,整个辽河水系中,Rpp是POC最主要来源,其次为土壤来源,而岩石和植被贡

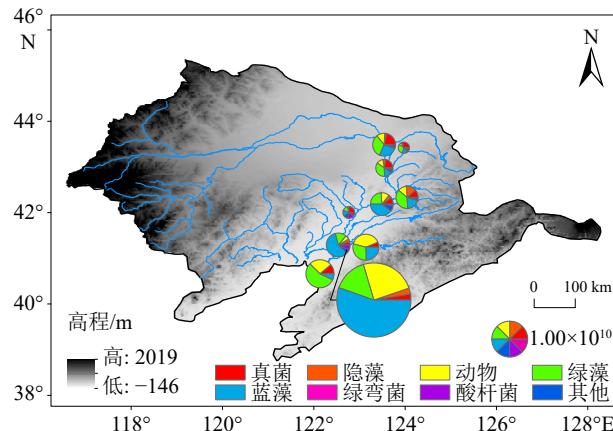


图4 辽河水系悬浮颗粒物中主要生物门类(部分)空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution of main biological phyla (partial) in SPM in Liaohe River system

献的POC平均占比仅为10%左右,与传统认知有较大的差异。究其主要原因,首先可能与流域内的土地利用类型密切相关(图1)。东辽河、太子河和浑河上游为高山林地(图1),岩石碳来源比例本应较高,但这部分地区建有大型水库,其拦截作用使这部分POC无法到达中下游地区^[15]。其次,河流下游流经区域多为辽河平原,耕地较多,水土流失严重,土壤碳贡献较大^[26]。第三,水库在拦截上游物质的同时,也会改变河流动力,从而有助于浮游生物生长,从而提高了POC中Rpp来源的比例^[22, 54]。

而从辽河流域POC含量和组成的沿程变化也可以看出,水库拦截作用显著改变了辽河中下游的POC数量和组成,初级生产力来源的POC明显增加。例如LH11站位上游分布有清河的南城子水库、清河水库,柴河的柴河水库,泛河的榛子岭水库等,这也导致LH11站位POC含量达到3.92%,Rpp对POC的贡献比例在全流域最高(67.68%)。石佛寺水库位于辽河干流,其库区(LH12站位)水体POC的含量也到了2.18%,Rpp来源的POC比例接近40%。

为揭示辽河Rpp来源的变化,本文选择对Rpp有影响的生物门类(绿藻门、动物界和蓝藻门),以及Chla、POC、C/N、 $\Delta^{14}\text{C}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 等相关指标,计算了它们之间的相关系数。其中经OTU聚类分析显示,绿藻门主要由绿藻纲和共球藻纲二者组成,因此本文对二者分别进行计算。结果显示(表3),Rpp与POC含量显著正相关(相关系数0.75),与贝叶斯模型模拟结果相一致;此外,POC含量与C/N值和 $\delta^{13}\text{C}$ 呈负相关,而与Chla显著正相关,这再次印证了辽河水体POC含量和来源均受控于水体初级生产力变化。

本文进一步对比了POC含量与不同类型浮游生物的相关系数,结果显示,共球藻纲基因量与POC含量呈现显著正相关;蓝藻门基因量与POC含量相关性也较高;绿藻纲基因量与POC含量的相关性较低。由此可见,共球藻纲生物可能是辽河生源POC的最大贡献者,其次为蓝藻门,而绿藻纲来源的POC相对较少。

此外,动物界基因量与POC含量也表现出显著正相关,且与Chla、POC、C/N、 $\Delta^{14}\text{C}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 等指标均表现出较高相关性,这说明动物产生的生物碎屑和遗体残骸也为河流贡献了一定数量的POC。以往在分析生物对河流POC贡献时,更多地考虑了植被和浮游生物,而本文的研究结果则表明,动物的贡献也不可忽视,否则,植被和Rpp来源POC含量

表 3 选定指标与生物门类的相关关系
Table 3 Correlation between selected indicators and biological categories

	POC	C/N	Chla	$\Delta^{14}\text{C}$	$\delta^{13}\text{C}$	Rpp	绿藻纲	共球藻纲	动物界	蓝藻门
POC	1	-0.87**	0.79**	0.42	-0.71*	0.75*	0.33	0.68*	0.70*	0.6
C/N	-0.87**	1	-0.77**	-0.61	0.70*	-0.86**	-0.42	-0.59	-0.63	-0.48
Chla	0.79**	-0.77**	1	0.61	-0.75*	0.80**	0.34	0.45	0.61	0.38
$\Delta^{14}\text{C}$	0.42	-0.61	0.61	1	-0.47	0.51	0.1	0.19	0.24	0.13
$\delta^{13}\text{C}$	-0.71*	0.70*	-0.75*	-0.47	1	-0.62	-0.80**	-0.85**	-0.91***	-0.65*
Rpp	0.75*	-0.86**	0.80**	0.51	-0.62	1	0.13	0.61	0.65*	0.63
绿藻纲	0.33	-0.42	0.34	0.1	-0.80**	0.13	1	0.65*	0.67*	0.34
共球藻纲	0.68*	-0.59	0.45	0.19	-0.85**	0.61	0.65*	1	0.96***	0.91***
动物界	0.70*	-0.63	0.61	0.24	-0.91***	0.65*	0.67*	0.96***	1	0.89***
蓝藻门	0.6	-0.48	0.38	0.13	-0.65*	0.63	0.34	0.91***	0.89***	1

注: 由于 PN 和 POC 具有高度相关性 ($R=1$; $P<0.001$), 所以进一步分析时没有计算 PN 与其他数据的关系。

可能被高估。

受控于研究手段, 先前的研究只能定性分析河流中水体 POC 的来源, 端元分析方法提供了判断初级生产力的相对贡献的基本方法; 而本文通过引入 DNA 技术, 定量地估算了不同浮游生物对河流 POC 贡献(受篇幅所限, 仅分析到门和纲), 证明了 DNA 技术在 POC 研究中的可行性, 这有利于定量探究不同浮游生物对水库大坝修建的响应机理, 也为未来深入探究河流 POC 来源对人类活动的响应方式和响应机制奠定了良好的基础。

4.2 不同河流悬浮颗粒物来源和组成对比

如前所述, 水库影响下的辽河水系入海 POC 的组成已经发生了深刻的变化。目前在全国范围内, 共分布有近十万座水库^[57]。由于不同河流地理位置、气候带、水库数量和运行模式的差异, Rpp 来源的河流 POC 对流域水库的响应可能存在空间差异。为此, 本文收集了中国东部几条有代表性河流 POC 的特征值(表 4)。通过对比分析发现, 除大辽河外, 整体呈现出从北到南 C/N 值逐渐降低, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐偏轻的特征。

本文进一步对比了不同河流初级生产力变化对 POC 来源影响(表 4、表 5)。但由于数据来源有限, 仅能依靠每条河流的 C/N 值、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta^{14}\text{C}$ 的平均值来进行估算。结果显示, 长江、黄河和珠江等大河流域也表现出 Rpp 来源 POC 占比较高的特征。由于缺少 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据, 无法对台湾岛和海南岛的中小河流 POC 组成进行估算, 但较低的 C/N 及较轻

的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也在一定程度上说明这些河流同样具有较高初级生产力, Rpp 对水体 POC 的贡献可能也相应较高。

受限于历史数据, 本文无法确定历史上不同来源对辽河 POC 的贡献, 但长江、黄河和密西西比河等大型河流的研究, 以及戈达瓦里河(印度)、萨尔河(德国)、克拉马斯河(美国)和锦江河(韩国)等中小型河流的研究均证明, 水库大坝使得河流中初级生产力提高, 产生的不稳定有机碳的比例也相应升高^[19-20, 22, 58-62]。本文搜集河流的样本量虽然有限, 但基本覆盖了从中高纬到低纬的大型和中小型河流, 这些数据证明 Rpp 已经成为河流入海 POC 的主要来源。对比上述研究和数据, 入海河流 POC 中 Rpp 来源占比增高可能是当下普遍存在的现象。河流作为陆源有机碳进入海洋的重要通道, 这种趋势在导致流域内部碳循环过程发生改变的同时, 也会影晌陆源碳进入海洋的通量, 进而对近海的碳循环和生态过程产生重大影响。

水库大坝在拦蓄上游物质的同时, 也使得河流的连通性在一定程度上被阻断, 并形成了一个小的生态系统^[63-65]。由于库区的流速降低、颗粒物沉降增加、水体透明度增高、营养盐供给提升, 导致初级生产力得到提高^[66-67]。库区浮游生物不但生产了更多的年轻有机碳, 而且可将部分老的溶解态无机碳转化为年轻的“有机碳”^[68-70], 造成河流碳的稳定性下降。随着纬度的降低和温度的提高, 这种效应可能会更加显著, 这也可能是 Rpp 对低纬地区河流 POC 贡献更高的重要因素(表 4、表 5)^[70-71]。此外,

表4 中国主要河流的悬浮颗粒物的部分特征
Table 4 Characteristics of SPM in major rivers of China

河流和流域	POC/%		C/N值		$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$		$\Delta^{14}\text{C}$ 年龄/aBP	
	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
辽河	上游	1.30	N.D.	7.92	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	中游	1.74	1.01~3.92	7.98	6.19~8.62	-23.43	-23.9~-22.9	2160
	下游	1.26	0.80~2.18	8.32	8.09~8.60	-22.80	-23.5~-22.1	2480
	平均	1.5		8.11		-23.19		2297
大辽河		3.67	1.87~4.87	6.44	5.92~7.41	-23.11	-27.3~-25.7	1843
黄河 ^[58, 72-80]	中游	0.31	0.14~0.48	7.45	6.60~7.60	-24.16	-24.8~-23.3	5362
	下游	0.49	0.13~1.78	7.12	5.80~10.5	-24.77	-27.4~-22.6	4868
	平均	0.40		7.28		-24.47		5115
	上游	1.42	1.03~2.10	7.83	6.03~8.82	-25.65	-26.7~-24.3	3271
长江 ^[22, 81]	中游	1.48	1.41~1.59	7.59	7.37~7.82	-26.39	-27.3~-25.8	2816
	下游	1.07	1.03~1.12	7.67	7.06~8.67	-26.03	-26.8~-25.2	2850
	平均	1.36		7.74		-26.02		3069
	上游	0.65	0.12~0.95	N.D.	N.D.	-25.90	-27.4~-24.8	2076
珠江 ^[69-70, 82-86]	中游	0.33	0.09~0.81	N.D.	N.D.	-25.50	-28.6~-18.8	2731
	下游	0.39	0.24~0.52	6.55	6.20~6.90	-28.50	-31.8~-21.9	1908
	平均	0.46		6.55		-25.77		2331
台湾岛 ^[87-88]		0.76	0.30~2.77	6.29	5.20~9.30	-24.31	-28.1~-22.0	N.D.
海南岛 ^[89-90]		3.42	1.80~13.57	6.78	4.30~36.00	-25.96	-29.5~-19.0	N.D.

表格中长江数据部分来自未发表研究, N.D.代表没有相应数据。

表5 中国主要河流POC入海通量及不同来源占比
Table 5 POC flux and percentage content of different sources from major rivers in China

POC通量/(Tg/a)	POC来源/%			
	岩石	土壤	植被	Rpp
辽河	0.03	8.21	37.19	10.45
大辽河	0.08	3.00	5.48	36.28
黄河	0.47	34.08	14.96	8.81
长江	2.15	14.38	20.74	14.33
珠江	0.51	5.35	10.56	9.68
				74.41

注: 由于大辽河干流缺少控口水文站, 因此使用太子河和浑河POC通量之和代表。

水库对POC的拦截作用还会导致其在流域中的滞留时间增加, 延长了矿化和分解时间^[55, 91]。最新的研究也表明, 水库释放已经逐渐从碳汇向碳源转变^[92], 改变了流域内碳原有的源汇格局。

随着全球范围内水库大坝的不断增加, 将会造

成更多的POC碳被拦截并埋藏在水库中, 目前这个比例已经超过50%, 并有不断增高的趋势^[18, 22, 93]。相较于土壤碳和植被碳, Rpp来源POC在输运过程中更容易矿化分解^[8, 94-95], 这会降低河口和陆架区碳的埋藏通量, 减弱其碳汇功能, 使流域-河口-陆架间的碳循环过程发生改变^[3, 65, 96-97]。流域-河口-陆架源汇系统的改变及大坝的拦蓄作用, 使得本应进入近海和大洋的碳元素保存在流域系统中, 并被分解进入大气碳库中, 这或许会导致温室效应进一步加剧^[16, 96, 98]。

5 结论

(1) 河流初级生产力是辽河水系水体POC的主要来源, 其次为土壤, 而岩石和植被来源占比较少。

(2) DNA分析显示, 辽河Rpp来源的POC主要由共球藻纲生物供给, 同时蓝藻的贡献也不可忽视, 绿藻纲生物贡献则相对有限, 水库和海水环境

显著影响了不同站位的主要生物门类。研究结果还发现, 动物可能也是河流 POC 的重要来源, 未来在分析 POC 来源时需加以重视。

(3) 水库大坝拦截效应, 可能是导致辽河水系中下游初级生产力来源的 POC 含量增加的主要因素。进一步分析还发现, 这一现象在长江、黄河、珠江以及台湾岛和海南岛的诸多河流中普遍存在, 其对海陆间碳循环影响值得深入研究。

致谢: 感谢国家基金委的支持, 感谢南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室的支持, 感谢张硕和陈嘉胜在野外采样中提供的帮助, 感谢课题组的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Drake T W, Raymond P A, Spencer R G M. Terrestrial carbon inputs to inland waters: a current synthesis of estimates and uncertainty[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, 3(3): 132-142.
- [2] McKee B. The transport, transformation, and fate of carbon in river-dominated ocean margins[C]//Proceedings of the RiOMar Workshop New Orleans: Tulane University, 2003.
- [3] Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglinton T. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion[J]. *Nature*, 2015, 521(7551): 204-207.
- [4] 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.
- [5] Schlünz B, Schneider R R. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux-and burial rates[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 88(4): 599-606.
- [6] Boyd P W, Claustre H, Levy M, et al. Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean[J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 327-335.
- [7] Liu D, Tian L Q, Jiang X T, et al. Human activities changed organic carbon transport in Chinese rivers during 2004-2018[J]. *Water Research*, 2022, 222: 118872.
- [8] Repasch M, Scheingross J S, Hovius N, et al. Fluvial organic carbon cycling regulated by sediment transit time and mineral protection[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(11): 842-848.
- [9] Bouchez J, Galy V, Hilton R G, et al. Source, transport and fluxes of Amazon River particulate organic carbon: insights from river sediment depth-profiles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 133: 280-298.
- [10] Hilton R G. Climate regulates the erosional carbon export from the terrestrial biosphere[J]. *Geomorphology*, 2017, 277: 118-132.
- [11] van Hoek W J, Vilmin L, Beusen A H W, et al. CARBON-DISC 1.0-A coupled, process-based model of global in-stream carbon biogeochemistry[J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2019: 1-31.
- [12] Dudgeon D, Arthington A H, Gessner M O, et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges[J]. *Biological Reviews*, 2006, 81(2): 163-182.
- [13] Lin B Z, Liu Z F, Eglinton T I, et al. Perspectives on provenance and alteration of suspended and sedimentary organic matter in the subtropical Pearl River system, South China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 259: 270-287.
- [14] Mendonça R, Kosten S, Sobek S, et al. Hydroelectric carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(12): 838-840.
- [15] Battin T J, Lauerwald R, Bernhardt E S, et al. River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world[J]. *Nature*, 2023, 613(7944): 449-459.
- [16] Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, et al. The changing carbon cycle of the coastal ocean[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 61-70.
- [17] Syvitski J, Ángel J R, Saito Y, et al. Earth's sediment cycle during the Anthropocene[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(3): 179-196.
- [18] Li G, Wang X T, Yang Z F, et al. Dam-triggered organic carbon sequestration makes the Changjiang (Yangtze) river basin (China) a significant carbon sink[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(1): 39-53.
- [19] Engel F, Attermeyer K, Ayala A I, et al. Phytoplankton gross primary production increases along cascading impoundments in a temperate, low-discharge river: insights from high frequency water quality monitoring[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 6701.
- [20] Kang S J, Kim J H, Kim D, et al. Temporal variation in riverine organic carbon concentrations and fluxes in two contrasting estuary systems: geum and Seomjin, South Korea[J]. *Environment International*, 2019, 133: 105126.
- [21] Kronvang B, Hejzlar J, Boers P, et al. Nutrient retention handbook. Software manual for EUROHARP-NUTRET and scientific review on nutrient retention[R]. Oslo, Norway: Norwegian Institute for Water Research, 2005.
- [22] Lyu J, Shi Y, Zhang S, et al. The reservoirs gradually changed the distribution, source, and flux of particulate organic carbon within the Changjiang River catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129808.
- [23] Burford M A, O'Donohue M J. A comparison of phytoplankton community assemblages in artificially and naturally mixed subtropical water reservoirs[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(5): 973-982.
- [24] Xiao Y, Li Z, Guo J S, et al. Succession of phytoplankton assemblages in response to large-scale reservoir operation: a case study in a tributary of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(3): 153.
- [25] Li Z, Lu L H, Guo J S, et al. Responses of spatial-temporal dynamics of bacterioplankton community to large-scale reservoir operation: a case study in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 42469.
- [26] Li Y L, Liu K, Li L, et al. Relationship of land use/cover on water quality in the Liao River basin, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1484-1493.
- [27] 曲凤垚, 李瑞. 辽河干流主要水库工程防洪作用与防洪效果分析 [J].

- [水利科学与寒区工程](#), 2021, 4(5): 151-155. [QU Fengyao, LI Rui. Analysis on flood control function and effect of Liaohe main reservoir project[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2021, 4(5): 151-155.]
- [28] Yue F J, Li S L, Liu C Q, et al. Using dual isotopes to evaluate sources and transformation of nitrogen in the Liao River, northeast China[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 36: 1-9.
- [29] 翁巧然, 吕旭波, 孙明东, 等. 基于控制单元划分的大辽河流域污染物空间分布及来源解析 [J]. [环境工程技术学报](#), 2023, 13(1): 171-179. [WENG Qiaoran, LYU Xubo, SUN Mingdong, et al. Spatial distribution and source analysis of pollutants in Daliao River Basin based on control unit division[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(1): 171-179.]
- [30] 杜甫, 闫晓惠, 陈小强. 基于 Delft3D 的大辽河水动力水质数值模拟 [J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 32-35,161. [DU Fu, YAN Xiaohui, CHEN Xiaoqiang. Numerical simulation of hydrodynamic water quality of Daliao River based on Delft3D[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 32-35,161.]
- [31] 许晓艳, 高世斌. 辽河流域洪水河库联合调度实践探析 [J]. [东北水利水电](#), 2022, 40(1): 42-43,49,72. [XU Xiaoyan, GAO Shibin. Practice analysis on combined flood and river storage operation in Liaohe River Basin[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2022, 40(1): 42-43,49,72.]
- [32] 杨赫男. 大凌河流域河流中氮磷变化特征分析 [J]. [水土保持应用技术](#), 2024(4): 49-52. [YANG Henan. Variation characteristics of nitrogen and phosphorus in the Daling River basin[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2024(4): 49-52.]
- [33] 董浩. 小凌河流域土壤侵蚀强度空间分布特征研究 [J]. [水土保持应用技术](#), 2024(4): 9-10. [DONG Hao. Spatial distribution characteristics of soil erosion intensity in Xiaoling River Basin[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2024(4): 9-10.]
- [34] Xu S, Yue F J, Li S L, et al. Carbon and nitrogen isotope constraints on source and variation of particulate organic matter in high-latitude agricultural rivers, Northeast China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128974.
- [35] Duan X W, Xie Y, Ou T H, et al. Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China[J]. *Catena*, 2011, 87(2): 268-275.
- [36] Lu L, Cheng H G, Pu X, et al. Identifying organic matter sources using isotopic ratios in a watershed impacted by intensive agricultural activities in Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 222: 48-59.
- [37] 水电知识网. 辽河 [Z]. 2019. [Hydropower knowledge Network. Liaohe River[Z]. 2019.]
- [38] Xing L, Zhang H L, Yuan Z N, et al. Terrestrial and marine biomarker estimates of organic matter sources and distributions in surface sediments from the East China Sea shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(10): 1106-1115.
- [39] Andersson A, Deng J J, Du K, et al. Regionally-varying combustion sources of the january 2013 severe haze events over eastern China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(4): 2038-2043.
- [40] Chen S F, Zhou Y Q, Chen Y R, et al. fastp: an ultra-fast all-in-one FASTQ preprocessor[J]. *Bioinformatics*, 2018, 34(17): 884-890.
- [41] Magoč T, Salzberg S L. FLASH: fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies[J]. *Bioinformatics*, 2011, 27(21): 2957-2963.
- [42] Wang Q, Garrity G M, Tiedje J M, et al. Naive bayesian classifier for rapid assignment of rrna sequences into the new bacterial taxonomy[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(16): 5261-5267.
- [43] Stackebrandt E, Goebel B M. Taxonomic note: a place for DNA-DNA reassociation and 16S rRNA sequence analysis in the present species definition in bacteriology[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 1994, 44(4): 846-849.
- [44] Edgar R C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads[J]. *Nature Methods*, 2013, 10(10): 996-998.
- [45] Douglas G M, Maffei V J, Zaneveld J R, et al. PICRUSt2 for prediction of metagenome functions[J]. *Nature Biotechnology*, 2020, 38(6): 685-688.
- [46] Ren Y, Yu G, Shi C P, et al. Majorbio cloud: a one-stop, comprehensive bioinformatic platform for multiomics analyses[J]. *iMeta*, 2022, 1(2): e12.
- [47] Schwestermann T, Eglington T I, Haghipour N, et al. Event-dominated transport, provenance, and burial of organic carbon in the Japan Trench[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 563: 116870.
- [48] Hedges J I, Clark W A, Quay P D, et al. Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River[J]. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(4): 717-738.
- [49] Mayer L M, Schick L L, Hardy K R, et al. Organic matter in small mesopores in sediments and soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(19): 3863-3872.
- [50] Goni M A, Monacci N, Gisewhite R, et al. Terrigenous organic matter in sediments from the Fly River delta-clinoform system (Papua New Guinea)[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F1): F01S10.
- [51] Lamb A L, Wilson G P, Leng M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1-4): 29-57.
- [52] Wei B B, Mollenhauer G, Heftner J, et al. Dispersal and aging of terrigenous organic matter in the Pearl River Estuary and the northern South China Sea Shelf[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 282: 324-339.
- [53] Yu F L, Zong Y Q, Lloyd J M, et al. Bulk organic $\delta^{13}\text{C}$ and C/N as indicators for sediment sources in the Pearl River delta and estuary, southern China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 87(4): 618-630.
- [54] Hedges J I, Cowie G L, Richey J E, et al. Origins and processing of organic matter in the Amazon River as indicated by carbohydrates and amino acids[J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(4): 743-761.
- [55] Qu Y X, Jin Z D, Wang J, et al. The sources and seasonal fluxes of particulate organic carbon in the Yellow River[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(9): 2004-2019.
- [56] Wu Y, Zhang J, Liu S M, et al. Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(1-2): 13-25.

- [57] 中华人民共和国水利部. 2022 年全国水利发展统计公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2022 National Water Conservancy Development Statistical Bulletin[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2022.]
- [58] Lu T A, Wang H J, Wu X, et al. Transport of particulate organic carbon in the lower Yellow River (Huanghe) as modulated by dam operation[J]. *Global and Planetary Change*, 2022, 217: 103948.
- [59] Huisman J, Codd G A, Paerl H W, et al. Cyanobacterial blooms[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(8): 471-483.
- [60] Imtiaz M N, Hunter K, Sereda J, et al. Effects of regional climate, hydrology and river impoundment on long-term patterns and characteristics of dissolved organic matter in semi-arid northern plains rivers[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 870: 161961.
- [61] Pradhan U K, Wu Y, Shirodkar P V, et al. Multi-proxy evidence for compositional change of organic matter in the largest tropical (peninsular) river basin of India[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 999-1009.
- [62] Voss B M, Wickland K P, Aiken G R, et al. Biological and land use controls on the isotopic composition of aquatic carbon in the Upper Mississippi River Basin[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(8): 1271-1288.
- [63] Wang H, Ran X B, Bouwman A F, et al. Damming alters the particulate organic carbon sources, burial, export and estuarine biogeochemistry of rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127525.
- [64] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3-4): 331-354.
- [65] Dethier E N, Renshaw C E, Magilligan F J. Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans[J]. *Science*, 2022, 376(6600): 1447-1452.
- [66] Ran X B, Wu W T, Song Z L, et al. Decadal change in dissolved silicate concentration and flux in the Changjiang (Yangtze) River[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 839: 156266.
- [67] Maavara T, Chen Q W, Van Meter K, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(2): 103-116.
- [68] Raymond P A, Bauer J E, Caraco N F, et al. Controls on the variability of organic matter and dissolved inorganic carbon ages in Northeast US rivers[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1-4): 353-366.
- [69] Yang M X, Liu Z H, Sun H L, et al. Organic carbon source tracing and DIC fertilization effect in the Pearl River: insights from lipid biomarker and geochemical analysis[J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 73: 132-141.
- [70] Liu Z H, Zhao M, Sun H L, et al. "Old" carbon entering the South China Sea from the carbonate-rich Pearl River Basin: coupled action of carbonate weathering and aquatic photosynthesis[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 78: 96-104.
- [71] Prats J, Armengol J, Marcé R, et al. Dams and reservoirs in the lower ebro river and its effects on the river thermal cycle[M]//Barceló D, Petrovic M. The Ebro River Basin. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 77-95.
- [72] Ge T T, Xue Y J, Jiang X Y, et al. Sources and radiocarbon ages of organic carbon in different grain size fractions of Yellow River-transported particles and coastal sediments[J]. *Chemical Geology*, 2020, 534: 119452.
- [73] Hu B Q, Li J, Bi N S, et al. Effect of human-controlled hydrological regime on the source, transport, and flux of particulate organic carbon from the lower Huanghe (Yellow River)[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(8): 1029-1042.
- [74] Tao S Q, Eglinton T I, Montluçon D B, et al. Pre-aged soil organic carbon as a major component of the Yellow River suspended load: regional significance and global relevance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 414: 77-86.
- [75] Tao S Q, Eglinton T I, Zhang L, et al. Temporal variability in composition and fluxes of Yellow River particulate organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63(S1): S119-S141.
- [76] Wang S J, Yan Y X, Li Y K. Spatial and temporal variations of suspended sediment deposition in the alluvial reach of the upper Yellow River from 1952 to 2007[J]. *Catena*, 2012, 92: 30-37.
- [77] Xue Y J, Zou L, Ge T T, et al. Mobilization and export of millennial-aged organic carbon by the Yellow River[J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(S1): S95-S111.
- [78] Yu M, Eglinton T I, Haghipour N, et al. Molecular isotopic insights into hydrodynamic controls on fluvial suspended particulate organic matter transport[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 262: 78-91.
- [79] Ke Y T, Calmels D, Bouchez J, et al. Channel cross-section heterogeneity of particulate organic carbon transport in the Huanghe[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2023, 12(1): 347-365.
- [80] Lu T A, Wang H J, Hu L M, et al. Dynamic transport of particulate organic carbon in the Yellow River during dam-orientated Water-Sediment Regulation[J]. *Marine Geology*, 2023, 460: 107054.
- [81] Wang Z H, Bai Y, He X Q, et al. Assessing the effect of strong wind events on the transport of particulate organic carbon in the Changjiang River estuary over the last 40 years[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 288: 113477.
- [82] Wei X G, Yi W X, Shen C D, et al. ^{14}C as a tool for evaluating riverine POC sources and erosion of the Zhujiang (Pearl River) drainage basin, South China[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, 268(7-8): 1094-1097.
- [83] Wei X G, Shen C D, Li N L, et al. Apparent ages of suspended sediment and soil erosion of the Pearl River (Zhujiang) drainage basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1547-1553.
- [84] Guo W, Ye F, Xu S D, et al. Seasonal variation in sources and processing of particulate organic carbon in the Pearl River estuary, South China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 167: 540-548.
- [85] Liu D, Bai Y, He X Q, et al. Changes in riverine organic carbon input to the ocean from mainland China over the past 60 years[J]. *Environment International*, 2020, 134: 105258.
- [86] He B Y, Dai M H, Zhai W D, et al. Distribution, degradation and dynamics of dissolved organic carbon and its major compound classes in the Pearl River estuary, China[J]. *Marine Chemistry*, 2010, 119(1-4):

- 52-64.
- [87] Hilton R G, Galy A, Hovius N, et al. The isotopic composition of particulate organic carbon in mountain rivers of Taiwan[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(11): 3164-3181.
- [88] Bao H Y, Lee T Y, Huang J C, et al. Importance of Oceanian small mountainous rivers (SMRs) in global land-to-ocean output of lignin and modern biospheric carbon[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 16217.
- [89] Wu Y, Bao H Y, Unger D, et al. Biogeochemical behavior of organic carbon in a small tropical river and estuary, Hainan, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 57: 32-43.
- [90] Pradhan U K, Wu Y, Wang X N, et al. Signals of typhoon induced hydrologic alteration in particulate organic matter from largest tropical river system of Hainan Island, South China Sea[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 553-566.
- [91] Galy V V, Eglinton T I. Protracted storage of biospheric carbon in the Ganges-Brahmaputra basin[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(12): 843-847.
- [92] Keller P S, Marcé R, Obrador B, et al. Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of drawdown areas[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(6): 402-408.
- [93] Maavara T, Lauerwald R, Regnier P, et al. Global perturbation of organic carbon cycling by river damming[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15347.
- [94] Schädel C, Schuur E A G, Bracho R, et al. Circumpolar assessment of permafrost C quality and its vulnerability over time using long-term incubation data[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 641-652.
- [95] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776-779.
- [96] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [97] 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.
- [98] Scavia D, Field J C, Boesch D F, et al. Climate change impacts on U. S. coastal and marine ecosystems[J]. *Estuaries*, 2002, 25(2): 149-164.