

我国北方灌区尾间湖泊不同形态碳的来源、季节变化及驱动因子分析：以乌梁素海为例*

赵轶鸣^{1,2}, 于瑞宏^{1,2,3,*}, 位俊燕^{1,2}, 杨旭^{1,2}, 耿悦^{1,2}, 王效壮^{1,2}, 李向伟^{1,2}

(1: 内蒙古大学 生态与环境学院, 呼和浩特 010021)

(2: 内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室, 呼和浩特 010021)

(3: 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 呼和浩特 010021)

摘要: 尾间湖泊碳动态和来源过程研究有助于精细刻画其在区域碳循环中的“源”或“汇”角色。本研究选取中国北方尾间湖泊乌梁素海为研究对象, 采用贝叶斯混合模型 (MixSIAR)、碳同位素二元混合模型等方法, 探究水体中不同形态碳来源及主要影响因素, 主要结果如下: 溶解有机碳 (DOC) 与颗粒有机碳 (POC) 均呈现由北向南浓度逐渐降低的分布特点 ($p < 0.05$); 4月 DOC 与 POC 来源以浮游植物为主, 7月和10月以灌渠退水为主。DOC 主要来源于灌渠退水, 来源比例整体表现为灌渠退水 (72%) > 浮游植物 (15%) > 陆地 C3 (7%) > 水生植物 (6%); POC 来源比例整体表现为浮游植物 (39%) > 灌渠退水 (34%) > 水生植物 (15%) > 陆地 C3 (12%)。水体溶解无机碳 (DIC) 与颗粒无机碳 (PIC) 空间上无显著差异 ($p > 0.05$), DIC 不同月份来源差异较大, 4月份主要由土壤有机质 (92.7%) 与大气交换 (7.3%) 贡献, 7月份主要来源是灌渠退水 (74.1%) 与生物活动 (25.9%), 10月份主要来源为灌渠退水 (71.9%) 与大气交换 (28.1%); PIC 则主要来自于内源自生沉淀。多元回归分析表明: Chl-a 与 TN 是 DOC 浓度的主要驱动因子 ($R^2=0.662, p < 0.001$); SD、TN 与 SPM 共同解释 POC 浓度变化 ($R^2=0.566, p < 0.05$); $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是 DIC 浓度的核心调控因子 ($R^2=0.370, p < 0.001$); TN 与 pH 值对 PIC 形成具有双重促进作用 ($R^2=0.573, p < 0.05$)。研究结果可为农业灌区尾间湖泊碳循环研究提供科学依据。

关键词: 灌区尾间湖泊; 乌梁素海; 水体碳来源; 驱动机制; 多元线性回归分析

Analysis of the sources, seasonal variations, and driving factors of different carbon forms in a terminal lake in irrigation areas, northern China: A case study of Lake Ulansuhai

Zhao Yiming¹, Yu Ruihong^{1,2,*}, Wei Junyan¹, Geng Yue¹, Yang Xu¹, Wang Xiaozhuang¹, Li Xiangwei¹

(1: Inner Mongolia Key Laboratory of River and Lake Ecology, School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

(2: Key Laboratory of Mongolian Plateau Ecology and Resource Utilization, Ministry of Education, Hohhot 010021, China)

Abstract: Understanding carbon dynamics and source processes in terminal lakes is essential for accurately characterizing their

* 2025-03-01 收稿; 2025-08-25 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (52279067)、国家自然科学基金联合基金重点项目 (U24A20570) 和内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室项目 (2022QZBZ0003) 联合资助。

** 通信作者; Email: rhyu@imu.edu.cn.

role as carbon "sources" or "sinks" in regional carbon cycles. This study investigates Lake Ulansuhai, a terminal lake in northern China, to identify the sources of different carbon forms and their influencing factors, using a Bayesian mixing model (MixSIAR) and a dual carbon isotope two-end-member mixing model. The results reveal that both dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) exhibited a significant north-to-south decreasing concentration gradient ($p < 0.05$). Temporally, phytoplankton were the dominant source of DOC and POC in April, whereas irrigation return flow became the primary contributor in July and October. Overall, irrigation return flow accounted for the largest proportion of DOC sources (72%), followed by phytoplankton (15%), terrestrial C3 plants (7%), and aquatic plants (6%). For POC, the main contributors were phytoplankton (39%) and irrigation return flow (34%), with aquatic plants and terrestrial C3 plants contributing 15% and 12%, respectively. Spatially, dissolved inorganic carbon (DIC) and particulate inorganic carbon (PIC) showed no significant variation ($p > 0.05$). However, DIC sources varied markedly across months: soil organic matter (92.7%) and atmospheric exchange (7.3%) dominated in April; irrigation return flow (74.1%) and biological activity (25.9%) were primary in July; and irrigation return flow (71.9%) and atmospheric exchange (28.1%) prevailed in October. PIC primarily originated from endogenous autogenic precipitation. Multiple regression analysis indicated that chlorophyll-a (Chl-a) and total nitrogen (TN) were the principal drivers of DOC concentration ($R^2 = 0.662, p < 0.001$). Secchi depth (SD), TN, and suspended particulate matter (SPM) collectively explained POC variation ($R^2 = 0.566, p < 0.05$). Ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) was the core regulator of DIC concentration ($R^2 = 0.370, p < 0.001$), while both TN and pH exhibited a dual promoting effect on PIC formation ($R^2 = 0.573, p < 0.05$). These findings provide a scientific basis for understanding carbon cycling in terminal lakes of agricultural irrigation areas.

Keywords: Terminal lakes in irrigation districts; Lake Ulansuhai; Sources of aquatic carbon; Driving mechanisms; Multiple linear regression analysis

随着全球气候变化和生态系统退化问题的日益严重,湖泊作为重要的水体生态系统,在全球碳循环中扮演着越来越重要的角色,特别是在灌区(农业灌溉区)内,湖泊不仅是重要的水资源蓄积与调节系统,同时也是碳汇功能的核心区域以及温室气体排放的关键源区^[1-2]。灌区湖泊由于其特殊的地理、气候和人类活动影响,能够接收大量来自周边土壤和植被的碳输入并储存在湖泊中^[3],因此深入研究灌区湖泊的碳来源及控制不同形态碳浓度的关键因子对理解区域气候变化、生态功能恢复及碳管理具有重要意义。

湖泊水体中的碳按照赋存形态可分为溶解有机碳(DOC)、溶解无机碳(DIC)、颗粒有机碳(POC)以及颗粒无机碳(PIC)四大类^[4]。不同形态碳的来源具有显著的多样性和复杂性,研究其来源是解析湖泊碳循环机制的关键环节之一,通过同位素分析、碳氮比及分子标志物等技术手段对不同形态碳进行溯源,不仅可以追踪区域污染物的传输路径,还能识别人类活动等对湖泊生态系统的潜在影响^[5]。水体中的碳来源通常可以分为外源输入和内源生成两大类,其来源受陆地和生态过程的复合作用的共同影响^[6]。外源输入主要包括河流携带的陆源有机质、农业退水带来的溶解有机碳和无机碳以及大气沉降中携带的碳成分,这些外源碳的性质和数量不仅反映了流域土地利用结构和人类活动强度,还受到区域气候变化的驱动影响,内源生成的碳则主要与湖泊内部的生物活动相关,例如浮游植物的初级生产力通过光合作用固定二氧化碳生成有机碳、浮游植物等水生生物通过生物矿化作用直接形成碳酸钙等,而底栖生物和微生物群落则通过代谢活动影响碳的循环与转化^[7]。研究表明,森林湖泊的DOC主要受土壤溶解性有机质(DOM)控制,如北美五大湖的研究显示,周边土壤和植被类型显著影响DOC的浓度^[8]。黄河干流中较高的TSS浓度导致光利用率降低,因此水生生物对DOC的贡献较低,DOC主要来源于陆源输入^[9]。相较而言,农业湖泊和城市湖泊的DOC更多受人类活动干扰,施肥、污水排放及有机污染物输入导致湖泊DOC含量升高^[10]。在对水体中无机碳来源的研究中发现,碳酸盐风化对湖泊DIC贡献显著,如青藏高原的湖泊因高强度的岩石风化作用,DIC主要来源于碳酸盐溶解^[11]。此外,农业湖泊中DIC浓度较高,可能与化肥使用及有机物分解增强 CO_2 释放有关^[12]。而PIC主要受湖泊水化学条件调控,生物诱导沉淀和化学沉淀是PIC的重要形成机制,富营养化湖泊因浮游植物光合作用强化碳酸钙沉淀,导致PIC浓度上升,如美国的大盐湖和中国的查干湖均观测到明显的生物诱导碳酸钙沉淀^[13],此外,湖泊蒸发作用增强时,PIC沉积速率提高,在干旱区湖泊尤为显著^[14]。近年来,研究者们通过稳定同位素分析、分子标记物、C/N比分析及

高分辨率质谱等技术,揭示了湖泊不同形态碳的时空分布特征及其主要来源,为评估湖泊在碳汇与碳源功能中的作用提供了重要依据,但目前对于不同形态碳来源的研究仍存在不足。当前研究外源与内源贡献定量不足是主要问题之一,特别是在季节变化、湖泊营养状态变化条件下,不同形态碳的来源比例可能有所改变,现有研究多基于短期观测,难以准确评估长期趋势。此外,人类活动(污水排放、农业灌溉等)显著影响湖泊碳平衡,尤其是富营养化湖泊,人类活动干扰下的湖泊碳来源过程仍不清晰,难以预测未来湖泊碳收支的变化趋势。

湖泊碳库是一个动态系统,外源输入的碳进入湖泊后,其形态会经历复杂的生物地球化学转化(矿化、溶解等)^{[15][16]}。不同形态碳在湖泊水体中的分布特征受控于多种自然与人为因素^[17-18],包括气候条件、水文特征、营养盐水平及人类活动,这些因素致使不同形态碳之间存在复杂的相互转化和交互作用。如 DOC 可以通过光降解或微生物矿化作用转化为 DIC,反过来, DIC 可以通过光合作用被浮游植物或水生植物固定,形成新的 POC 或 DOC^{[19][20]}。此外, DOC 分子还可以通过物理化学过程或生物过程聚集成更大的颗粒,形成有机聚合物,从而转化为 POC^[21]。四种形态的转化过程相互影响,区分单一过程的影响非常困难,此外,不同湖泊类型的环境条件差异巨大,导致优势转化过程和速率截然不同,捕捉这些动态变化需要高频率、多层次的监测。灌区湖泊作为全球碳循环的重要组成部分,其在区域生态系统功能和气候变化中的作用引起了广泛关注。灌排系统是连接灌区与湖泊的主要纽带,可为湖泊输送悬浮物质和溶解物质,这些物质的迁移和转化是湖泊碳平衡和营养平衡的重要组成部分^[22-23],农业活动中化肥过度使用致使灌区向其连接湖泊输送污染物及未被利用的营养盐的风险大幅增加,这将进一步驱动不同形态碳之间的相互转化,加剧湖泊碳循环机制的不确定性。

针对上述挑战,本研究以灌区尾间湖泊乌梁素海为对象,探究其不同形态碳来源的季节性动态及驱动因素。我们进行了多季节、多空间尺度的野外调查,同步监测了水体 DOC, DIC, POC, PIC 的浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 组成,以及关键水环境参数,采用贝叶斯混合模型(MixSIAR)、碳同位素二元混合模型等方法,探究水体中不同形态碳来源及主要影响因子,力求在高度动态和复杂的灌区湖泊环境中,更准确地刻画碳的来源与调控机制,为评估其碳源、汇角色提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌梁素海(40°36'~41°03'N, 108°43'~108°57'E)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,是黄河流域内面积最大的淡水湖泊,也是全球同纬度最大的自然湿地。湖泊总面积约为 293 km²,平均水深 0.86 m,最大水深 2.67 m^[24],水量为 2.5~3×10⁸ m³,研究区属中温带大陆性气候,年平均降雨量约 200 mm,蒸发量超过 2000 mm^[25]。湖区年平均气温 6.8~9.3°C,年平均风速 2.20 m/s,冬季长期最低气温为-20°C,夏季长期最高气温为 35°C^[26]。河套灌区现具有七级排灌工程体系,排灌设施齐全,每年 5 月上旬至 6 月下旬、9 月上旬至 9 月中旬、10 月上旬至 11 月上旬,通过灌排系统将黄河水引入灌区进行灌溉^[44],河套灌区退水主要通过总排干、通济渠、长济渠、塔布渠、八排干和九排干进入乌梁素海,退水水量约为入湖总水量的 90%^[27],这使乌梁素海成为了当地农业废水的主要接收者,导致湖泊水体营养水平具有较大的空间异质性和时间动态性。

1.2 样品采集与分析

本研究分别于 2023 年 4 月、7 月和 10 月在湖内设置 12 个采样点(S1~S12)。在 6 条直接入湖的灌区退水渠道各设置 1 个点位(C1~C6),采样时间段涵盖了重要的农田灌溉退水事件,以便探讨灌溉退水对乌梁素海有机碳与无机碳来源特征的影响。为更好地了解乌梁素海内不同区域的湖水环境变化特征以及不同形态碳的分布规律,按照采样点位置和环境类型将采样点沿着芦苇边界进行分类,主要分为北部(S3、S6、S9、S12)、湖心(S2、S5、S8、S11)与南部(S1、S4、S7、S10),每个区域分别分布着开放水域区、沉水植被区、挺水植被区与黄苔暴发区 4 种环境类型(图 1)。

利用多参数水质分析仪(WTW Multi 3510,德国)现场测定水温(WT)、溶解氧(DO)、pH 等参数,采样点水深(H)使用手持测深仪测得,用赛氏盘测得透明度(SD)。对地表水采样前均使用水样对采样瓶润洗至少 3 遍,使用 5L 聚乙烯采样瓶和 30ml 棕色玻璃瓶保存样品,棕色玻璃瓶用 Parafilm 封口膜

进行密封。从 5L 采样瓶中取 500ml 水样滴加 7~8 滴碳酸镁溶液，过滤后滤膜（0.45 μm）用锡纸包好放入液氮罐中保存，用于后续 Chl-a 的测定。另取 500ml 水样，用于 TN 和 NH₄⁺-N 浓度分析，棕色玻璃瓶中水样用于 TP 浓度的测定，其余水样用于后续不同形态碳浓度及同位素和其它指标的测定，所有样品采集后立即冷藏保存进行后续分析。水体中 Chl-a、TN、NH₄⁺-N、TP 浓度采用分光光度法（HJ5352009）分别进行测定，SPM 浓度根据膜过滤前后的质量差计算得出，使用高锰酸钾指数法测定 COD。

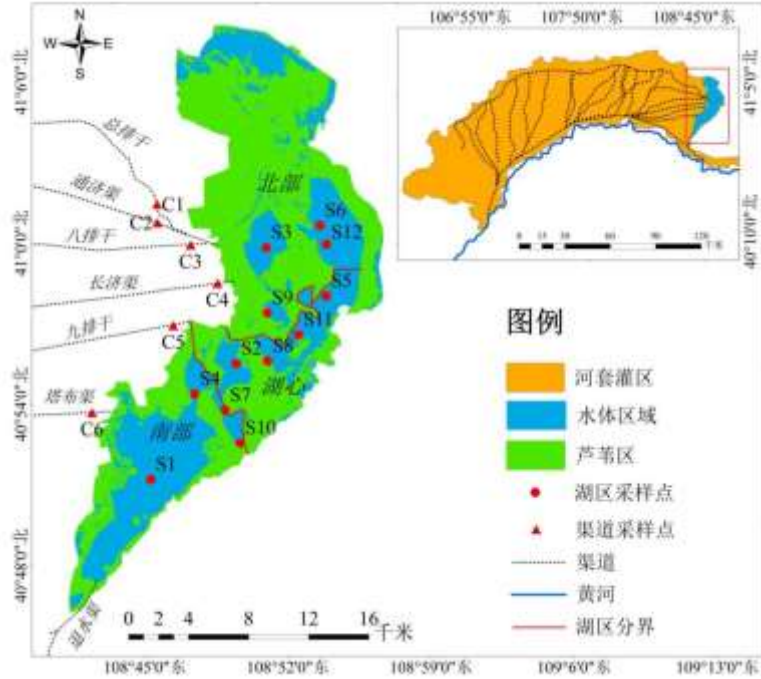


图1 研究区及采样点示意图

Fig.1 Study area and sampling sites

用事先在马弗炉 450~500℃灼烧 2 h 后的玻璃纤维膜（0.45μm）过滤 3L 水样，过滤后的滤膜对折后在 -20℃保存，用于 POC 和 PIC 浓度及碳同位素的测定，过滤后的滤液取 100mL 在 4℃下低温保存，可用于测定 DOC 和 DIC 浓度及 δ¹³C 稳定同位素。POC 和 DOC 的浓度及其 δ¹³C 稳定同位素均用总有机碳分析仪-稳定同位素质谱仪联机（iso TOC CUBE-ISOPRIME100，德国）测定。使用同位素质谱仪（Delta V Advantage，美国）测试 DIC 与 PIC 的 δ¹³C 稳定同位素。DIC 浓度利用同位素质谱仪（Delta V Advantage，美国）测定的标样峰值校准：将 NaHCO₃ 和 Na₂CO₃ 以 1: 1 物质质量混合后，用 milli-Q 超纯水配置成不同摩尔浓度的水溶液，将每个浓度的标准溶液测试所得峰面积与浓度进行标准曲线的绘制，利用绘制的标准曲线进行 DIC 浓度校准。利用百万分之一的天平称取一定量的高纯碳酸钙标准样品（碳酸钙含量>99.9%），放入 12 mL 的样品瓶中，拧紧瓶盖，用 He 气排空处理。然后加入 8 滴无水磷酸，置于干式恒温器上 70 °C 加热 45min，反应生成的 CO₂ 气体，再利用 GasBench-稳定同位素质谱仪联机（GasBench II-Delta V Advantage）测定产物 CO₂ 的峰，同时根据样品的峰面积与单位质量 C 的峰面积比来计算样品中 PIC 的质量。

1.3 数据处理

1.3.1 碳同位素二元混合模型 用于识别 DIC 不同来源贡献，根据已有湖泊同位素相关研究以及乌梁素海的环境背景^{[37][38]}，将 DIC 端元设定为灌渠退水、土壤有机质降解、大气交换和生物活动 4 种，其中不同季节分别有至多两种主要贡献源。计算公式如下^[28]：

$$\delta_{SA} = f_A \times \delta_A + f_B \times \delta_B \quad (1)$$

$$f_A + f_B = 1 \quad (2)$$

式中 f_A 和 f_B 分别代表不同端元素的贡献百分比， δ_{SA} 反映样品的碳同位素组成。 δ_A 和 δ_B 代表不同端元素对

应的碳同位素组成。

2.3.2 贝叶斯混合模型 本研究采用贝叶斯混合模型来确定水体 DOC 与 POC 中四种不同来源的贡献比例：即水生植物、灌渠退水、陆地 C3 植物与浮游植物。计算公式如下^[29]：

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^K P_k (S_{jk} + C_{jk}) + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

$$S_{jk} \sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \quad (4)$$

$$C_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (6)$$

式中， X_{ij} 代表混合物*i*的第*j*种同位素，其中*i*=1, 2, 3, ..., *i*，*j*=1, 2, 3, ..., *j*； S_{jk} 代表第*j*种同位素在第*k*个来源的值（*k*=1, 2, 3, ..., *k*），且 S_{jk} 服从均值为 μ_{jk} ，标准差为 ω_{jk} 的正态分布； P_k 代表来源*k*的比例； C_{jk} 代表来源*k*的第*j*种同位素分馏系数，且 C_{jk} 服从均值为 λ_{jk} ，标准差为 τ_{jk} 的正态分布； ε_{ij} 代表残余误差，服从均值为 0，标准差为 σ_j 的正态分布。

1.3.3 TLI 营养状态指数 用于评价湖泊营养状态差异，公式如下^[30]：

$$TLI = \sum_{i=1}^n W_j \times TLI(j) \quad (7)$$

$$W_j = r_{ij}^2 / \sum_{i=1}^n r_{ij}^2 \quad (8)$$

式中， W_j 为第*j*种参数的营养状态指数的相关权重， $TLI(j)$ 为第*j*种参数的营养状态指数， r_{ij} 为第*j*种参数与 Chl-a 的相关系数，指数越高，富营养化程度越高，本文采用 TN、TP、COD_{Mn}、Chl-a 四个指标计算 TLI 值。

1.3.4 逐步多元回归分析 本研究采用逐步多元回归分析来解释一果多因的变量之间的关系，该方法将各项自变量逐一进行方差分析后进入线性分析，避免了信息冲突信息缺失及显著性水平不合要求的问题，利用共线性统计量（VIF）与德宾沃森（DW）系数检验多元回归模型精度，VIF 小于 5，表明自变量之间不存在多重共线性，符合多元线性回归分析的要求，DW 系数接近 2，代表样本的独立性与模型的可靠性。

1.4 统计方法

所有模型均在 R4.5.1 中使用 MixSIAR 软件包完成，模型设定了无信息先验，并经过 MCMC 迭代以确保收敛，最终结果以各碳源贡献率后验分布的中位数及 95%置信区间报告。采用单因素方差分析（One-way ANOVA）进行统计检验，显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。多元线性回归分析在 SPSS 26.0 中完成。采用 Excel 2021 和 SPSS 26.0 进行数据统计分析，图表制作采用 ArcGIS 10.8.1 和 Origin 2024。

2 结果

2.1 湖泊有机碳与无机碳的时空变化

乌梁素海水体中溶解碳(DC)占主要地位，其中 DOC 的分布范围为 5.66~27.87 mg/L，平均值 11.00±0.78 mg/L，DIC 的分布范围为 6.55~83.44 mg/L，平均值为 33.89±3.09 mg/L，二者在时间上均无显著差异（图 2），空间上，DOC 在不同湖区分布差异显著（ $p=0.001$ ），北部的 DOC 浓度（14.03±1.52 mg/L）显著高于南部（7.69±0.38 mg/L），而湖心处 DOC 浓度与北部和南部均无明显差异，平均值为 11.29±1.11 mg/L，DIC 在空间上无明显差异（ $p=0.366$ ），北部、湖心与南部的平均值分别为 39.14±7.51 mg/L、34.23±3.98 mg/L 与 28.28±3.67 mg/L。乌梁素海颗粒碳（PC）浓度略低于 DC，其中 POC 的分布范围为 3.23~27.63 mg/L，平均值 12.45±1.09 mg/L，时间上差异较小，空间上呈现由北向南逐渐减小的浓度梯度（ $p<0.001$ ），PIC 浓度远小于其它三种形态碳，其分布范围为 0.01~3.34 mg/L，平均值 0.71±0.14 mg/L，PIC 时间差异显著（ $p=0.034$ ），7 月份 PIC 平均浓度远大于 10 月（图 2），而空间差异较小，三个湖区 PIC 均呈现较低浓度水平。

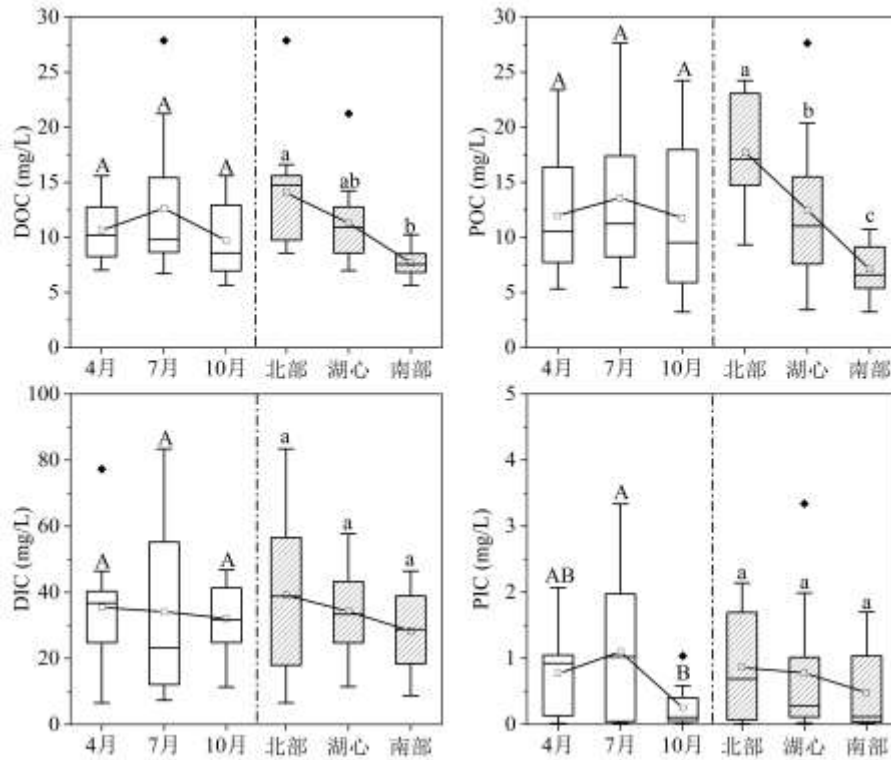


图 2 乌梁素海水体四种形态碳的时空变化

(图中大写字母表示时间变化的显著性分析, 小写字母表示空间变化的差异性分析;后文图同)

Fig. 2 Spatial and temporal variations of four forms of carbon in the water column of Lake Ulansuhai

(The capital letters in the figure represent the significance analysis of temporal changes, while the lowercase letters represent the difference analysis of spatial changes. The following figures are the same)

2.2 湖泊有机碳与无机碳的 C/N 与碳同位素组成

湖水 DOC/TN 和 POC/TN 均分布在 5~23 之间, DOC/TN 平均值 8.4 ± 0.5 , POC/TN 平均值为 9.2 ± 0.8 , 二者在时间上均无显著差异。空间上, DOC/TN 的最高值 (21.2) 出现在 7 月份湖心处的 S8 点, 湖泊北部的 S12 点位也有较高值分布频率, 整体上无显著差异 ($p=0.573$), DOC/TN 低值多分布于湖泊南部; POC/TN 的最高值 (22.7) 分布在 4 月份的 S12 点, 与此同时, 7 月份的 S3, S8 点位、10 月份湖泊北部几乎所有点位都出现过高值, 整体上差异较小 ($p=0.090$), 湖泊南部分布较多 POC/TN 低值 (图 3)。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 的分布范围为 -30.45% ~ -22.85% , 平均值 $-27.26 \pm 0.31\%$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 的分布范围为 -30.68% ~ -22.15% , 平均值 $-27.40 \pm 0.34\%$, 与之形成鲜明对比的是, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ 表现出明显偏正的同位素信号, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分布范围为 -20.48% ~ -2.44% , 平均值为 $-9.74 \pm 0.67\%$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ 分布范围为 -8.72% ~ -1.56% 之间, 平均值 $-4.82 \pm 0.31\%$ 。统计分析表明, 4 种形态 $\delta^{13}\text{C}$ 信号在时空上均无显著差异 ($p>0.05$), 不同季节 S4 点位的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 分别分布着最负值与最正值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 最负值出现在湖心处的 S2 点, 最正值出现在湖泊南部的 S4 点, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ 在湖心处 S2、湖泊南部 S10 等点的值较其它点更负, 4 种形态 $\delta^{13}\text{C}$ 信号值在湖泊南部 S4 点位均出现过高值 (图 4)。

2.3 不同形态碳源特征

为了更准确地追溯乌梁素海有机碳的来源, 分别测定了与乌梁素海直接连接的 6 条灌溉退水渠道 (C1~C6) 水样的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 C/N 值, 划定范围后作为有机碳来源的贡献端元之一, 所对应的值见表 1。根据乌梁素海定期接收灌溉退水与植物密集的水环境特征^[31-32], 将其水体中 POC 与 DOC 的内外源主要贡献端元设定为: 灌渠退水、浮游植物、水生植物、陆地 C3, 所对应的端元值见表 2。

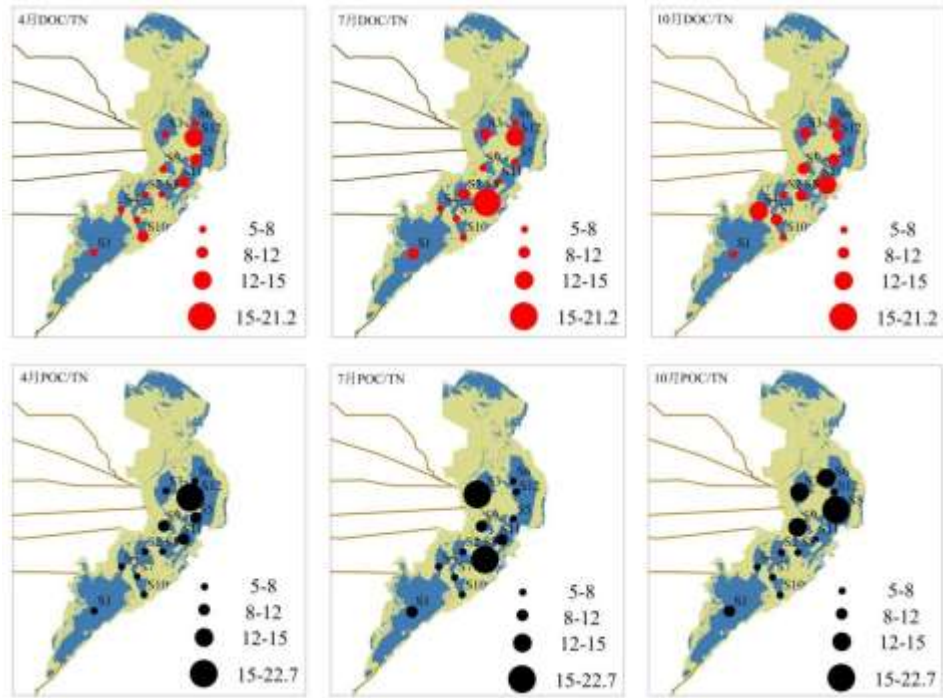


图 3 乌梁素海水体 DOC/TN 与 POC/TN 时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of DOC/TN and POC/TN in Lake Ulansuhai

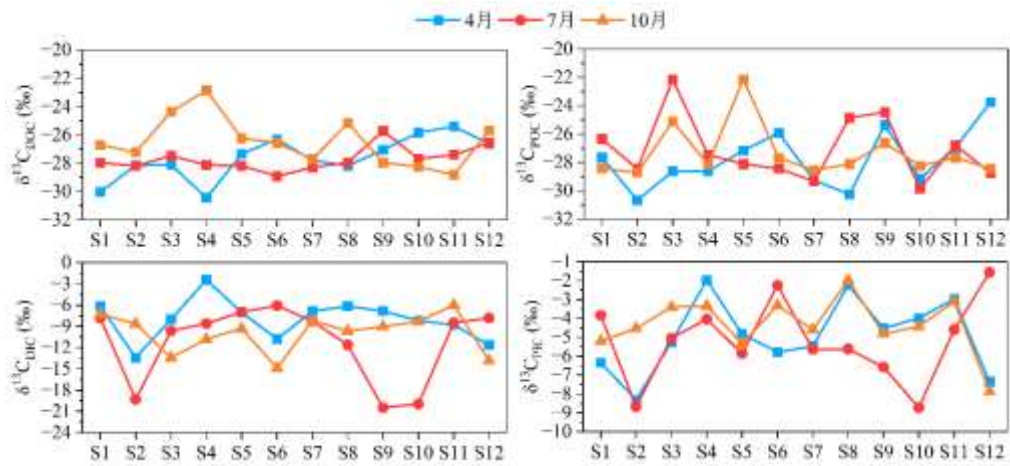


图 4 乌梁素海水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 时空分布

Fig. 4 Temporal and spatial changes of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ in Lake Ulansuhai

在对 DIC 进行溯源时,通过测量 DIC 的碳同位素组成可以推断其来源,其主要的来源包括大气交换、流域碳酸盐矿物风化、土壤有机质降解、降水输入和植物的光合和呼吸作用等,除此之外,灌渠退水也是乌梁素海 DIC 的重要来源之一,本研究测定了与乌梁素海直接连接的 6 条灌渠的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值,作为后续对 DIC 来源定量研究的端元之一(表 1)。根据已有湖泊同位素相关研究以及乌梁素海的环境背景^[37-38],将 DIC 端元物质确定为灌渠退水、土壤有机质降解、大气交换和生物活动 4 种,所对应的端元值见表 3。

表 1 总排干、通济渠、八排干、长济渠、九排干、塔布渠的 C/N 与 $\delta^{13}\text{C}$ (表中为三个月份的平均值±标准差)

Tab.1 C/N 与 $\delta^{13}\text{C}$ in The Main Channel, The Tongji Channel, The Eighth Drainage Channel, The Changji Channel, The Ninth Drainage Channel and The Taboo Channel (the table shows the average of three months)

样点	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ (‰)	DOC/TN	$\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ (‰)	POC/TN	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ (‰)
C1	-25.74±2.33	7.2±0.2	-25.82±1.63	10.1±0.5	-12.26±0.38	-4.80±0.53
C2	-25.46±1.06	9.8±0.7	-24.71±0.71	12.6±0.9	-11.37±0.40	-8.73±0.42
C3	-25.88±1.74	7.6±1.3	-25.58±0.71	7.7±1.6	-10.77±0.16	-2.33±0.11
C4	-27.60±0.81	8.2±0.1	-25.73±0.34	7.5±0.6	-5.45±1.01	-4.98±0.52
C5	-27.65±0.64	12.1±0.4	-27.45±1.68	8.4±0.4	-12.23±1.35	-9.03±0.61
C6	-25.31±0.78	8.3±1.1	-26.08±0.32	10.8±0.2	-10.23±0.60	-7.12±0.87

表 2 POC 和 DOC 有机质端元的 C/N 与 $\delta^{13}\text{C}$

Tab.2 C/N and $\delta^{13}\text{C}$ of end members of POC and DOC

端元	$\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB, ‰)	C/N
灌渠退水	-28 ~ -24	7~13
浮游植物 ^[33]	-42 ~ -24	5~8
水生植物 ^[34]	-30 ~ -16	12~30
陆地 C ₃ ^[35-36]	-30 ~ -23	>18

表 3 DIC 端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Tab.3 Stable Inorganic Carbon Isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) end member Values.

端元	$\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB, ‰)
灌渠退水*	-13 ~ -5
土壤有机质降解 ^[39]	-13 ~ 6
大气交换 ^[40]	-15 ~ 8
生物活动 ^[41]	-26 ~ -18

2.4 湖泊水体理化性质分析

乌梁素海水体理化指标时空差异明显(图 5)。水体 TN 的分布范围为 0.44 mg/L~2.79 mg/L, 平均值 1.44±0.11 mg/L, 单因素方差分析表明, TN 在时间变化上无明显差异, 但空间上北部湖区(1.75±0.14 mg/L)表现出远高于南部(1.07±0.10 mg/L)的特点(p=0.027)。水温(WT)在 7 月份显著高于其它两个月份, 但空间上不存在显著差异, 水深则呈现出“湖心浅, 南北深”的分布特点(p=0.012), 乌梁素海最小水深 0.8 m, 最大水深 2.3 m。COD 与 NO₃-N 则表现相同的时间分布特征, 二者 4 月的值均显著小于 7 月和 10 月。Chl-a 与 TLI 在时间上均无差异, 但空间上都表现为南部小、湖心大的分布特点, 乌梁素海 TLI 平均值为 47.54±0.86, 整体属于中营养状态, 北部与湖心部分点位出现富营养状态。水体 TP、DO、pH、盐度、SPM、NH₄⁺-N 与 NO₂-N 在调查时间内均无显著时空差异。

3 讨论

3.1 乌梁素海水体有机碳来源识别

在对有机碳定性分析过程中, 个别样点超出了所选定端元的范围(图 6a), 原因可能在于选定端元数量不足, 或 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 组合判别悬浮颗粒物有机质来源存在缺陷等^[42]。为弥补以上缺陷, 本研究进一步采用贝叶斯混合模型, 从不同端元贡献率的角度, 对有机质来源进行定量分析。该模型是以不同端元有机质的 C/N 比和 $\delta^{13}\text{C}$ 值在有机质形成过程中所遵循的质量守恒定律及其本身的保守性为依据而进行的量化过程^[43]。贝叶斯混合模型的不确定性可能来自多个环节: 端元同位素的测量误差(同位素分析的仪器误差或样本制备误差)、端元自身的时空异质性(同一来源的同位素值可能随季节、空间位置或环境条件变化)以及端元代表性不足(未完全涵盖所有潜在来源, 或端元样本量过少, 如仅采集少量样本代表某一源)。

为了减少同位素模型的不确定性，本研究在使用该模型追溯乌梁素海碳来源贡献率时，对不同贡献端元进行了严格的筛选：鉴于前人对于乌梁素海不同来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值已展开较为深入且成熟的研究，本文中直接沿用了之前的研究结果，然而，乌梁素海作为典型的灌区湖泊，与连接的退水渠道有着强烈的水交换过程^[27]，这些灌渠退水会直接为湖泊内提供不同形态的有机碳，这导致了其有机碳来源过程相对复杂，因此，除了乌梁素海内部水生植物、浮游植物和周边陆地 C3 植物的贡献，灌渠退水对湖泊有机碳的贡献应着重考虑到本研究中（表 2）。

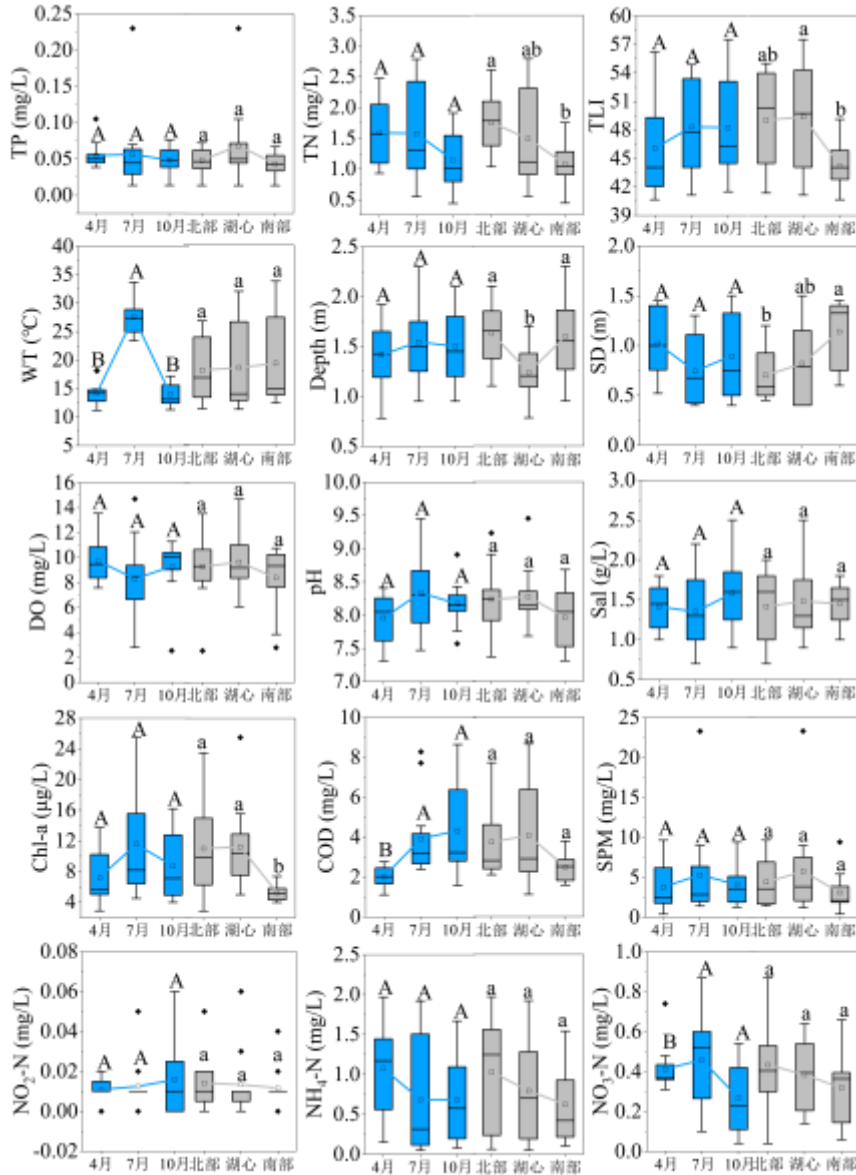


图 5 乌梁素海水质及理化参数时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial changes of water quality and physicochemical parameters of Lake Ulansuhai

乌梁素海 DOC 来源集中分布在灌渠退水端元中, DOC 来源贡献比例从大至小依次为灌渠退水(72%)、浮游植物(15%)、陆地 C3(7%)与水生植物(6%)。乌梁素海 4 月 DOC 来源以浮游植物为主, 7 月和

10月以灌渠退水为主(图6),不同季节DOC所处端元范围不同的原因主要在于外源输入(灌渠退水)的季节性差异。4月乌梁素海没有与灌渠之间的水交换过程,此时的湖泊环境条件使得外源输入相对不占主导,从而凸显了浮游植物对DOC的贡献^[44],此外,4月份处于融冰期,随着冰的融化,水体环境发生变化,水温升高、光照增强等因素为浮游植物提供了更适宜的生长条件,浮游植物在生长过程中会释放大量有机碳^[45],在这一时期,与其它可能的DOC来源相比,如陆源输入等,浮游植物在这个时期的贡献更为突出。而7月和10月尽管也不缺少浮游植物的活动,甚至相比4月份更高,但是这两个月份处于农业灌溉的关键时期,受季节性农业用水影响显著,7月是农作物生长旺盛期,需水量大,灌溉相对频繁,在灌溉活动中,农田中的肥料、农药以及土壤中的有机物质随着退水进入灌渠后流入乌梁素海^[44],这些物质中含有丰富的DOC,进而使得灌渠退水端元在乌梁素海的DOC来源中占比较大。10月虽然农作物进入生长后期,但仍有部分灌溉活动,也会导致含有有机物质的退水流入乌梁素海。除此之外,乌梁素海作为一个浅水草型湖泊,其湖泊内丰富的水生植物群落也会通过生长和代谢释放出一定量的DOC,但相比灌渠退水中的外源输入,其贡献相对较小(图6)。湖区内各采样点所处区域DOC贡献来源空间分布规律明显,除湖心处S8点位与南部S4点位以外,其余点位由灌溉退水贡献的DOC比例均高于70%,尽管S8与S4所处区域灌渠退水贡献的比例较其它位置较小,但较其它贡献源仍占有最大比例。贝叶斯混合模型模型计算结果表明,DOC的所有来源中灌渠退水所占的比例明显远超其它来源,这进一步说明了乌梁素海作为灌区湖泊,其受周围灌域影响强烈,灌渠退水是乌梁素海的重要水源之一,但也带来了大量的溶解性有机碳。

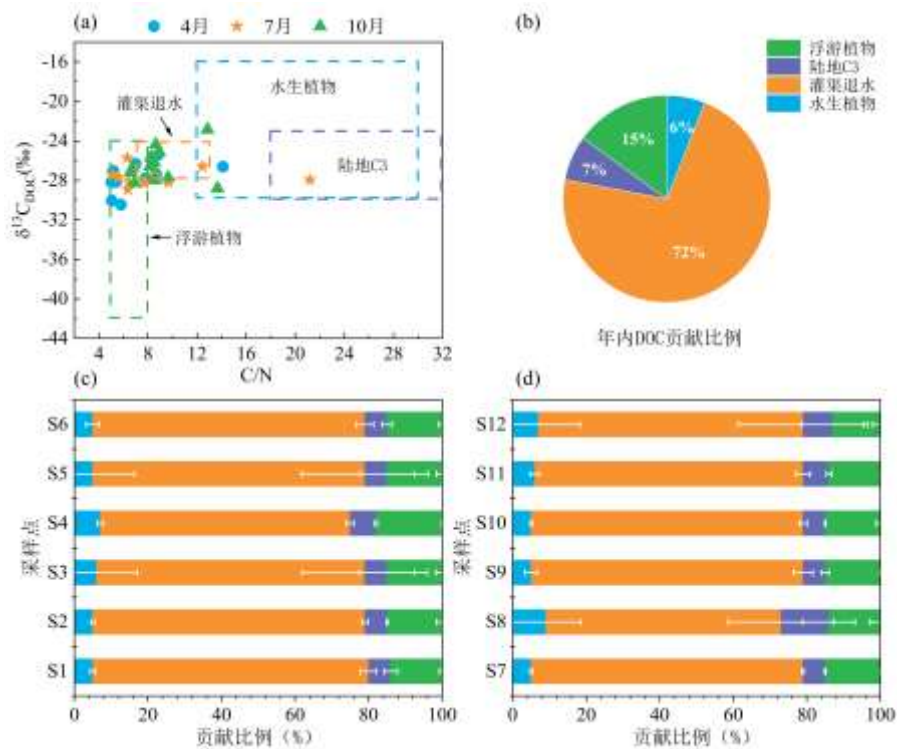


图6 乌梁素海DOC来源定性与定量解析。(a) C/N与碳同位素散点图; (b) 4种贡献端元对DOC的年内平均贡献比例; (c)、(d) 4种贡献端元在各采样点的贡献比例(白色实线代表标准误差棒)

Fig. 6 Qualitative and quantitative analysis of DOC sources. (a) Scatter plot of C/N ratio and carbon isotope; (b) Annual average contribution ratio of four contributing end-members to DOC; (c), (d) Contribution ratios of the four contributing end-members at each sampling site (white solid lines represent error bars)

乌梁素海水体POC来源表现为浮游植物与灌渠退水为主,四种贡献源混合贡献的特点,其贡献比例

从大到小依次为浮游植物（39%）、灌渠退水（34%）、水生植物（15%）与 C3 植物（12%）（图 7），不同季节 POC 所处端元范围不同的原因主要在于初级生产力与外源输入（灌渠退水）的季节性差异。4 月份点位几乎集中落在浮游植物贡献端元中，这主要归因于这一季节来自灌溉退水的有机质相较于 7 月与 10 月更少，导致浮游植物相较于其它贡献源占有更多的比例，其次，相较于 DOC，浮游植物对 POC 的贡献往往更直接、更高效^[46]。浮游植物生物量大且具有沉降性，某些浮游植物在特定的条件下会形成聚集体，增强其沉降速率，其使得浮游植物能够更快的以颗粒的形式释放到环境中，成为 POC 的来源^[47]。7 月和 10 月，随着农业活动的加剧，灌溉退水对乌梁素海 POC 的贡献比例增强，一方面，渠道中的 POC 会随退水直接进入乌梁素海，增加湖内 POC 水平，另一方面，湖泊中的水生植物生长状况会受到灌渠退水的影响，它们中的营养物质可能会刺激水生植物的生长，这些水生植物在生长过程中会释放出一定量的 POC^[6]，从而在 7、10 两个月份，POC 出现了部分来自水生植物的贡献。此外，在退水过程中，河套灌区周边的小麦、玉米等 C3 作物通过光合作用将 CO₂ 固定在根系和叶片中，最后以凋落物的形式对水体提供 OC^[48]，因此湖泊内存在 C3 植物的少量贡献（图 4.5）。

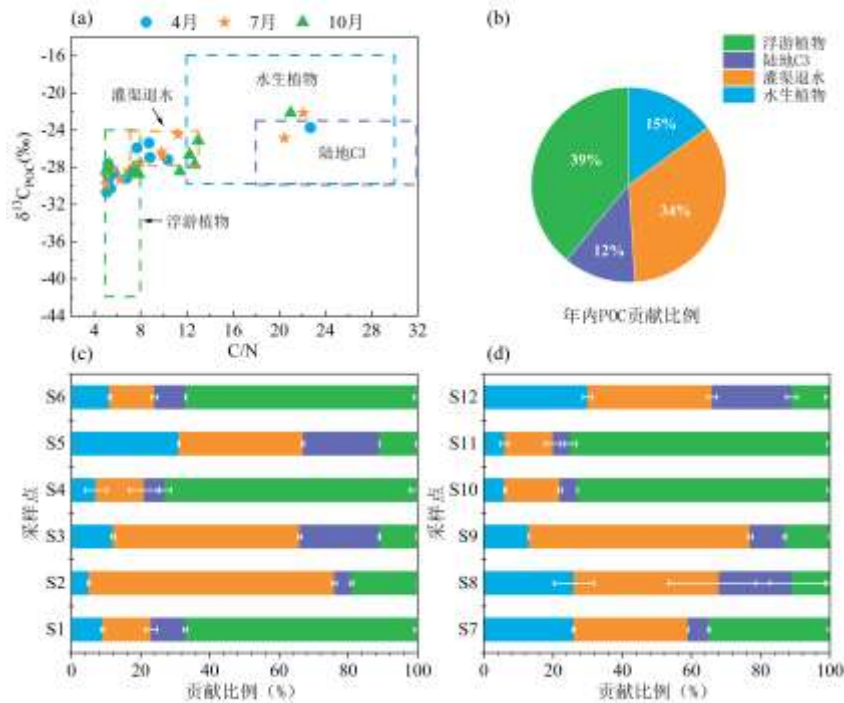


图 7 乌梁素海 POC 来源定性与定量解析。(a) C/N 与碳同位素散点图；(b) 4 种贡献端元对 POC 的年内平均贡献比例；(c)、(d) 4 种贡献端元在各采样点的贡献比例（白色实线代表标准误差棒）

Fig. 7 Qualitative and quantitative analysis of POC sources. (a) Scatter plot of C/N ratio and carbon isotope; (b) Annual average contribution ratio of four contributing end-members to POC; (c), (d) Contribution ratios of the four contributing end-members at each sampling site (white solid lines represent error bars)

湖区内各采样点所处区域 POC 贡献来源空间分布差异显著，其中，S1、S4、S6、S10 和 S11 点均以浮游植物贡献为主，贡献比例高达 60% 以上。S1 点位于湖区最南部点位，该区域水体为开放水域，没有水草，且灌渠退水是从湖泊北部流入，因此该区域水生植物与灌渠退水的贡献率较小，主要由浮游植物主导该区域的水环境变化及 POC 来源；S4、S6、S10 与 S11 位于沉水植物与黄苔生长密集的区域，沉水植物在生长过程中会吸收大量的营养物质，同时，其也会通过根茎和茎叶的分泌作用，向水体释放一些有机物质，这些有机物质可以作为浮游植物的营养来源，促进浮游植物的生长和繁殖^{[49][50]}。S2、S3、S8 和 S9 均以灌渠退水贡献为主，这些点位分布在湖心处与湖泊北部，在退水从北部流入乌梁素海后，其中的 POC

或者停留在北部，或者在随着水流向南运移的过程中，被湖心处大片生长的芦苇截停在此处，导致了湖心与北部的 POC 来自于灌渠退水的来源比例增加。POC 来源相较于 DOC 更为复杂，其受灌渠退水与湖泊内部初级生产力共同影响，整体表现为内外源混合贡献的特点。

3.2 乌梁素海水体无机碳来源识别

4 月份湖泊 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值 (-14‰~-2‰) 介于土壤有机质溶解和大气交换区间内 (图 8a)，基于碳同位素二元混合模型，乌梁素海 4 月 DIC 的主要来源为土壤有机质降解 (端元 A) 和大气交换 (端元 B)，贡献率分别为 92.7% 和 7.3%，此时湖泊没有外部水源补给，湖内的 DIC 主要由湖底的有机质提供，土壤中的微生物 (细菌和真菌) 在分解有机物质的过程中，通过矿化作用将 OC 转化为 CO_2 释放到水体中^[51]，这一过程是土壤有机质转化为 DIC 的主要途径之一。在 7 月份，受到灌渠退水的影响，大部分 DIC 随着渠道进入乌梁素海加之气温和营养水平升高，微生物群落多样性和生物量增加^[52]，其通过自身的呼吸作用释放 CO_2 增加水体中无机碳浓度水平^[53]，DIC 的主要来源为灌渠退水和生物活动，贡献率分别为 74.1% 和 25.9%。至 10 月份，除灌渠退水的持续影响外，大气交换成为湖泊 DIC 的来源之一，原因在于秋季乌梁素海水体中 PCO_2 小于大气水平，导致了大气向湖内输送 CO_2 ^[44]，灌渠退水和大气交换的贡献分别占比 71.9% 和 28.1%。DIC 的来源在不同季节表现出明显的差异，除灌渠退水外，土壤有机质降解、生物活动与大气交换也是其重要来源，这指示了乌梁素海 DIC 生长的季节性变化特点。

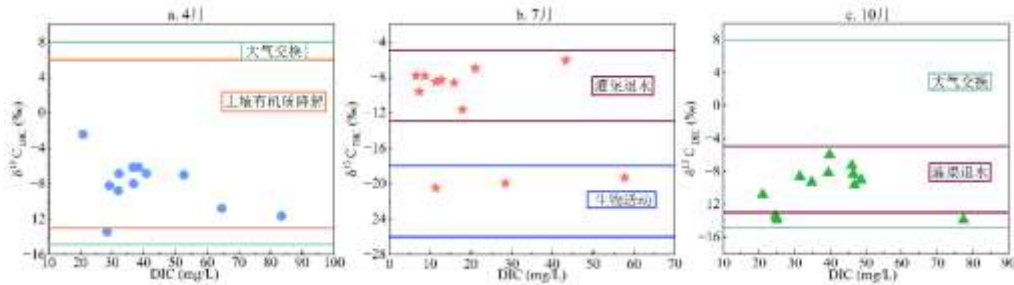


图 8 乌梁素海 DIC 来源定性分析

Fig. 8 Characterisation of DIC sources in Lake Ulansuhai

乌梁素海 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 显著的正相关表明 (图 7b)，PIC 很大程度上来自于内源沉淀过程。PIC 主要由流域中碳酸盐岩的物理风化形成的碎屑及水体内部次生沉淀组成^[54]，河流和湖泊中浮游植物和细菌都会诱导湖泊内部 PIC 的产生，但二者诱导机制不同，产生的 PIC 沉淀形态也存在差异^[55]。当水体环境有利于 PIC 沉淀生成时，水体中 CO_3^{2-} 等离子是生成 PIC 的主要离子，方解石等 PIC 在沉淀过程中只产生较小的碳同位素的分馏，这决定了水体中的内源性 PIC 会继承水体中原有的 DIC 碳同位素组成信号，最终会导致两者呈正相关^[56]，也就是说，当水体中 PIC 为内生沉淀时，水体中 PIC 碳同位素组成主要受 DIC 同位素组成控制。为了验证这一结果，我们对比了 PIC 浓度与 C/N 比、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的关系，结果发现 PIC 随着 C/N 的减小而增加 (图 7a) 且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 呈显著的正相关关系 ($r=0.62, p<0.01$)，这说明在湖泊中的有机碳指示为内源性时，PIC 会通过内部的循环及沉淀产生，并且 PIC 同位素信号很大程度上继承了水体中原有的 DIC 同位素信号。乌梁素海水体 pH 平均值为 8.16 ± 0.46 ，碱性环境显著促进 CO_3^{2-} 的生成，符合碳酸盐化学沉淀的热力学条件，且 PIC 浓度高值区与高 pH、高初级生产力区域空间上显著重叠 (图 7c, d)，这是由于藻类光合作用消耗 CO_2 而导致 pH 升高最终促进碳酸盐沉淀的生物学驱动^{[54][56]}。此外，当湖泊中 PIC 为外源时，其主要来源为湖泊流域内同位素组成相对偏正的碳酸盐岩风化碎屑，来源于海相碳酸盐岩的碳同位素组成均值一般为 0‰ 左右^[57]，而乌梁素海水体内部的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ 分布范围为 -8.72‰~-1.56‰，均值 $-4.82\pm 0.31\%$ ，与碳酸盐岩风化形成的 PIC 同位素 (约 0‰) 组成相比较为偏负，进一步说明了在乌梁素海内源性 PIC 是水体中 PIC 的主要来源之一。

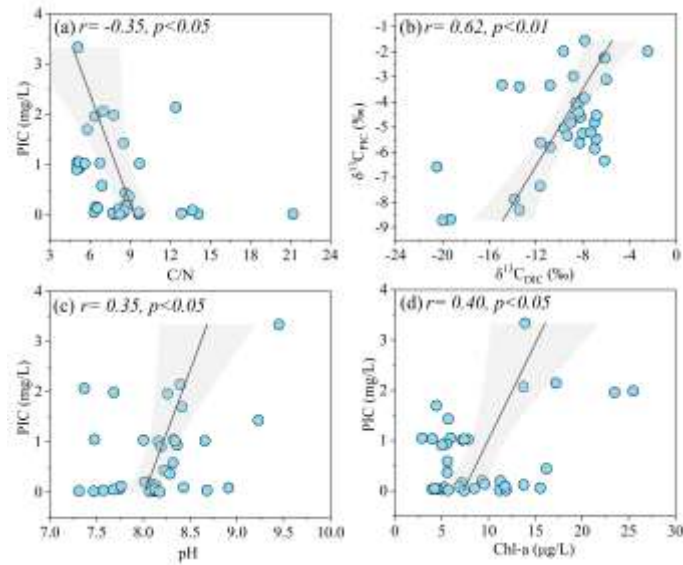


图 9 PIC 与 C/N (a)、pH (c)、Chl-a (d)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (b) 的皮尔逊相关性分析
Fig. 9 Pearson correlation analysis between PIC and C/N (a), pH (c), Chl-a (d), $\delta^{13}\text{C}_{\text{PIC}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (b)

3.3 湖泊有机碳与无机碳驱动机制

Chl-a 与 TN 共同对 DOC 产生正向影响 (表 4)，Chl-a 是藻类生物量的重要指标，藻类在进行光合作用和生长代谢过程中会产生各种有机物质，如多糖、蛋白质、脂类等，这些有机物质一部分会以溶解性有机碳的形式释放到水体中^[58]，随着藻类生物量增大，其代谢产物也相应增多，从而导致水体中 DOC 含量增加。在太湖等富营养化湖泊中，藻类等浮游生物已被证实是 DOC 的重要来源，其占比可达 DOC 总量的 40%~60%^{[59][60]}。本研究观测到的 Chl-a 对 DOC 的正向贡献 ($R^2=0.662$, $p<0.001$) 与上述机制一致，表明乌梁素海藻华期间藻类代谢活动对 DOC 的贡献不容忽视。TN 是藻类生长所必需的营养元素之一，当湖泊中 TN 含量增加时，会为藻类的生长提供充足的氮源，促进藻类大量繁殖。与此同时，藻类在生长过程中会吸收和利用水体中的氮，同时也会通过自身的代谢活动影响氮的形态和转化，其转化过程也会影响 DOC 的产生和分解^[61]，二者之间密切的相互作用也决定了它们在湖泊中共同促进 DOC 生长的结果。在湖泊生态系统中，浮游植物和微生物的生长可能同时依赖多种氮源 (如 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$)，TN 能更全面地反映水体的氮营养负荷，而单一的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 仅代表可直接利用的无机氮之一^[62]，无法涵盖其他形态氮的贡献。由于模型倾向于保留对因变量解释力更强的变量，TN 因涵盖更多氮形态，通常能解释更多有机碳的变异，而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的独立贡献可能被 TN 吸收。因此，尽管 TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有良好的线性关联 ($r=0.55$, $p<0.05$)，但 TN 成为主要影响因子而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 未被优先识别。

SD 对 POC 有负向影响，而 TN 与 SPM 对 POC 产生积极影响 (表 4)。前文已提到，乌梁素海 POC 主要由内源浮游植物贡献，浊度主要由悬浮颗粒物 (如泥沙、浮游生物残骸等) 引起，其增加会显著降低水体 SD。光照是浮游植物光合作用的必需条件，而浊度升高会削弱水下光强，导致浮游植物可利用的光合有效辐射 (PAR) 减少^{[63][64]}，进而导致 POC 含量相对较低。TN 对于水体中有机碳的重要性不言而喻，其在水体中可以为浮游植物等生物提供氮源，促进浮游植物的生长，浮游植物在生长过程中会通过光合作用吸收二氧化碳并合成有机物质，其中一部分以 POC 的形式存在。SPM 对 POC 的影响主要体现在吸附作用上，SPM 可以吸附水体中的有机物质^[65]，这种吸附作用可以使 POC 在 SPM 表面聚集，从而增加 POC 在水体中的稳定性和浓度。其次，SPM 包含有机悬浮物 and 无机悬浮物，湖泊中的 POC 作为有机悬浮物 (OSM) 的重要组成部分，POC 与 SPM 具有一定的物质组成关联性，这使得 SPM 含量的增大能够同步提升 POC 含量^[66]。此外，我们通过 Chl-a 与 SPM 的比值 (Chl-a/SPM)，估算生物源性颗粒占比 (Bio-

SPM)^[67]。结果表明：北部湖区 Bio-SPM 平均占比为 46±48%，而湖区南部非生物颗粒主导 SPM(占比>70%)，抑制浮游植物光合作用，导致 POC 生产受限。

表 4 DOC 与 POC 回归分析模型参数与系数统计分析

Tab.4 Statistical analysis of parameters and coefficients of DOC and POC regression analysis models.

模型	参数	p	VIF	模型方程	R ²	DW
DOC	常量			DOC=0.442X _{Chl-a} +3.016X _{TN} +2.619	0.662	2.139
	Chl-a	0.000	1.400			
	TN	0.001	1.400			
POC	常量			POC=3.979X _{TN} +0.460X _{SPM} -6.677X _{SD} +10.615	0.566	2.171
	SD	0.005	1.326			
	TN	0.002	1.066			
	SPM	0.025	1.283			

入湖口分布、水流方向与沉积再悬浮共同导致了乌梁素海 DOC 与 POC “北高南低”的空间格局。北部的高强度输入有利于有机碳的积累，大量农业退水和生活污水从北部进入湖泊^[68]，其中携带的溶解性化肥、溶解性有机物等直接增加水体 DOC 浓度，与此同时，农田侵蚀产生的泥沙以及生活排污中的 SPM，为北部湖区提供了丰富的 POC^[31]。而南部靠近退水渠，受出水口流动和风浪扰动影响，POC 易发生再悬浮并被输出至黄河，导致水体 POC 浓度降低；DOC 虽溶解性高，但因其溶解态更易被长距离输送，但受稀释作用影响仍呈下降趋势。

NH₄⁺-N 是对 DIC 产生主要影响的唯一因子，其对 DIC 有积极影响。DIC 的来源较有机碳更为复杂，影响因素也更为繁多，其中有机质矿化作用是 DIC 形成过程中的一个重要环节，藻类在矿化过程中会释放出大量的溶解态有机氮，在微生物的作用下会逐渐被降解为无机氮，而 NH₄⁺-N 在其中的含量高达 90%^[69]。在藻类等浮游植物生长最旺盛的 7 月，水体中的氨化微生物会将浮游植物死亡后产生的有机质通过脱氨基作用产生 NH₄⁺-N，在这个过程中，也伴随着 CO₂ 的大量产生^[70]，因此 DIC 与 NH₄⁺-N 较好的拟合度 (R²=0.370, p<0.001) 说明 DIC 来源与藻类矿化过程密切相关。NH₄⁺-N 还可通过驱动硝化、呼吸等过程来影响 pCO₂^[71]，水-气界面的气体交换方向和速率很大程度上由水体内部的 pCO₂ 决定，NH₄⁺-N 对 DIC 的影响还表现在部分季节大气交换端元对 DIC 的贡献。此外，灌渠退水作为 DIC 的主要来源之一，其往往同时携带了 DIC 与来自肥料、土壤有机质降解产生的 NH₄⁺-N，这会导致 DIC 与 NH₄⁺-N 浓度可能同时升高，表现出强烈的相关性。

TN 与 pH 共同对 PIC 产生积极影响 (表 5)，pH 值的变化会影响水体中碳酸盐体系的平衡，进而影响 PIC 的浓度，CO₂ 浓度通常会直接影响水体的 pH 值，这是因为 CO₂ 会通过与水反应释放 H⁺ 来增加水体的酸性，当 CO₂ 的浓度低时，水体酸性减弱，导致 pH 值相应地升高^[72]。在生物量最高的 7 月，浮游植物在光合作用下对 CO₂ 的利用率极高^[73]，相应的乌梁素海在 7 月出现了 pH 的最高值 (pH=9.47±0.13)，这导致了碳酸盐平衡体系向右偏移，生成更多的 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻，进而为 PIC 的产生提供了条件，因此在 7 月份 PIC 达到了最大值。与此同时，较高的 TN 含量促进了更多藻类生长繁殖，光合作用的增强会进一步影响水体中的酸碱平衡，进而促进更多的 PIC 在此条件下沉淀出来。

表 5 DIC 与 PIC 回归分析模型参数与系数统计分析

Tab.5 Statistical analysis of parameters and coefficients of DIC and PIC regression analysis models

模型	参数	p	VIF	模型方程	R ²	DW
DIC	常量			DIC=18.293X _{NH4-N} +18.985	0.370	2.206
	NH ₄ -N	0.000	1.000			
PIC	常量			PIC=0.894X _{TN} +0.521X _{pH} -4.830	0.573	1.935
	TN	0.000	1.006			
	pH	0.011	1.006			

4. 结论

本研究旨在分析灌区富营养化湖泊乌梁素海水体中有机碳与无机碳的动态及来源,并揭示其环境驱动机制。具体结论如下: 1、乌梁素海水体中四种形态碳中除 PIC 表现出明显的时间变化特征外,其余三种形态碳在时间变化上均未发现明显差异,空间上,DOC 与 POC 均呈现由北向南浓度逐渐降低的分布特点,而无机碳则无显著差异。2、乌梁素海水体不同形态碳来源在时空上的差异主要受灌渠退水与湖泊初级生产力控制,DOC 的主要来源是灌渠退水(72%),POC 的主要来源是浮游植物(39%),DIC 在 4 月主要来源于土壤有机质矿化(92.7%),7 月和 10 月主要来源是灌渠退水,分别贡献了 74.1%与 71.9%,PIC 则主要来自于湖泊内源沉淀过程。3、多元线性回归分析结果表明,Chl-a 与 TN 是 DOC 的主要驱动因子;SD、TN 与 SPM 共同解释 POC 浓度变化;NH₄⁺-N 是 DIC 动态的核心调控因子;TN 与 pH 值对 PIC 形成具有双重促进作用。乌梁素海不同形态碳动态及来源受灌溉退水影响强烈,探究灌区尾闾湖有机碳、无机碳的动态平衡及来源,有助于揭示区域碳循环的关键环节。未来需结合多区域对比与温室气体通量监测,明确灌区湖泊在全球碳循环中的差异化角色,并为农业优化管理提供科学支撑。

5 参考文献

- [1] Meybeck M. Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated From River Dissolved Loads. *American Journal of Science*, 1987, **287**(5): 401-428. DOI:10.2475/ajs.287.5.401.
- [2] Regnier P, Resplandy L, Najjar RG *et al.* The land-to-ocean loops of the global carbon cycle. *Nature*, 2024, **603**: 401-410. DOI:10.1038/s41586-021-04339-9.
- [3] Stimson A G, Allott T E H, Boulton S *et al.* Reservoirs as hotspots of fluvial carbon cycling in peatland catchments. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**(FEB.15): 398-411. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.11.193.
- [4] Xiao QT, Liao YS, Liu ZJ *et al.* Characteristics of dissolved organic carbon in algal-dominated lake and its influence on methane emission. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, 2022, **14**(1): 21-31. DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2022.01.003. [肖启涛, 廖远珊, 刘臻婧, 等. 藻型湖泊溶解有机碳特征及其对甲烷排放的影响. 南京信息工程大学学报, 2022, **14**(1): 21-31.]
- [5] Wang Y, Zhou WJ, Cheng P. Sources analysis of dissolved organic carbon in water using carbon isotope method. *Journal of Earth Environment*, 2020, **11**(4): 435-446. DOI: 10.7515/JEE192050. [王亚, 周卫健, 程鹏. 碳同位素方法在水体溶解有机碳来源解析中的应用. 地球环境学报, 2020, **11**(4): 435-446.]
- [6] Geng Y, Lv XX, Yu RH *et al.* Isotopic characteristics and sources of organic carbon in suspended particulates and sediments in Lake Wuliangsu. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(6): 1753-1765. DOI:10.18307/2021.0612. [耿悦, 吕喜玺, 于瑞宏, 等. 乌梁素海悬浮颗粒物和沉积物有机碳同位素特征及来源. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1753-1765.]
- [7] Xu XG, Wu C, Xie DY *et al.* Sources, migration, transformation, and environmental effects of organic carbon in eutrophic lakes: a critical review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, **20**(1): 860. DOI: 10.3390/ijerph20010860.
- [8] Zigar PK. Sources, biogeochemical cycling, and fate of organic matter in Lake Superior: An investigation using natural abundance radiocarbon and stable isotopes. University of Minnesota, 2013.
- [9] Ran LS, Lu XX, Sun HG *et al.* Spatial and seasonal variability of organic carbon transport in the Yellow River, China. *Journal of Hydrology*, 2013, **498**: 76-88. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.018.
- [10] Butman DE. Labiality, Structure and Delta Carbon-14 Isotope Changes in Dissolved Organic Carbon Entering Coastal Water of North America. Yale University, 2012.
- [11] Zhang YY, Li XY, Shi FZ *et al.* Spatiotemporal variability of dissolved carbon and sources of dissolved inorganic carbon influenced by freeze-thaw and subsurface flow in an alpine headwater catchment of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2024, **640**: 131740. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131740.
- [12] Mariana VS, Alcocer J, Puche E, *et al.* Abiotic processes control carbon dioxide dynamics in temperate karst lakes. *PeerJ*, 2024, **12**: e17393. DOI:10.7717/peerj.17393.
- [13] Xu P, Bian JM, Li YH *et al.* Characteristics of fluoride migration and enrichment in groundwater under the influence of natural background and anthropogenic activities. *Environmental pollution*, 2022, **314**: 120208. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120208.

- [14] Wang XJ, Wang JP, Xu MG *et al.* Carbon accumulation in arid croplands of northwest China: pedogenic carbonate exceeding organic carbon. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 11439. DOI: 10.1038/srep11439.
- [15] Yao C, Wang Q, Jiang X *et al.* Review of lake ecosystem's characteristics of carbon sink and potential value on carbon neutrality. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43** (3): 893-909. DOI: 10.5846/stxb202112283680. [姚程,王谦, 姜霞, 等. 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**(3): 893-909.]
- [16] Du YX, Chen FZ, Zhang YL *et al.* 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.
- [17] Li XW, Yu RH, Wang J, *et al.* Greenhouse gas emissions from Daihai Lake, China: Should eutrophication and salinity promote carbon emission dynamics?. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, **135**(1): 407-423. DOI:10.1016/j.jes.2022.12.021.
- [18] Zhan CL, Wan DJ, Han YM, *et al.* Sources and factors influencing lacustrine carbon burial over the last century: case study of Yinjia Lake, central China. *Journal of Paleolimnology*, 2024, **72**(3): 283-298. DOI:10.1007/s10933-024-00326-y.
- [19] Song KS, Wen ZD, Shang YX *et al.* Quantification of dissolved organic carbon (DOC) storage in lakes and reservoirs of mainland China. *Journal of environmental management*, 2018, **217**: 391-402.
- [20] Hammer KJ, Kragh T, Sand JK. Inorganic carbon promotes photosynthesis, growth, and maximum biomass of phytoplankton in eutrophic water bodies. *Freshwater Biology*, 2019, **64**(11): 1956-1970. DOI: 10.1111/fwb.13385.
- [21] Zhang NX, Song JM, He ZP. Biogeochemical mechanism of particulate organic carbon (POC) variations in seawaters, *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(7): 2328-2339. DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2006.07.037. [张乃星, 宋金明, 贺志鹏. 海水颗粒有机碳 (POC) 变化的生物地球化学机制. 生态学报, 2006, **26**(7): 2328-2339.]
- [22] Caddy JF, Bakun A. A tentative classification of coastal marine ecosystems based on dominant processes of nutrient supply. *Ocean & Coastal Management*, 1994, **23**(3): 201-211. DOI:10.1016/0964-5691(94)90019-1.
- [23] Zhang RX, Zhong YQ, Yang W, *et al.* Biochar addition enhances annual carbon stocks and ecosystem carbon sink intensity in saline soils of the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. *Plant, Soil & Environment*, 2024, **70**(5): 263-275. DOI:10.17221/121/2023-PSE.
- [24] Wu J, Ma L, Yu H *et al.* Sediment geochemical records of environmental change in Lake Wuliangsu, Yellow River Basin, north China. *Journal of Paleolimnology*, 2013, **50**(2): 245-255. DOI:10.1007/s10933-013-9718-6.
- [25] Cao C, Li N, Yue W *et al.* Analysis of the Interaction between Lake and Groundwater Based on Water-Salt Balance Method and Stable Isotopic Characteristics. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(19): 12202. DOI: 10.3390/ijerph191912202.
- [26] Mao XF, Wei XY, Yuan DH *et al.* An ecological-network-analysis based perspective on the biological control of algal blooms in Ulansuhai Lake, China. *Ecological Modelling*, 2018, **386**: 11-19. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2018.07.020
- [27] Wu Y, Shi X, Li C *et al.* Simulation of Hydrology and Nutrient Transport in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China. *Water*, 2017, **9**(3): 169. DOI: 10.3390/w9030169.
- [28] Beaudoin CP, Prepas EE, Tonn WM *et al.* A stable carbon and nitrogen isotope study of lake food webs in Canada's Boreal Plain. *Freshwater Biology*, 2001, **46**(4): 465-477. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2001.00688.x.
- [29] Zhang Y, Shi P, Li FD *et al.* Quantification of nitrate sources and fates in rivers in an irrigated agricultural area using environmental isotopes and a Bayesian isotope mixing model. *Chemosphere*, 2018, **208**: 493-501.
- [30] Liu D, Du YX, Yu SJ *et al.* Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River. *WATER RESEARCH*, 2019, **168**:115132. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115132.
- [31] Geng Y, Lv XX, Yu RH *et al.* Isotopic characteristics and sources of organic carbon in suspended particulates and sediments in Lake Wuliangsu. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(6): 1753-1765. DOI: 10.18307/2021.0612. [耿悦, 吕喜玺, 于瑞宏, 等. 乌梁素海悬浮颗粒物和沉积物有机碳同位素特征及来源. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1753-1765.]
- [32] Wang XH, Fang Y, Ma WJ *et al.* Seasonal Variation of Nitrate Sources in Wuliangsu Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(5): 1091-1098. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.11.15. [王希欢, 杨芳, 马文娟, 等. 乌梁素海硝酸盐来源的季节性变化. 环境科学研究, 2021, **34**(5): 1091-1098.]

- [33] Ma L, Wu JL. Environmental Significance from Organic Carbon and Its Isotope of Angulinao Lake Sediment. *Journal of Natural Resources*, 2009, **24**(6): 1099-1104. DOI: 10.11849/zrzyxb.2009.06.017. [马龙, 吴敬禄. 安固里淖湖积物中总有机碳含量及其碳同位素的环境意义. *自然资源学报*, 2009, **24**(6): 1099-1104.]
- [34] Thornton SF, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, **38**(3): 219-233. DOI: 10.1006/ecss.1994.1015.
- [35] Liu KK, Kao SJ, Wen LS *et al.* Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter and biogeochemical processes in the eutrophic Danshuei Estuary in northern Taiwan. *Science of the Total Environment*, 2007, **382**(1): 103-120. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.04.019.
- [36] Machiwa JF. Stable carbon and nitrogen isotopic signatures of organic matter sources in near-shore areas of Lake Victoria, East Africa. *Journal of Great Lakes Research*, 2010, **36**(1): 1-8. DOI: 10.1016/j.jglr.2009.11.005.
- [37] Jin Y, Yu RH, Zhang ZZ *et al.* Spatiotemporal variability of phytoplankton functional groups in a shallow eutrophic lake from cold, arid regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(6): 371. DOI:10.1007/s10661-020-08349-4.
- [38] He YX, Zhao QF, Sun DY. Unique distribution pattern and $\delta^{13}\text{C}$ signature of des-A-triterpenoids from Lake Wuliangsu: source and paleoenvironmental implications. *Organic Geochemistry*, 2022, **174**: 104509. DOI:10.1016/j.orggeochem.2022.104509.
- [39] Wang ZC, Yang F, Yang WH *et al.* Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia. *Environmental Science*. **41**(10): 4590-4598. DOI: 10.13227/j.hjxx.202003259. [王志超, 杨帆, 杨文焕等. 内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4590-4595.]
- [40] Lei YB, Yao TD, Sheng YW *et al.* Characteristics of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in lakes on the Tibetan Plateau and its implications for the carbon cycle. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(4): 535-543. DOI:10.1002/hyp.8152.
- [41] Campeau A, Wallin M B, Giesler R *et al.* Multiple sources and sinks of dissolved inorganic carbon across Swedish streams, refocusing the lens of stable C isotopes. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 9158. DOI:10.1038/s41598-017-09049-9.
- [42] Liu WG, Li XZ, Wang Z *et al.* Carbon isotope and environmental changes in lakes in arid Northwest China. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2019, **49**(8): 1182-1196. DOI: 10.1360/N072018-00026. [刘卫国, 李祥忠, 王政, 等. 西北干旱区湖泊碳同位素与环境变化. *中国科学: 地球科学*, 2019, **49**(8):15.]
- [43] Wang CY, Guo QJ, Zhu GX, *et al.* Applying stable carbon isotope techniques to detect different sources of organic matters in lake sediments from Beijing parks. *Journal of Ecology*, 2014, **33**(3): 778-785. DOI: CNKI:SUN:STXZ.0.2014-03-032. [王春雨, 郭庆军, 朱光旭, 等. 稳定碳同位素技术在北京市公园湖泊沉积物有机质来源分析与评价中的应用. *生态学杂志*, 2014, **33**(3): 778-785.]
- [44] Wang Y, Yang WZ, Jiao Y *et al.* Quantitative analysis of dissolved carbon sources in the farmland artificial ditch drainage-Lake UlanSuhai continuum in the Hetao Irrigation District's, Inner Mongolia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, **55**: 101910. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101910.
- [45] Sun X, Li X, Gou MM. Phytoplankton Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors before and after Freezing and Thawing in Wuliangsu Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(4): 812-821. DOI: CNKI:SUN:TRYJ.0.2019-04-021. [孙鑫, 李兴, 勾芒芒. 乌梁素海冻融前后浮游植物群落结构特征及其影响因素分析. *生态环境学报*, 2019, **28**(4): 812-821.]
- [46] Wang YY, Zhai WD, Wu C *et al.* Exploring contribution of phytoplankton cell death to settleable particulate organic carbon in the East China Sea in spring. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, **201**: 116197. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116197.
- [47] Shi J, Wang BL, Wang FS *et al.* Sources and fluxes of particulate organic carbon in the Wujiang cascade reservoirs, southwest China. *Inland Waters*, 2018, **8**(2): 141-147.
- [48] Zhu YC, Zhao XY, Lian J *et al.* Differences in soil total organic carbon under different land-use patterns in the Hetao Irrigation Region. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(1): 158. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201601.021. [朱阳春, 赵学勇, 连杰, 等. 河套灌区不同土地利用方式下土壤有机碳的差异. *生态学杂志*, 2016, **35**(1): 158-163.]
- [49] Yao Y, He F, Hu SH *et al.* Effects of allelopathy of submerged macrophytes on the phytoplankton community collected from the west

- part of the West Lake wetland in Hangzhou, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(4): 971-978. DOI: 10.5846/stxb201407031369. [姚远, 贺锋, 胡胜华, 等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响. *生态学报*, 2016, **36**(4): 971-978.]
- [50] Xue P, Lin QW, Liu BY *et al.* Effect of submerged plant coverage on phytoplankton community dynamics and photosynthetic activity in situ. *Journal of environmental management*, 2022, **301**:113822. DOI:10.1016/j.jenvman.2021.113822.
- [51] Freeman C, Fenner N, Ostle NJ *et al.* Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels. *Nature*, 2004, **430**(6996): 195-198. DOI: 10.1038/nature02707.
- [52] Kang XH, Liu X, Liu SS *et al.* Distribution Patterns and Drivers of Soil Microbial Communities at Different Spatiotemporal Scales: A Review. *Soils*, 2024, **56**(4): 689-696. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.04.001. [康小虎, 刘鑫, 刘姗姗, 等. 不同时空尺度下土壤微生物群落分布及驱动因素研究进展. *土壤*, 2024, **56**(4): 689-696.]
- [53] Kuzyakov Y. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2010, **165**(4): 66-70. DOI: 10.1002/1522-2624(200208)165:4<382::AID-JPLN382>3.0.CO;2-#.
- [54] Li Y, Meng F, Wang B *et al.* Regulation of particulate inorganic carbon by phytoplankton in hydropower reservoirs: Evidence from stable carbon isotope analysis. *Chemical Geology*, 2021, **579**(7478): 120366. DOI:10.1016/j.chemgeo.2021.120366.
- [55] Dittrich M, Obst M. Are Picoplankton Responsible for Calcite Precipitation in Lakes?. *Ambio*, 2004, **33**(8): 559-564. DOI: 10.1639/0044-7447(2004)033[0559:APRFCP]2.0.CO;2.
- [56] Zhang JL, Wang HJ, Liu ZH *et al.* Spatial-temporal variations of travertine deposition rates and their controlling factors in Huanglong Ravine, China - A world's heritage site. *Applied Geochemistry*, 2012, **27**(1): 211-222. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.10.005.
- [57] Suchet PA, Aubert D, Probst JL *et al.* $\delta^{13}\text{C}$ pattern of dissolved inorganic carbon in a small granitic catchment: The Strengbach case study (Vosges mountains, France). *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 129-145. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00037-6.
- [58] Sun W, Wu WG, Liu Y *et al.* The Effects of Temperature, Light Intensity, and Photoperiod on the Organic Carbon Release Rate of *Sargassum horneri* Seaweed. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, **45**(3): 46-54. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20230309002. [孙威, 吴文广, 刘毅, 等. 温度、光照强度和光照周期对铜藻有机碳释放速率的影响. *渔业科学进展*, 2024, **45**(3): 46-54.]
- [59] Huang CC, Liu YM, Liu G, *et al.* Tracing high time-resolution fluctuations in dissolved organic carbon using satellite and buoy observations: Case study in Lake Taihu, China. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2017, **62**: 174-182. DOI:10.1016/j.jag.2017.06.009.
- [60] Liu H, Wang QL, Yu X *et al.* Analysis of the sources of dissolved organic carbon in Reservoirs in Karst Areas during Summer and Estimation of input fluxes. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(8): 383-392. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2024.0154. [刘浩, 王琴淋, 于霞, 等. 喀斯特地区水库夏季溶解性有机碳来源解析及输入通量估算. *环境科学学报*, 2024, **44**(8): 383-392.]
- [61] Zhang PY, Yan ZW, Zhong XS *et al.* Transformation and migration of nitrogen forms during the growth-decay of *Ulva Prolifera*. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 10. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0234. [张鹏燕, 严振伟, 钟晓松, 等. 浒苔生长-衰亡过程中氮形态的迁移转化过程. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 1967-1976.]
- [62] 吴亚平, 贾非, 侯睿, 等. 海洋硅藻对不同氮源及氮磷比的生理学响应. *江苏海洋大学学报:自然科学版*, 2023, **32**(2): 30-38.
- [63] Kim J, Lee S. Spatio-Temporal Variations in Organic Carbon Composition Driven by Different Major Phytoplankton Communities in the Ross Sea, Antarctica. *Goldschmidt2022 abstracts*, 2022, **891**: 164666. DOI: 10.46427/gold2022.13279.
- [64] Lin QY, Feng ZX, Wang YH *et al.* Light attenuation parameterization in a highly turbid mega estuary and its impact on the coastal planktonic ecosystem. *Frontiers in Marine Science*, 2024, **11**: 1486261.
- [65] Jiang YB, Ji HB. Isotopic indicators of source and fate of particulate organic carbon in a karstic watershed on the Yunnan-Guizhou Plateau. *Applied geochemistry*, 2013, **36**: 153-167. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2013.06.005.
- [66] Lyu H, Wang YN, Jin Q *et al.* Developing a semi-analytical algorithm to estimate particulate organic carbon (POC) levels in inland eutrophic turbid water based on MERIS images: A case study of Lake Taihu. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2017, **62**: 69-77. DOI: 10.1016/j.jag.2017.06.001.
- [67] Xue K, Ma RH, Shen M *et al.* Variations of suspended particulate concentration and composition in Chinese lakes observed from Sentinel-3A OLCI images. *Science of The Total Environment*, 2020, **721**: 137774. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137774.
- [68] Zhou L, Zhang X, Jin CW *et al.* Characteristics and control measures of farmland drainage pollution in Hetao Irrigation District,

Inner Mongolia. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, **14**(5): 1599-1607. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20240250. [周丽, 张旭, 靳存旺, 等. 内蒙古河套灌区农田排水污染特征及防控措施. 环境工程技术学报, 2024, **14**(5): 1599-1607.]

- [69] Shang LX, Ke F, Li WC *et al.* Laboratory research on the contaminants release during the anaerobic decomposition of high-density cyanobacteria. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(1): 47-54. DOI:10.18307/2013.0107. [尚丽霞, 柯凡, 李文朝, 等. 高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 47-54.]
- [70] Yan XC, Wang MY, Xu XG *et al.* Migration of carbon, nitrogen and phosphorus during organic matter mineralization in eutrophic lake sediments. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 306-313. DOI: 10.18307/2018.0203. [闫兴成, 王明玥, 许晓光, 等. 富营养化湖泊沉积物有机质矿化过程中碳、氮、磷的迁移特征. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 306-313.]
- [71] Zhu LF, Chen XL. Research progress on the mechanism and applications of nitrate respiration and anaerobic ammonium oxidation. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2021, **33**(4): 428-437. DOI:10.13376/j.cbbs/2021047. [朱凌峰, 陈雪岚. 硝酸盐呼吸和厌氧氨氧化的机制及其应用研究进展. 生命科学, 2021, **33**(4): 428-437.]
- [72] McElligott S, Byrne RH, Lee K *et al.* Discrete water column measurements of CO₂ fugacity and pHT in seawater: A comparison of direct measurements and thermodynamic calculations. *Marine Chemistry*, 1998, **60**(1-2): 63-73. DOI: 10.1016/S0304-4203(97)00080-7.
- [73] Wang X, Yin Z, Chen JL *et al.* Phytoplankton carbon utilization strategies and effects on carbon fixation. *Water*, 2023, **15**(11): 2137. DOI: 10.3390/w15112137.