

DOI: 10.20103/j.stxb.202309111948

张爽,高启晨,张戎,宋晨琿,栗忠飞.气候变化背景下湖泊有机碳组分对温度和降水格局改变的响应.生态学报,2024,44(10):4117-4128.

Zhang S, Gao Q C, Zhang R, Song C H, Li Z F. Response of organic carbon components in lakes to change patterns of temperature and precipitation under the background of climate change. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4117-4128.

气候变化背景下湖泊有机碳组分对温度和降水格局改变的响应

张 爽¹, 高启晨², 张 戎², 宋晨琿¹, 栗忠飞^{1,*}

¹ 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224

² 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102200

摘要: 湖泊湿地是地球上缓解全球变暖的巨大碳汇系统。在气候变化背景下, 随着温度、降水等格局的改变, 其碳汇功能存在高度的响应过程。基于 135 篇文献已发表的 557 项观测数据, 运用 meta 分析的方法, 分析全球尺度上气候及地理因素的相互作用对湖泊有机碳组分的影响, 包括湖泊沉积物有机碳 (Sediment Organic Carbon)、湖水中总有机碳 (Total Organic Carbon)、湖水溶解有机碳 (Dissolved Organic Carbon) 和颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon)。结果显示: 1) 在纬度 3°49'N—76°24'N 和海拔 0—4500m 范围内, SOC、TOC、POC 和 DOC 的变化范围分别为 0.25—15.6 g C/Kg、1.9—25.11 mg C/L、0.026—24 mg C/L、1—115.4 mg C/L; 2) 地理因素中, 海拔与 TOC 呈显著的负相关 ($P < 0.05$), 每升高 1m, TOC 增加 0.0077 mg/L; 纬度与 POC 呈显著负相关, 与 DOC 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 每增加 1°, POC 减少 0.136 mg/L, DOC 增加 1.18 mg/L; 3) 气候因素中, 年均温与 SOC 和 POC 呈显著的正相关, 与 DOC 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 每升高 1°C, SOC 和 POC 增加 0.079 g/kg、0.36 mg/L, DOC 下降 1.52 mg/L; 年均降水量与 POC 呈显著正相关, 与 DOC 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 每增加 100mm, POC 增加 0.87 mg/L, DOC 减少 3 mg/L; 4) 气候和地理因素对 SOC、TOC、POC、DOC 综合影响的贡献度分别达到 16.1%、14%、90%、61.6%; 5) 最热季度的降水对 SOC 的影响成正相关, 其他季节性气候参数对湖水中 TOC 和 SOC 均无显著性影响; 最冷季的降水因素是影响 POC 的主要因素, 最潮湿月份、最潮湿季节的降水量和最冷季度的平均温度与 POC 呈显著正相关关系; 最干燥月份、最干旱地区、最热季度和最冷季度的降水量对 DOC 的影响最显著。

关键词: 湖泊; 有机碳; 温度与降水; 海拔与纬度; Meta 分析

Response of organic carbon components in lakes to change patterns of temperature and precipitation under the background of climate change

ZHANG Shuang¹, GAO Qichen², ZHANG Rong², SONG Chenhui¹, LI Zhongfei^{1,*}

¹ College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

² China Petroleum Safety and Environmental Protection Technology Research Institute Co., LTD, Beijing 102200, China

Abstract: Lake wetlands are a huge carbon sink system for mitigating global warming, and there is a highly responsive process of their carbon sink function with the alteration patterns of temperature and precipitation in the context of climate change. In this study, based on 557 observations published in 135 papers, we used meta-analysis to analyse the effects of climate and geographic factor interactions on the organic carbon fractions of lakes on global scale, including Sediment Organic Carbon (SOC), Total Organic Carbon (TOC), Dissolved Organic Carbon (DOC), and Particulate Organic Carbon (POC) in lake water. The results showed that: 1) The ranges of SOC, TOC, POC and DOC over the latitude and

基金项目: 云南省一流学科建设项目 (云教发[2022]73 号); 国家长江生态环境保护修复联合研究 (二期) 项目 (2022-LHYG-02-0510-04)

收稿日期: 2023-09-11; **网络出版日期:** 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhongfei2016@163.com

altitude range of 3°49'N—76°24'N, 0—4500 m were 0.25—15.6 g C/Kg, 1.9—25.11 mg C/L, 0.026—24 mg C/L, 1—115.4 mg C/L; (2) Among the geographical factors, the altitude was negative correlation with TOC ($P<0.05$), and for every 1 m increase, TOC increased by 0.0077 mg/L; The latitude was negative correlation with POC and positive correlation with DOC ($P<0.05$), and for every 1° increase, POC decreased by 0.136 mg/L, DOC increased by 1.18 mg/L; (3) Among the climatic factors, the annual mean temperature was positive correlation with SOC and POC, with DOC was positive correlation ($P<0.05$), for every 1° increase, the SOC and POC increased by 0.079 g/kg and 0.36 mg/L, DOC decreased by 1.52 mg/L; Annual mean precipitation was positive correlation with POC and negative correlation with DOC ($P<0.05$), and for every 100 mm increase, POC increased by 0.87 mg/L and DOC decreased by 3 mg/L; (4) The contributions of climatic and geographic factors to the combined effects of SOC, TOC, POC, and DOC reached 16.1%, 14%, 90%, and 61.6%; (5) Precipitation in the hottest season had a positive correlation with SOC, and all climatic parameters had no significant effect on TOC and SOC in lake water; The precipitation factor in the coldest season was the main driver of POC changes, precipitation in the wettest month and wettest season, average temperature in the coldest season were positively correlated with POC; and precipitation in the driest month, the driest area, the hottest season and the coldest season had the most significant effect on DOC.

Key Words: lake; organic carbon; temperature and precipitation; altitude and latitude; Meta-analysis

当前,全球气候变化已经在各个时空尺度上广泛发生^[1-2],随之而来的是在不同时空尺度上的温度和降水格局的改变^[3-4]。据 IPCC(2023)报道,2011—2020 年间全球平均温度比 1850—1900 年提高了 1.09 °C,到 2030 年,全球温度升高将超过 1.5 °C,且升温也将难以控制在 2 °C 以内。相比于温度的变化,降水格局的时空变异更为复杂,不同地区^[5-6]、不同纬度^[7-8]、以及不同尺度上降水格局的年内、年际变化^[9-10]均呈现出了显著的变异特征。

气候变化背景下,随着纬度和海拔梯度的改变,温度及降水格局的变化将会显得更加复杂^[8-11]。对年平均气温的分析表明,在 20 世纪中叶以来全球变暖背景下,全球高海拔地区的变暖幅度变大^[12]。在纬度梯度上,变暖的趋势从低纬度向高纬度增强^[13]。北极沿海地区出现强烈增温,北半球中纬度地区出现中度增温,而热带和南半球的增温相对较小^[14-15]。降水变化方面,研究显示,高海拔地区降水显著增加,强降水事件发生率增加 2%—4%^[16],中高纬度区域,降水量也呈显著增长趋势^[17-18]。

全球湿地面积约占陆地面积的 6%—8%^[19-20],其有机碳总储量占到陆地生态系统碳储量的 12%—24%^[21-22]。湿地生态系统中,不同湿地类型的碳汇功能及其对气候变化的响应特征具有显著差异^[23-24]。湖泊具有水体封闭、静态,生产、沉积过程活跃,分解缓慢等特征,在碳汇功能上占据重要地位^[24-25],其总面积低于全球湿地总面积的 1/5(南极洲冰川和格陵兰除外),却储存了约 23—120 Pg 的碳^[26-27]。

湖泊中,表层湖水的溶解有机碳(DOC, Dissolved Organic Carbon)和颗粒有机碳(POC, Particulate Organic Carbon),以及沉积物有机碳(SOC, Sediment Organic Carbon)是其有机碳库的关键组成部分^[28-29]。其中,DOC 中未能够通过孔径在 0.22—0.7 μm 之间的过滤器的有机碳部分被定义为 POC。DOC 是最大的生物活性有机库之一,大概占到了水域有机碳总量的 90%^[30]。POC 虽然仅占水体总有机碳的一小部分,却起着人们所熟知的“生物泵”的作用,是区域碳“汇”研究的基础^[31]。研究显示,DOC 和 POC 对气候变化的反应最为敏感^[32]。此外,SOC 也是受到广泛关注和研究的湖泊有机碳部分^[33-34],SOC 的变化研究可以被用作记录环境变化^[35],以及对气候变化的响应机制的重要途径^[36]。

湖泊有机碳组分对温度、降水格局的变化具有高度的敏感性^[37-38]。在全球变暖的背景下,温度和降水格局变化对生物固碳和有机碳分解的效率的影响不同^[39],对湖泊底泥和湖水有机碳的影响也存在差异。例如,在中国裂谷湖和太湖等的研究中显示,底泥中和湖水有机碳组分与温度呈显著正相关关系^[40-42],但也有研究显示高温使得有机物在水中的溶解度增加,初级产量降低,导致底泥和湖水有机碳组分浓度降低^[43-44],

还有研究表明湖泊有机碳组分与温度的相关性不显著^[45]。另外,降水格局的变化也会对湖泊底泥和湖水有机碳组分产生影响。例如,前人对不同区域湖泊底泥和湖水有机碳的研究结果显示,降水量增加会增加底泥和湖水有机碳组分^[28,46–47],但降水量增加也会稀释水体中有机物溶度,降低有机碳组分浓度^[30,48];也研究表明降水格局的变化对底泥和湖水有机碳组分无显著影响^[45,49]。尽管全球变暖和年平均降水增加,但其变化的方向和强度存在区域差异^[16,45],从而对湖泊有机碳的含量产生不同的影响。全球范围内,湖泊有机碳对全球变暖和降水格局的最终响应规律具有不确定性,本文对全球湖泊有机碳对气候变化的响应进行了综合的评估,以此来探索气候变化背景下湖泊有机碳的响应规律。

纬度和海拔梯度的变化,对水、热条件形成再分配^[50],基于此,许多学者开展湖泊有机碳组分的响应机制、变化规律等相关研究^[51–52],然而当前相关研究的结果却并不一致,随海拔的升高,湖泊底泥和湖水有机碳组分含量增加^[41,53]、减少^[11],或无显著规律变化^[47,52]的研究均有报道。此外,在纬度梯度上的相关研究结果也各不相同,有研究认为随着纬度的升高湖泊底泥和湖水有机碳增加^[54],同样有显示减少^[47]、无规律变化^[51–52]等。尽管近年来对不同纬度和海拔的湖泊有机碳组分的研究越来越多^[41,52],目前尚不明确纬度和海拔梯度上的全球湖泊有机碳组分的变化规律。此外,考虑到气候变暖随着海拔和纬度的升高而加剧^[12–13],且湖泊有机碳对气候变化具有高度敏感性,湖泊有机碳组分对气候变化的响应具有很大的不确定性,没有取得一致的结论。

为了进一步明确气候变化背景下温度、降水格局的改变,对湖泊有机碳变化的影响程度及其响应规律,本文选取全球尺度上的 557 对数据资源,运用 Meta 分析方法,量化厘定如下问题:1) 在全球范围内,湖泊有机碳组分的关键驱动因素? 2) 定量解释地理因素(纬度和海拔)和气候因素(温度和降水)对其变化的影响程度? 3) 全球湖泊有机碳对主要季节性气候参数的响应规律? 研究将为湖泊有机碳组分对气候及地理因素变化的响应规律提供更为可靠的信息。

1 材料与方法

1.1 文献选取和数据库建立

文献主要来源于多种中英文期刊数据库[包括 Web of science、National Knowledge Infrastructure (CNKI)]和书籍,在数据库中搜索来自 2022 年前发表的文献,文献的研究领域集中在不同时间、各种因素下湖泊有机碳组分的变化规律。英文数据库中以“lake wetland、lake water、Total organic carbon (TOC)、Sediment organic carbon (SOC)、Dissolved organic carbon (DOC)、Particulate organic carbon (POC)、precipitation、rainfall、temperature、latitude、altitude”为搜索关键词;中文数据库中以“湖泊、湖水、总有机碳、沉积物有机碳、溶解有机碳、颗粒有机碳、降水、温度、纬度、海拔”为搜索关键词。

文献选取标准为:1) 研究对象属于全球各尺度上的湖泊范畴;2) 研究必须面向湖泊有机碳;3) 报道的数据中必须包括沉积物有机碳、总有机碳、溶解有机碳、颗粒有机碳其中的 1 项或多项;4) 有机碳采样数据必为湖泊表层水体和湖泊底泥,且湖泊底泥采样深度 ≥ 50 cm;5) 文章中有机碳的影响因子包含年均温、年均降雨量、海拔、经纬度。首次筛选基于文章标题,二次筛选基于摘要,然后对通过筛选标准的文献、报告和论文进行全文审查。

最终选择 135 篇相关文献,收集 557 项数据资源(图 1),数据结果从文献的图表、表格和文本中提取,根据需要进行单位转换。图表中包含的结果使用 GetData graph digitizer 生成,数据指标包括纬度、经度、海拔、年平均降水量(MAP)、年平均温度(MAT)、SOC、TOC、POC、DOC。如果出版物中没有提供气象数据,则从 WorldClim 第二版(<https://www.WorldClim.org/>)中获得,其中包括 1970 年至 2000 年的年平均温度、年平均降水量和海拔。数据集分布范围为 3°49'N—76°24'N、153°51'W—140°21'E,海拔 0—4500 m,其降水量和温度范围分别为 73—2989 mm 和 -23.53—26℃(表 1),观测结果覆盖了全球大部分地区。考虑到有机碳组分也受到季节性气候参数的影响,因此本研究也引入了一些其他的季节性气候参数(表 2)。

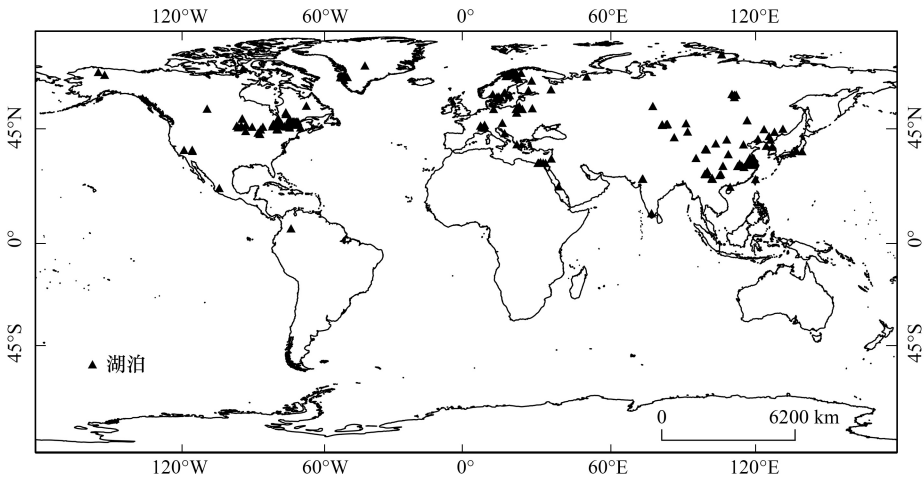


图 1 研究数据点位的全球分布图
Fig.1 Global distribution of study sites

表 1 有机碳组分含量和主要参数范围

Table 1 Organic carbon component content ranges and climatic parameters

指标 Index	取值范围 Values realm				
	含量 Content	纬度 Latitude/(°)	海拔 Altitude/m	年降水 MAP/mm	年均温 MAT/℃
SOC	0.25—15.6	3.83—58.88	0—4500	73—2665	−11.64—26
TOC	1.9—25.11	26.63—68.69	7—4008	130—1310	−3.8—19.94
POC	0.026—24	3.83—59.90	0—3194	119—2989	−5.94—26
DOC	1—115.4	20.68—76.39	5—3194	195—1527	−23.53—28.8

SOC:沉积物有机碳 Sediment Organic Carbon; TOC:总有机碳 Total Organic Carbon; POC:颗粒有机碳 Particulate Organic Carbon; DOC:溶解有机碳 Dissolved Organic Carbon; MAP:年降水量 Annual mean precipitation; MAT:年均温 Annual mean temperature

表 2 研究中使用的气候参数

Table 2 Climatic parameters used in the present work

缩写 Abbreviation	气候参数 Climatic parameters
MAT	年平均气温 Annual mean temperature
MAP	年平均降水量 Annual mean precipitation
$T_{\max}$	最热月份的最高温度 Max temperature of the warmest month
$T_{\min}$	最冷月份的最低温度 Min temperature of the coldest month
Bio8	最潮湿季度的平均温度 Mean temperature of the wettest quarter
Bio9	最干燥季度的平均温度 Mean temperature of the driest quarter
Bio10	最热季度的平均温度 Mean temperature of the warmest quarter
Bio11	最冷季度的平均温度 Mean temperature of the coldest quarter
Bio13	最潮湿月份的降水量 Precipitation of the wettest quarter
Bio14	最干燥月份的降水量 Precipitation of the driest month
Bio16	最潮湿季度的降水量 Precipitation of the wettest quarter
Bio17	最干旱地区的降水量 Precipitation of the driest quarter
Bio18	最热季度的降水量 Precipitation of the warmest quarter
Bio19	最冷季度的降水量 Precipitation of the coldest quarter

1.2 数据处理与分析

统计分析之前,使用 Kolmogorov-Smirnov 检验对数据的正态性进行了检验。除纬度和温度,其他所有数

据均进行自然对数(ln)的转换,以减少异方差。本文利用 IBM SPSS Amos 绘制了湖泊有机碳组分(SOC、TOC、POC 和 DOC)受主要地理(如海拔、纬度)和气候因素(如 MAP、MAT、 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$)影响的结构方程模型图;建立多元线性回归方程,量化了湖泊有机碳组分随气候因素和地理因素的变化规律;采用 Pearson 相关系数评估季节性气候参数(如最热月份的最高温度、最冷月份的最低温度等)与湖泊有机碳组分之间的相关性。使用了显著性水平的 $P<0.05$ 。所有统计分析均使用 IBM SPSS Statistics 25.0 和 Origin 2022 完成。

2 结果与分析

2.1 湖泊有机碳组分分布范围

图 2 显示了全球湖泊有机碳组分的数值分布范围。其 SOC、TOC、POC、DOC 的平均含量分别为 (3.01 ± 0.7) gC/Kg、 (7.7 ± 0.51) mg C/L、 (2.04 ± 0.15) mg C/L、 (15.8 ± 1.67) mg C/L。其中,DOC 和 TOC 显著高于 POC 和 SOC($P<0.05$),DOC 也显著高于 TOC($P<0.05$)之间存在显著差异,而 POC 与 SOC 无显著差异($P>0.05$)。

2.2 关键气候和地理因素对湖泊有机碳组分的影响

2.2.1 结构方程拟合效果

表 3 显示了气候及地理因素对湖泊有机碳组分含量影响的结构方程模型(SEM)拟合效果,其中, χ^2/df 均小于 3,CFI 和 NFI 均达到 0.9 以上。表明模型适配良好,能够准确表征自变量和因变量的关系。

表 3 结构方程模型的拟合度

Table 3 Fitting degrees of structural equation modeling

指标 Index	拟合参数 Fitting Parameter				
	χ^2	df	χ^2/df	CFI	NFI
SOC	7.871	4	1.968	0.988	0.978
TOC	5.417	2	2.735	0.990	0.985
POC	2.807	2	1.403	0.997	0.992
DOC	9.316	4	2.329	0.994	0.989

CFI:比较拟合指数 Comparative fit index;NFI:规范拟合指数 Normed fit index

2.2.2 湖泊有机碳组分的主导影响因素

图 3 显示了基于 SEM 分析的气候和地理因素对湖泊有机碳组分的影响程度。所选择的 6 个气候地理因素对 SOC 的综合贡献度为 16.1%,其中,仅有 MAT 对 SOC 产生显著影响,影响系数为 0.885,呈正相关作用。各因素对 TOC 的综合贡献度为 14%,其中,仅有海拔对 TOC 产生显著影响,影响系数为-0.369,呈负相关作用。各因素对 POC 的影响贡献度达到了 90%;气候因素中,MAT、MAP、 $T_{\min}$ 对 POC 具有显著的正向影响($P<0.05$),其贡献度分别为 0.216、0.256、0.287;地理因素中,纬度对其有显著的负向影响($P<0.05$),贡献度达到-0.422,而海拔无显著影响。各因素对 DOC 的影响贡献度达到了 61.6%;气候因素中,MAT、MAP、 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 对 DOC 具有显著的负向影响($P<0.05$),其贡献度分别为-0.756、-0.545、-0.382、-0.172;地理因素中,纬度对其有显著的正向影响($P<0.05$),贡献度达到 0.646,而海拔无显著影响。

2.3 湖泊有机碳组分随关键气候及地理因素的变化规律

表 4 定量化显示了基于多项式回归方程的有机碳组分含量随关键气候和地理因素的变化规律。其中,地理因素中,回归方程可估算出海拔每升高 1 m,TOC 的变化率为 0.77%;从低纬度地区到高纬度地区,每增加 1°,POC 减少 0.136 mg/L,DOC 增加 1.18 mg/L。

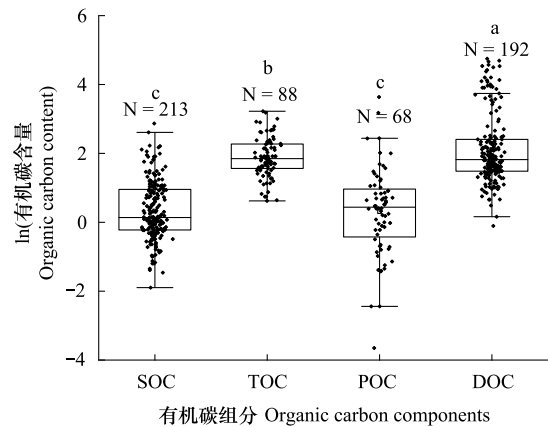


图 2 全球湖泊有机碳组分含量分布图

Fig.2 Global of organic carbon content in lakes

箱线图上的小写字母表示 $P<0.05$ 的显著性差异,N 为观察值的个数;SOC:沉积物有机碳;TOC:总有机碳;POC:颗粒有机碳;DOC:溶解有机碳

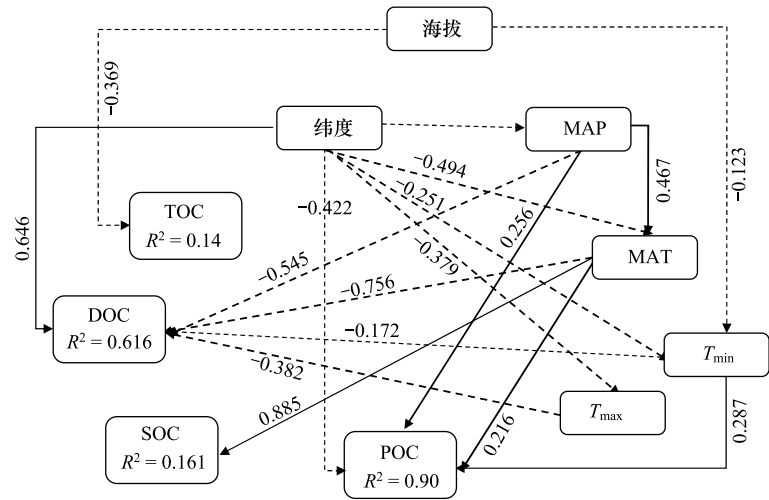


图3 全球湖泊有机碳组分含量影响因素的结构方程模型

Fig.3 Structural equation models of different influencing factors of organic carbon content in Global lakes

黑色实线箭头表示显著正相关,而黑色虚线箭头表示显著负相关,线条粗细代表相关性强弱,其中显著性水平设置为 $P=0.05$;箭头旁边的数字是归一化因子;MAP:年降水量;MAT:年均温; $T_{\min}$:最冷月的最低温; $T_{\max}$:最热月的最高温

气候因素中,由回归方程可估算出 MAT 每升高 1°C ,SOC 将增加 0.079 mg/L ,POC 增加 0.36 mg/L ,减少 1.52 mg/L 的 DOC;MAP 每增加 100 mm ,POC 增加 0.87 mg/L ,减少 3 mg/L 的 DOC; $T_{\max}$ 每升高 1°C ,DOC 减少 1.51 mg/L ; $T_{\min}$ 每升高 1°C ,增加 0.3 mg/L 的 POC,减少 0.63 mg/L 的 DOC。

表4 关键气候及地理因素与全球湖泊有机碳组分的多元线性分析方程

Table 4 Multivariate linear analysis equation of environmental factors and organic carbon components in Global lakes

指标 Index	纬度 Latitude	海拔 Altitude	年均温 MAT	年降水量 MAP	最热月的最高温 $T_{\max}$	最冷月的最低温 $T_{\min}$
SOC	$y = -0.05x + 4$ $R^2 = 0.096$, $P > 0.05$	$y = 0.0002x + 1.89$ $R^2 = 0.0064$, $P > 0.05$	$y = 0.079x + 2.14$ $R^2 = 0.082$, $P = 0.032^*$	$y = -0.0001x + 2.19$ $R^2 = 0.0006$, $P > 0.05$	$y = 0.032x + 1.99$ $R^2 = 0.0123$, $P > 0.05$	$y = 0.035x + 2.99$ $R^2 = 0.0319$, $P > 0.05$
TOC	$y = -0.13x + 15.37$ $R^2 = 0.06$, $P > 0.05$	$y = -0.0077x + 10.6$ $R^2 = 0.114$, $P = 0.042^*$	$y = 0.11x + 7.11$ $R^2 = 0.0134$, $P > 0.05$	$y = 0.0005x + 78.07$ $R^2 = 0.0006$, $P > 0.05$	$y = 0.12x + 5.97$ $R^2 = 0.012$, $P > 0.05$	$y = 0.24x + 10.72$ $R^2 = 0.059$, $P > 0.05$
POC	$y = -0.136x + 9.34$ $R^2 = 0.1032$, $P = 0.027^*$	$y = 0.0007x + 2.95$ $R^2 = 0.0058$, $P > 0.05$	$y = 0.36x + 0.47$ $R^2 = 0.129$, $P = 0.00^{**}$	$y = 0.0087x - 2.81$ $R^2 = 0.397$, $P = 0.00^{**}$	$y = 0.36x + 0.47$ $R^2 = 0.1294$, $P > 0.05$	$y = 0.30x + 5.73$ $R^2 = 0.1898$, $P = 0.002^{**}$
DOC	$y = 1.18x - 48.9$ $R^2 = 0.27$, $P = 0.00^{**}$	$y = -0.0008x + 19.4$ $R^2 = 0.017$, $P > 0.05$	$y = -1.52x + 17.42$ $R^2 = 0.2$, $P = 0.00^{**}$	$y = -0.03x + 37.56$ $R^2 = 0.29$, $P = 0.00^{**}$	$y = -1.51x + 47.5$ $R^2 = 0.125$, $P = 0.00^{**}$	$y = -0.63x + 6.26$ $R^2 = 0.0415$, $P = 0.00^{**}$

* 表示通过了 0.05 的显著性检验; ** 表示通过了 0.01 的显著性检验。

2.4 季节性气候参数对湖泊有机碳组分的影响

图4显示了各季节性气候参数与湖泊有机碳组分的相关性。各季节性气候参数与有机碳组分的相关性存在显著差异。除了 Bio18 最热季度的降水对 SOC 的影响成正相关($r=0.26, P<0.05$)以外,其他季节性气候参数对 SOC 均无显著影响($P>0.05$)。

对湖水中有有机碳组分的相关系数图显示,所有季节性气候参数对 TOC 均无显著性影响($P>0.05$)。POC 与 Bio9 最干燥季度的平均温度、Bio11 最冷季度的平均温度、Bio13 最潮湿月份的降水量、Bio16 最潮湿季度的降水量、Bio17 最干旱地区的降水量、Bio19 最冷季度的降水量均呈显著正相关关系($P<0.05$),其中 Bio19($r=0.67$)为主要驱动因素,Bio13($r=0.48$)、Bio16($r=0.47$)和 Bio11($r=0.46$)对 POC 的影响显著高于 Bio9($r=$

0.38) 和 Bio17($r = 0.33$)。

所有季节性气候参数均与 DOC 呈显著负相关关系($P < 0.05$), 其中影响范围大小排序为: Bio19 最冷季度的降水($r = -0.44$)、Bio14 最干燥月份的降水($r = -0.43$)、Bio17 最干旱地区的降水($r = -0.43$)、Bio18 最热季度的降水量($r = -0.41$)、Bio16 最潮湿季度的降水量($r = -0.39$)、Bio13 最潮湿月份的降水量($r = -0.36$)、Bio10 最热季度的平均温度($r = -0.33$)、Bio9 最干燥季度的平均温度($r = -0.33$)、Bio8 最潮湿季度的平均温度($r = -0.32$)、Bio11 最冷季度的平均温度($r = -0.26$)。

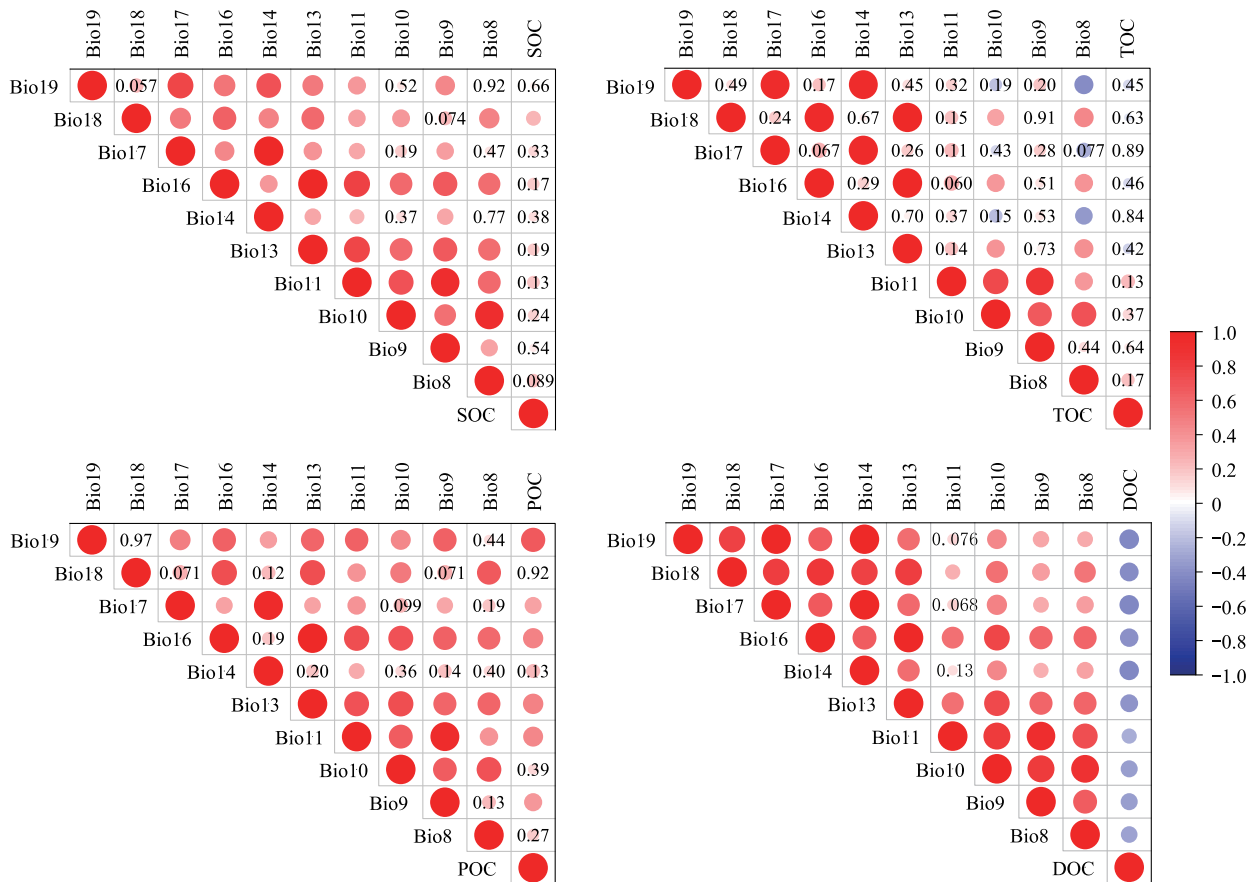


图 4 全球湖泊有机碳组分与季节性气候参数的相关系数图

Fig.4 Correlation coefficient plot of organic carbon components in Global lakes and Seasonal climatic parameters

图中上三角方格填充颜色的越深表示 Spearman 相关系数的绝对值越大, 红色表示正相关($P < 0.05$), 蓝色表示负相关($P > 0.05$); SOC: 沉积物有机碳 Sediment organic carbon; TOC: 总有机碳 Total organic carbon; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; DOC: 溶解有机碳 Dissolved organic carbon; Bio8: 最潮湿季度的平均温度 Mean temperature of the wettest quarter; Bio9: 最干燥季度的平均温度 Mean temperature of the driest quarter; Bio10: 最热季度的平均温度 Mean temperature of the warmest quarter; Bio11: 最冷季度的平均温度 Mean temperature of the coldest quarter; Bio13: 最潮湿月份的降水量 Precipitation of the wettest quarter; Bio14: 最干燥月份的降水量 Precipitation of the driest month; Bio16: 最潮湿季度的降水量 Precipitation of the wettest quarter; Bio17: 最干旱地区的降水量 Precipitation of the driest quarter; Bio18: 最热季度的降水量 Precipitation of the warmest quarter; Bio19: 最冷季度的降水量 Precipitation of the coldest quarter

3 讨论

研究显示, 多种因素与湖泊 SOC、TOC、POC、DOC 浓度有关, 诸如气候、地理因素、形态特征等^[55-56], 在这些因素的交互作用下, 湖泊有机碳的变化是复杂的, 局地范围内小尺度上的研究很难揭示其变化规律及响应特征, 唯有从区域乃至全球大尺度上综合分析探讨, 才能逐步探究其真正的科学规律。

3.1 地理因素对全球湖泊有机碳组分的影响

地理因素中,纬度和海拔是其中的关键因素,其自身的变化会传导到温度、降水等要素上,从而影响湖泊有机碳的输入^[57],此外,还会对湖泊底泥的沉积与运动过程产生影响,进而影响底泥有机碳含量^[58]。然而,本研究的结果显示,SOC 与纬度和海拔因素相关性不强(图 3),其他学者也有相同研究结果,如英国湖泊沉积物有机碳与海拔无相关性^[59],Sobek 等人^[30]发现北极湖泊 SOC 沉积效率与其他气候带湖泊相似。由此可见,纬度和海拔对 SOC 的影响,可能更多的是间接的而非是直接的,亦或需要长期的监测研究分析。

一般而言,纬度和海拔的增加,会导致温度的下降,进而会抑制 TOC 的分解,由此促进 TOC 的含量。本研究中,TOC 浓度与海拔呈显著负相关,与纬度的相关性不显著(图 3)。其中可能的关键原因是,人类活动对 TOC 产生显著影响,高海拔的湖泊受人类活动的影响小,外界营养输入少,碱度变化稳定,其 TOC 浓度显著偏低^[60]。

海拔和纬度与气候因子的密切关系,已经使其成为探讨 DOC 和 POC 的重要因子。本研究中,海拔对 DOC 和 POC 的影响较弱,而纬度对 POC 有显著的负向作用,对 DOC 有显著的正向作用(图 3)。Pastor 等人^[61]的研究也有类似发现。高纬度(低温)湖泊,DOC 浓度的变化高度依赖于外部环境的输入^[62],而 POC 可能更加依赖于湖泊内部的碳循环^[63],全球变暖背景下高纬度地区温度升高幅度更大的特征,可能通过冰川溶解为湖泊输送了更多的营养物质^[13],进而促进了高纬度地区湖泊的 DOC 含量。

3.2 气候因素对湖泊有机碳组分的影响

气候既影响陆地土壤有机碳的形成,也影响湖泊的水文过程,因此在湖泊有机碳组分的调节中起着重要作用^[64]。湖泊有机碳组分对温度、降水格局的变化也具有高度的敏感性^[37-38]。

本研究显示,SOC 与年均温存在显著的正相关性(图 3),这与 Kangabam^[33]和 Hugelius^[65]等人的研究结果一致,尽管这些湖泊的植被覆盖程度和地形等均不同,表明温度可能是湖泊 SOC 的决定因素。较高的温度有助于在湖泊中产生更多的生物量^[66],温度也会通过影响有机质的矿化和分解影响有机碳积累^[67]。此外,SOC 对降水格局的变化未表现出显著的响应特征(图 3),这与 Yoo^[34]等研究结果一致,其在探讨内陆湖泊 SOC 的决定因素的研究中,显示年均降水量与 SOC 无相关性。另外在季节性气候参数中只有最热季度的降水对 SOC 有一定的影响,这在一定程度上还是突出了温度的叠加影响。

本研究显示,全球尺度上 TOC 浓度与年均温和年降水量的相关性均不显著(图 3),Moreira^[68]等人也有类似的研究结果。TOC 可能受到了温度变化的双向调节,可能存在复杂的影响过程^[69-70]。高温一方面会提升湖泊植被的生产力,但同时也会导致有机碳的高分解率^[58]。TOC 与年均降水无显著相关关系^[45],其原因可能是 TOC 本身的年际变化不显著,TOC 一旦进入湖泊,可能留在水中,也可能通过生物、物理和化学过程以沉积物的形式从湖水转移到湖底,因此湖水在湖盆里的停留时间可能对其有更为显著的影响^[45, 71]。

DOC 是湖泊有机碳的重要组成部分,大概占到了水域有机碳总量的 90%^[64]。温度对 DOC 浓度会产生正向促进作用^[72-73],湖泊的微生物活动是 DOC 的主要贡献来源^[74],较高的水温会增强微生物活性。然而有研究显示,全球大多数湖泊 DOC 与初级生产力呈负相关关系^[75],本研究结果与此一致(图 3)。表明微生物的分解作用超出了其本身增量带来的有机碳量。

本研究中,年均降水量与 DOC 呈显著的负相关(图 3)。Sobek^[30]等对 7500 个广泛分布的湖泊进行分析,也显示了同样的结果。从全球尺度来说,降水量增加对 DOC 的稀释效应起到了关键作用。此外,季节性的降水和温度增加,抑制了湖泊 DOC 的积累。例如,本研究中所有季节性的气候参数均与 DOC 呈显著的负相关关系(图 4),而其他研究显示,雨季湖泊 DOC 浓度比旱季高^[76],相关问题仍需进一步深入研究。

湖水中 POC 与 DOC 相互影响,POC 可以被降解而形成 DOC;DOC 可以通过絮凝作用形成 POC^[77]。本研究显示,年均温和年均降水量与 POC 呈显著的正相关(图 3)。POC 的主要来源途径包括内源的和外源的,且不同地理位置的湖泊,其 POC 的主要来源途径也不同^[31, 78],也就导致了其影响因素不同。在内源为主要来源时,温度升高会促进生产力增强,POC 含量的显著升高^[28]。在外源为主要来源时,水体内部的生学过程无

显著影响,在降水量增多之时,POC 含量会显著升高^[42, 78]。基于本研究的结果,当前全球年降水量的增加和气候变暖将有可能促进全球湖泊 POC 含量的增加。

4 结论

1) 全球尺度上湖泊有机碳组分的影响因素,气候显著高于地理因素;低纬度高海拔地区的湖泊,其有机碳含量与高纬度相似。

2) 全球湖泊 POC 和 DOC 对气候变化的敏感度高于 SOC 和 TOC;此外,海拔对 TOC 起显著负向作用;纬度对湖泊 POC 产生显著负向作用,对 DOC 产生显著正向作用;MAT 对 SOC 起显著负向作用,对 POC 起显著正向作用,对 DOC 起显著负向作用;MAP 对 POC 起显著正向作用,对 DOC 起显著负向作用;气候和地理因素对 SOC、TOC、POC、DOC 综合影响的贡献度分别达到 16.1%、14%、90%、61.6%。

3) 就季节性气候参数的影响来看,最热季度的降水对 SOC 的影响最大;最冷季度的降水为影响 POC 关键因素;DOC 受到最干燥月份的降水、最热季度的降水、最冷季度的降水等季节性降水的影响最为显著。

参考文献 (References):

- [1] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, Guillén Bolaños T, Bindi M, Brown S, Camilloni I A, Diedhiou A, Djalante R, Ebi K, Engelbrecht F, Guiot J, Hijioka Y, Mehrotra S, Hope C W, Payne A J, Pörtner H O, Seneviratne S I, Thomas A, Warren R, Zhou G. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, 2019, 365(6459): eaaw6974.
- [2] Shukla P R, Skea J, Calvo B E, Masson-Delmotte V, Pörtner H O, Roberts D C, Zhai P, R. Slade, Connors S, Diemen R V, Ferrat M, Haughey E, Luz S, Neogi S, Pathak M, Petzold J, Pereira J P, Vyas P, Huntley E, Kissick K, Belkacemi M, Malley J. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 2019.
- [3] Dash S, Maity R. Unfolding unique features of precipitation-temperature scaling across India. *Atmospheric Research*, 2023, 284: 106601.
- [4] Dunn R J H, Willett K M, Parker D E. Changes in statistical distributions of sub-daily surface temperatures and wind speed. *Earth System Dynamics*, 2019, 10(4): 765-788.
- [5] Mobeen M, Ahmed H, Ullah F, Riaz M O, Mustafa I, Khan M R, Hanif M U. Impact of climate change on the precipitation pattern of district Sargodha, Pakistan. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2017, 9(1): 21-35.
- [6] Haag I, Jones P D, Samimi C. Central Asia's changing climate: How temperature and precipitation have changed across time, space, and altitude. *Climate*, 2019, 7(10): 123.
- [7] Thorpe L, Andrews T. The physical drivers of historical and 21st century global precipitation changes. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 064024.
- [8] Zhao K, Wang Y J, Edwards R L, Cheng H, Kong X G, Liu D B, Shao Q F, Cui Y F, Huang C C, Ning Y F, Yang X L. Late Holocene monsoon precipitation changes in southern China and their linkage to Northern Hemisphere temperature. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 232: 106191.
- [9] Huo R, Li L, Chen H, Xu C Y, Chen J, Guo S L. Extreme precipitation changes in Europe from the last millennium to the end of the twenty-first century. *Journal of Climate*, 2021, 34(2): 567-588.
- [10] Nikzad Tehrani E, Sahour H, Booj M J. Trend analysis of hydro-climatic variables in the north of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136(1): 85-97.
- [11] Rummukainen M. Climate change: changing means and changing extremes. *Climatic Change*, 2013, 121(1): 3-13.
- [12] Fan X H, Wang Q X, Wang M B, Jiménez C V. Warming amplification of minimum and maximum temperatures over high-elevation regions across the globe. *PLoS One*, 2015, 10(10): e0140213.
- [13] Xie Y K, Liu Y Z, Huang J P. Overestimated Arctic warming and underestimated Eurasia mid-latitude warming in CMIP5 simulations. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(14): 4475-4487.
- [14] Feng S, Hu Q, Huang W, Ho C H, Li R P, Tang Z H. Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 41-52.
- [15] Overland J, Dunlea E, Box J E, Corell R, Forsius M, Kattsov V, Olseng, M S, Pawlak J, Reiersen L, Wang M. The urgency of Arctic change. *Polar Science*, 2019, 21: 6-13.

- [16] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2011, 47(1): 123-138.
- [17] Jiang D B, Sui Y, Lang X M. Timing and associated climate change of a 2 °C global warming. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(14): 4512-4522.
- [18] Ye W T, Li Y, Feng Z W, Zhang Y X, Peng S M. Long-term latitudinal effects of precipitation change in global monsoon regions. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 944015.
- [19] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583-597.
- [20] Tootchi A, Jost A, Ducharme A. Multi-source global wetland maps combining surface water imagery and groundwater constraints. *Earth System Science Data*, 2019, 11(1): 189-220.
- [21] Nahlik A M, Fennessy M S. Carbon storage in US wetlands. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 13835.
- [22] Tan Z X, Liu S G, Sohl T L, Wu Y P, Young C J. Ecosystem carbon stocks and sequestration potential of federal lands across the conterminous United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(41): 12723-12728.
- [23] Kreplin H N, Santos Ferreira C S, Destouni G, Keesstra S D, Salvati L, Kalantari Z. Arctic wetland system dynamics under climate warming. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 2021, 8(4): e1526.
- [24] Taran M, Ahirwal J, Deb S, Sahoo U K. Variability of carbon stored in inland freshwater wetland in Northeast India. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160384.
- [25] Vreča P, Muri G. Sediment organic matter in mountain lakes of north-western Slovenia and its stable isotopic signatures: records of natural and anthropogenic impacts. *Hydrobiologia*, 2010, 648(1): 35-49.
- [26] Kastowski M, Hinderer M, Vecsei A. Long-term carbon burial in European Lakes: Analysis and estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(3): GB3019.
- [27] Wang M, Chen H, Yu Z C, Wu J H, Zhu Q A, Peng C H, Wang Y F, Qin B Q. Carbon accumulation and sequestration of lakes in China during the Holocene. *Global Change Biology*, 2015, 21(12): 4436-4448.
- [28] 叶琳琳, 吴晓东, 闫德智, 刘波. 太湖西北湖区表层水体颗粒态有机碳含量的季节变化及其来源解析. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1323-1329.
- [29] Ran F W, Nie X D, Li Z W, Xiao L H, Sun Y Z, Wang S L, Liao W F, Tong D, Li Z T, Peng Y J. Chronological records of sediment organic carbon at an entrance of Dongting Lake: Response to historical meteorological events. *Science of the Total Environment*, 2021, 794: 148801.
- [30] Sobek S, Tranvik L J, Prairie Y T, Kortelainen P, Cole J J. Patterns and regulation of dissolved organic carbon: An analysis of 7, 500 widely distributed lakes. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(3): 1208-1219.
- [31] 张金流, 鲍祥, 汪文强, 马翔, 王学文. 巢湖水体颗粒和溶解有机碳浓度的时空动态变化及其来源初探. *世界科技研究与发展*, 2016, 38(2): 306-311, 335.
- [32] Bergström A K, Karlsson J. Light and nutrient control phytoplankton biomass responses to global change in northern lakes. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 2021-2029.
- [33] Kangabam R, Kanagaraj S, Munisamy G. Assessment of carbon sequestration potential of loktak lake in manipur-a biodiversity hotspot. *International Journal of Conservation Science*, 2016, 7(4): 1145-1152.
- [34] Yoo J, Kim J, Kim J, Lim J, Kang H. Soil carbon storage and its economic values of inland wetlands in Korea. *Ecological Engineering*, 2022, 182: 106731.
- [35] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Van Oost K, Montanarella L, Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2013.
- [36] Yang R M. Mechanisms of soil organic carbon storage response to *Spartina alterniflora* invasion and climate change. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 7-15.
- [37] Li Z Q, Xu Z Y, Yang Y J, Stewart R I A, Urrutia-Cordero P, He L, Zhang H, Hansson L A. Heat waves alter macrophyte-derived detrital nutrients release under future climate warming scenarios. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(8): 5272-5281.
- [38] 姚程, 王谦, 姜霞, 郭铁男, 王坤, 吴志皓, 车霏霏, 陈俊伊. 湖泊生态系统碳汇特征及其潜在碳中和价值研究. *生态学报*, 2023, 43(03): 893-909.
- [39] Gonzalez Moguel R, Bass A M, Garnett M H, Pilote M, Keenan B, Matveev A, Douglas P M J. Radiocarbon data reveal contrasting sources for carbon fractions in thermokarst lakes and rivers of eastern Canada (nunavik, Quebec). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(4): e2020JG005938.
- [40] Zhuo Y, Zeng W H, Cui D, Ma B R, Xie Y X, Wang J P. Spatial-temporal variation, sources and driving factors of organic carbon burial in rift

- lakes on Yunnan-Guizhou Plateau since 1850. *Environmental Research*, 2021, 201: 111458.
- [41] Wang K F, Peng C H, Zhu Q A, Wang M, Wang G S, Zhou X L, Yang Y Z, Ding J H, Wei H. Changes in soil organic carbon and microbial carbon storage projected during the 21st century using TRIPLEX-MICROBE. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 80-87.
- [42] 王秀君, 房传苓, 于志同, 王家平, 彭冬梅, 康静静. 新疆博斯腾湖水体颗粒和溶解有机碳的季节变化及其来源初探. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 552-558.
- [43] Brown R E, Nelson S J, Saros J E. Paleolimnological evidence of the consequences of recent increased dissolved organic carbon (DOC) in lakes of the northeastern USA. *Journal of Paleolimnology*, 2017, 57(1): 19-35.
- [44] Read J S, Rose K C. Physical responses of small temperate lakes to variation in dissolved organic carbon concentrations. *Limnology and Oceanography*, 2013, 58(3): 921-931.
- [45] Hessen D O, Gjessing E T, Knulst J, Fjeld E. TOC fluctuations in a humic lake as related to catchment acidification, season and climate. *Biogeochemistry*, 1997, 36(1): 139-151.
- [46] Kokfelt U, Rosén P, Schoning K, Christensen T R, Förster J, Karlsson J, Reuss N, Rundgren M, Callaghan T V, Jonasson C, Hammarlund D. Ecosystem responses to increased precipitation and permafrost decay in subarctic Sweden inferred from peat and lake sediments. *Global Change Biology*, 2009, 15(7): 1652-1663.
- [47] Zhang F J, Yao S C, Xue B, Lu X X, Gui Z F. Organic carbon burial in Chinese Lakes over the past 150 years. *Quaternary International*, 2017, 438: 94-103.
- [48] Zwart J A, Sebestyen S D, Solomon C T, Jones S E. The Influence of Hydrologic Residence Time on lake carbon cycling dynamics following extreme precipitation events. *Ecosystems*, 2017, 20(5): 1000-1014.
- [49] Hughes D, Holliman P, Jones T, Freeman C. Temporal variations in dissolved organic carbon concentrations in upland and lowland lakes in North Wales. *Water and Environment Journal*, 2013, 27(2): 275-283.
- [50] Dodds W K, Bruckerhoff L, Batzer D, Schechner A, Pennock C, Renner E, Tromboni F, Bigham K, Grieger S. The freshwater biome gradient framework: predicting macroscale properties based on latitude, altitude, and precipitation. *Ecosphere*, 2019, 10(7): e02786.
- [51] Kortelainen P, Mattsson T, Finér L, Ahtiainen M, Saukkonen S, Sallantausta T. Controls on the export of C, N, P and Fe from undisturbed boreal catchments, Finland. *Aquatic Sciences*, 2006, 68(4): 453-468.
- [52] Tsozué D, Noubissie N M M, Mamdem E L T, Basga S D, Oyono D L B. Effects of environmental factors and soil properties on soil organic carbon stock in a natural dry tropical area of Cameroon. *Soil*, 2021, 7(2): 677-691.
- [53] Jansson M, Hickler T, Jonsson A, Karlsson J. Links between terrestrial primary production and bacterial production and respiration in lakes in a climate gradient in subarctic Sweden. *Ecosystems*, 2008, 11(3): 367-376.
- [54] Klaus M, Karlsson J, Seekell D. Tree line advance reduces mixing and oxygen concentrations in arctic-alpine lakes through wind sheltering and organic carbon supply. *Global Change Biology*, 2021, 27(18): 4238-4253.
- [55] Du Y X, Chen F Z, Zhang Y L, He H, Wen S L, Huang X L, Song C, Li K Y, Wang J B, David K, Lu Y. Human activity coupled with climate change strengthens the role of lakes as an active pipe of dissolved organic matter. *Earth's Future*, 2023, 11(9): e2022EF003412.
- [56] Hanson P C, Pace M L, Carpenter S R, Cole J J, Stanley E H. Integrating landscape carbon cycling: research needs for resolving organic carbon budgets of lakes. *Ecosystems*, 2015, 18(3): 363-375.
- [57] Chen M, Zeng G M, Zhang J C, Xu P, Chen A W, Lu L H. Global landscape of total organic carbon, nitrogen and phosphorus in lake water. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 15043.
- [58] Eid E M, Keshta A E, Shaltout K H, Baldwin A H, Sharaf El-Din A A. Carbon sequestration potential of the five Mediterranean lakes of Egypt. *Fundamental and Applied Limnology*, 2017, 190(2): 87-96.
- [59] 赵炯昌, 潘岱立, 卫伟, 段兴武. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究. *生态学报*, 2021, 41(4): 1373-1380.
- [60] Meyer-Jacob C, Michelutti N, Paterson A M, Monteith D, Yang H, Weckstrom J, Smol J P, Bindler R. Inferring past trends in lake water organic carbon concentrations in northern lakes using sediment spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(22): 13248-13255.
- [61] Pastor J, Solin J, Bridgman S D, Updegraff K, Harth C, Weishampel P, Dewey B. Global warming and the export of dissolved organic carbon from boreal peatlands. *Oikos*, 2003, 100(2): 380-386.
- [62] Davidson N C, Finlayson C M. Extent, regional distribution and changes in area of different classes of wetland. *Marine and Freshwater Research*, 2018, 69(10): 1525.
- [63] Anderson N J, Stedmon C A. The effect of evapoconcentration on dissolved organic carbon concentration and quality in lakes of SW Greenland. *Freshwater Biology*, 2007, 52(2): 280-289.
- [64] Walter Anthony K M, Zimov S A, Grosse G, Jones M C, Anthony P M, Chapin III F S, Finlay J C, Mack M C, Davydov S, Frenzel P, Frolking S. A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch. *Nature*, 2014, 511(7510): 452-456.

- [65] Warner K, Fowler R A, Saros J. Differences in the effects of storms on dissolved organic carbon (DOC) in boreal lakes during an early summer storm and an autumn storm. *Water*, 2020, 12(5):1452.
- [66] Hugelius G, Virtanen T, Kaverin D, Pastukhov A, Rivkin F, Marchenko S, Romanovsky V, Kuhry P. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116 (G3): G03024.
- [67] Feng X J, Simpson A J, Wilson K P, Dudley Williams D, Simpson M J. Increased cuticular carbon sequestration and lignin oxidation in response to soil warming. *Nature Geoscience*, 2008, 1(12): 836-839.
- [68] Gudasz C, Bastviken D, Steger K, Premke K, Sobek S, Tranvik L J. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, 2010, 466(7305): 478-481.
- [69] Moreira L S, Moreira-Turcq P, Cordeiro R C, Turcq B, Caquineau S, Viana J C C, Brandini N. Holocene paleoenvironmental reconstruction in the Eastern Amazonian Basin: Comprido Lake. *Journal of South American Earth Sciences*, 2013, 44: 55-62.
- [70] Hough M, McCabe S, Vining S R, Pedersen E P, Wilson R M, Lawrence R, Chang K Y, Bohrer G, Coordinators I, Riley W J, Crill P M, Varner R K, Blazewicz S J, Dorrepaal E, Tfaily M M, Saleska S R, Rich V I. Coupling plant litter quantity to a novel metric for litter quality explains C storage changes in a thawing permafrost peatland. *Global Change Biology*, 2022, 28(3): 950-968.
- [71] Shabaga J A, Bracho R, Klockow P A, Lucash M S, Vogel J G. Shortened fire intervals stimulate carbon losses from heterotrophic respiration and reduce understorey plant productivity in boreal forests. *Ecosystems*, 2023, 26(2): 318-343.
- [72] 杨顶田, 陈伟民. 长江下游湖泊中可溶性有机碳的时空分布. *环境污染与防治*, 2004, (4): 275-277, 323.
- [73] Couture S, Houle D, Gagnon C. Increases of dissolved organic carbon in temperate and boreal lakes in Quebec, Canada. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(2): 361-371.
- [74] Koehler A K, Murphy K, Kiely G, Sottocornola M. Seasonal variation of DOC concentration and annual loss of DOC from an Atlantic blanket bog in South Western Ireland. *Biogeochemistry*, 2009, 95(2): 231-242.
- [75] Tömming K, Kotta J, Uuemaa E, Sobek S, Kutser T, Tranvik L J. Predicting lake dissolved organic carbon at a global scale. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 8471.
- [76] Abarike G A, Song Z G, Han Y Q, Wang S B, Bin W, Liu Y Q. Dissolved organic carbon concentration and its seasonal variation in the Huguangyan Maar Lake of Southern China. *Acta Geochimica*, 2021, 40(5): 806-818.
- [77] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 孔祥臻, 刘文秀, 杨晨, 杨斌, 徐福留. 水生生态系统中溶解性有机质表生行为与环境效应研究. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(3): 341-355.
- [78] Ejarque E, Scholz K, Wohlfahrt G, Battin T J, Kainz M J, Schelker J. Hydrology controls the carbon mass balance of a mountain lake in the eastern European Alps. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(6): 2110-2125.