

高 颢,周 刚,STEINER M,等. 内蒙古呼伦湖北岸软沉积物中微生物与无机碳的相互作用及其生物地球化学意义[J]. 地球科学与环境学报,2025,47(6):1015-1027.

GAO Xiao,ZHOU Gang,STEINER M,et al. Microbial-inorganic Carbon Interactions of Soft Sediments in the Northern Shore of Hulun Lake,Inner Mongolia,China and Their Biogeochemical Significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2025,47(6):1015-1027.

DOI:10.19814/j.jese.2025.05001

内蒙古呼伦湖北岸软沉积物中微生物与无机碳的相互作用及其生物地球化学意义

高 颢^{1,2,3,4*},周 刚⁴,Michael STEINER^{1,2},韩作振^{1,2,3†}

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院,山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室,山东 青岛 266590;

3. 青岛海洋科技中心 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东 青岛 266237;

4. 山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:微生物作为湖泊沉积物碳矿化的核心驱动力,主导有机质降解、无机碳转化与碳酸盐沉淀等关键生物地球化学过程,但其在湖泊碳汇形成中的作用研究仍不充分。以内蒙古呼伦湖为研究区域,综合运用 16S rRNA 测序、碳组分分析、水化学分析,并结合扫描电镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X 射线衍射(XRD)及拉曼光谱等多种技术手段对沉积物与水样进行系统分析,最后基于分子动力学模拟探讨微生物驱动无机碳沉淀的路径机制。结果表明:内蒙古呼伦湖属于淡水湖泊,其沉积物中存在丰富的微生物群落,主要包括 *BD2-11_terrestrial_group*、*Halomonas* 和 *Nitrolancea* 等菌属及藻类微生物;沉积物中无机碳(IC)含量、总碳(TC)和总有机碳(TOC)随深度的增加而增加,表现出明显的垂向分布趋势;无机碳的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)为 -19.16‰ ~ -11.39‰ ,整体偏负,暗示沉积碳酸盐矿物可能源自生物代谢产生的 CO_2 ;矿物学分析均识别出典型的碳酸盐矿物特征峰,如方解石和白云石;在含有富里酸的有机矿化体系中, CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 更易形成尺寸更大的团簇,且聚集过程明显快于无机矿化体系。

关键词:生物地球化学;沉积物;无机碳;微生物;碳汇;碳酸盐泵;呼伦湖;内蒙古

中图分类号:P571;P66

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2025)06-1015-13

Microbial-inorganic Carbon Interactions of Soft Sediments in the Northern Shore of Hulun Lake, Inner Mongolia, China and Their Biogeochemical Significance

GAO Xiao^{1,2,3,4*}, ZHOU Gang⁴, Michael STEINER^{1,2}, HAN Zuo-zhen^{1,2,3†}

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization and Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

收稿日期:2025-05-04;修回日期:2025-08-13

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(42402130);中国博士后科学基金项目(2024M751858,2025T180115);

山东博士后科学基金项目(SDBX2024034);青岛市自然科学基金项目(24-4-4-zrjj-52-jch)

* 通信作者:高 颢(1992-),男,山西武乡人,工学博士,博士后,E-mail: xiaogao92@sdust.edu.cn.

† 通信作者:韩作振(1965-),男,河南新乡人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail: hanzuozhen@sdust.edu.cn.

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, Shandong, China; 4. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: Microorganisms are the core driving force for carbon mineralization in lake sediments, playing a dominant role in key biogeochemical processes such as organic matter degradation, inorganic carbon transformation, and carbonate precipitation. However, research on their role in the formation of lake carbon sinks remains relatively limited. Hulun Lake in Inner Mongolia was selected as the study area; by integrating a suite of analytical techniques, including 16S rRNA gene sequencing, carbon component analysis, water chemistry measurements, scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), and Raman spectroscopy, a systematic investigation of lake sediments and water samples was conducted. Furthermore, molecular dynamics (MD) simulations were employed to explore the mechanistic pathways of microbially mediated inorganic carbon precipitation. The results show that Hulun Lake in Inner Mongolia is a freshwater system characterized by diverse and abundant microbial communities in its sediments, including bacterial genera such as *BD2-11_terrestrial_group*, *Halomonas* and *Nitrolancea*, as well as algal microorganisms; the contents of inorganic carbon (IC), total carbon (TC), and total organic carbon (TOC) all increase with depth, exhibiting a clear vertical distribution pattern; the $\delta^{13}\text{C}$ values of inorganic carbon range from -19.16% to -11.39% , indicating a generally negative bias that suggests the carbonates in the sediments may originate from CO_2 produced by microbial metabolism; mineralogical analyses consistently identify characteristic peaks of carbonate minerals such as calcite and dolomite, further confirming the presence of inorganically precipitated carbonates in the sediments; in organic mineralization systems containing fulvic acid, CO_3^{2-} forms larger ion clusters with Ca^{2+} and Mg^{2+} more readily, and these aggregates also nucleate significantly faster than in purely inorganic mineralization systems. In summary, this study further elucidates the mechanism of microbial action in the carbonate pump mechanism of lakes, expands the understanding of the biogeochemical functions of microorganisms in the lake carbon sink, and deepens the comprehension of the coupled process of “lake carbon sink-microbial action”.

Key words: biogeochemistry; sediment; inorganic carbon; microorganism; carbon sink; carbonate pump; Hulun Lake; Inner Mongolia

0 引言

微生物在全球碳循环与碳汇形成过程中发挥着不可替代的生物地球化学作用^[1-4]。例如,光合微生物(如蓝藻、浮游植物)通过光合作用吸收大气中的 CO_2 ,固定为有机碳,是形成生物碳汇的基础;化能自养微生物(如氢氧化细菌)则在深海热液或冷泉等特殊环境中利用无机物获取能量,固定溶解性无机碳(Dissolved Inorganic Carbon, DIC),维持深海碳循环稳定;而异养微生物(如腐生菌、真菌)则通过分解有机质,将已固定的碳重新矿化为 CO_2 或 CH_4 ,调控土壤、水体及沉积物的碳通量^[5-6]。这些互补的生物过程共同构成了微生物在碳输入、转化、输出与

储存各环节中的关键功能,深刻影响着区域乃至全球碳平衡与气候系统演变。

湖泊作为全球内陆水体的重要组成部分,尽管仅覆盖地球表面积的3%左右,却因其单位面积碳交换速率高、碳转化活跃,被认为是重要的“区域碳汇”与“碳调节器”^[7]。在湖泊系统中,碳的输入、沉积与封存可通过物理泵(Physical Pump)、生物泵(Biological Pump)、微型生物碳泵(Microbial Carbon Pump)以及碳酸盐泵(Carbonate Pump)等多种机制协同实现^[1,6,8-10]。在这些过程中,微生物既是碳固定的主体,也是调控碳稳定性和归宿的主导因子^[11-13];碳酸盐泵机制在湖泊碳汇功能中的长期作用愈加受到重视^[6-7]。微生物在代谢过程中可通过

一系列生物地球化学作用将溶解性无机碳转化为碳酸钙等固态碳酸盐矿物,进而实现无机碳的沉积与封存^[14-15]。实验与野外观测均表明,某些微生物群体(如光合细菌、蓝藻、绿藻)在光合作用过程中消耗 CO₂、提升局部 pH 值,从而促进 Ca²⁺ 与 CO₃²⁻ 的结合,诱导碳酸钙成核沉淀;与此同时,微生物分泌的胞外聚合物(Extracellular Polymer Substances, EPS)不仅提供了成核模板,还可稳定晶体结构,增强无机碳固定效率;此外,在湖泊底部的厌氧环境中,硫酸盐还原菌(Sulfate-reducing Bacteria, SRB)通过代谢反应生成碳酸盐并降低 SO₄²⁻ 浓度,也有利于碳酸钙的沉积与保存^[16-17]。因此,微生物在无机碳沉淀路径中的作用,构成了湖泊碳汇调控机制中的关键环节,探究这一作用可为理解其地质尺度碳储存潜力提供理论支撑。

呼伦湖作为中国北方第一大淡水湖,地处典型的温带草原生态系统,具有典型的封闭型湖泊特征。近年来研究指出,呼伦湖在区域和全球碳循环中具有重要的碳汇潜力^[18-19]。Zhang 等研究指出,1850 年以来,呼伦湖整个湖泊的平均有机碳埋藏速率为 31.42 g·m⁻²·年⁻¹,与美国本土湖泊的平均有机碳埋藏速率(31.00 g·m⁻²·年⁻¹)相近且高于欧洲湖泊上层 20 cm 沉积物的平均有机碳埋藏速率(10.60 g·m⁻²·年⁻¹),由此可见呼伦湖在区域碳循环中可能发挥着与其他湖泊同等重要的作用^[20]。尽管湖泊碳汇功能受气候、水文、地貌等自然因子共同调控,但其碳汇效率与稳定性在很大程度上取决于湖泊内部微生物群落主导的生物地球化学过程^[21-23]。以往研究大多聚焦于有机碳(Organic Carbon, OC)的固定与埋藏,但是以碳酸盐矿物形式沉积的无机碳(Inorganic Carbon, IC)在地质尺度上表现出更高的稳定性与封存能力^[6],因此微生物驱动的无机碳矿化在碳汇过程中的长期贡献不容忽视。然而,相关研究相对有限,尤其是在具体微生物过程及其调控机制方面尚存诸多未知。基于此,本文以内蒙古呼伦湖为研究对象,通过采集沉积物样品并结合分子生物学、矿物学、地球化学和计算化学等多学科手段,系统探讨微生物驱动下的无机碳沉淀机制,旨在揭示湖泊碳酸盐泵机制中的微生物作用机理,拓展对微生物在湖泊碳汇中地球化学功能的认识,进一步深化理解“湖泊碳汇-微生物作用”耦合过程。

1 区域地质概况与样品采集

呼伦湖位于中国内蒙古自治区呼伦贝尔草原的

西部,地处新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗与满洲里市扎赉诺尔区交界区域,纬度范围为 48°40'N~49°20'N,经度范围为 116°58'E~117°47'E。湖体呈不规则斜长方形,长轴呈 SW—NE 向,湖泊长度约为 93 km,最大宽度为 41 km,平均宽度约为 32 km,湖岸线总长约 447 km,水面面积达 2 315 km²。作为中国第五大湖泊及中国北方最大的湖泊,呼伦湖亦是高纬度地区典型的草原型封闭湖泊代表。呼伦湖的主要水源来自大气降水及周边 80 余条地表径流的补给,其中克鲁伦河、乌尔逊河与海拉尔河为其最重要的 3 条入湖河流^[21,24]。

2023 年 10 月,课题组在内蒙古呼伦湖北岸采集了泥质沉积物及水体样品,采样坐标为(49°19'16"N, 117°40'14"E)[图 1(a)]。白天最高气温为 3℃~15℃,夜间最低气温为-8℃~5℃,该季节内湖泊与大气 CO₂ 交换量相对稳定,微生物代谢趋于稳定,此时采样可减少温度对样品的影响。该采样区域周边无明显河流注入,地理上呈现相对封闭的水动力环境,有助于研究内源过程对碳循环的影响[图 1(b)]。采样过程为:利用采样管获取约 20 cm 的柱状沉积物样品;采样后在现场将其按 2~3 cm 的间距分为 8 层,每层沉积物样品分别置入无菌离心管中,并迅速冷冻保存,以用于后续的微生物多样性与地球化学分析[图 1(c)、(d)]。采样过程中,采样器未完全穿透沉积物底部,以尽可能保持所采集样品在原位沉积条件下的完整性与代表性,确保了所获取的沉积物是在相对原生条件下形成的,最大程度减少外源干扰对分析结果的潜在影响。

2 材料与方法

2.1 分析测试

本文所涉及的样品分析工作由多个单位协作完成。X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)、傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)、扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、稳定碳同位素以及拉曼(Raman)光谱分析均在山东科技大学山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室完成,测试方法参考了 Gao 等的研究方法^[25-26];X 射线衍射分析仪器型号为 D/max-rc(日本理学公司),傅里叶变换红外光谱分析仪器型号为 Nicolet 380(美国赛默飞世尔科技公司),扫描电镜型号为 S-4800(日本日立公司),稳定碳同位素分析仪器型号为 Mat 253 Plus(德国赛默飞科技公司),拉曼光谱分析仪器型号为 DXR2(美

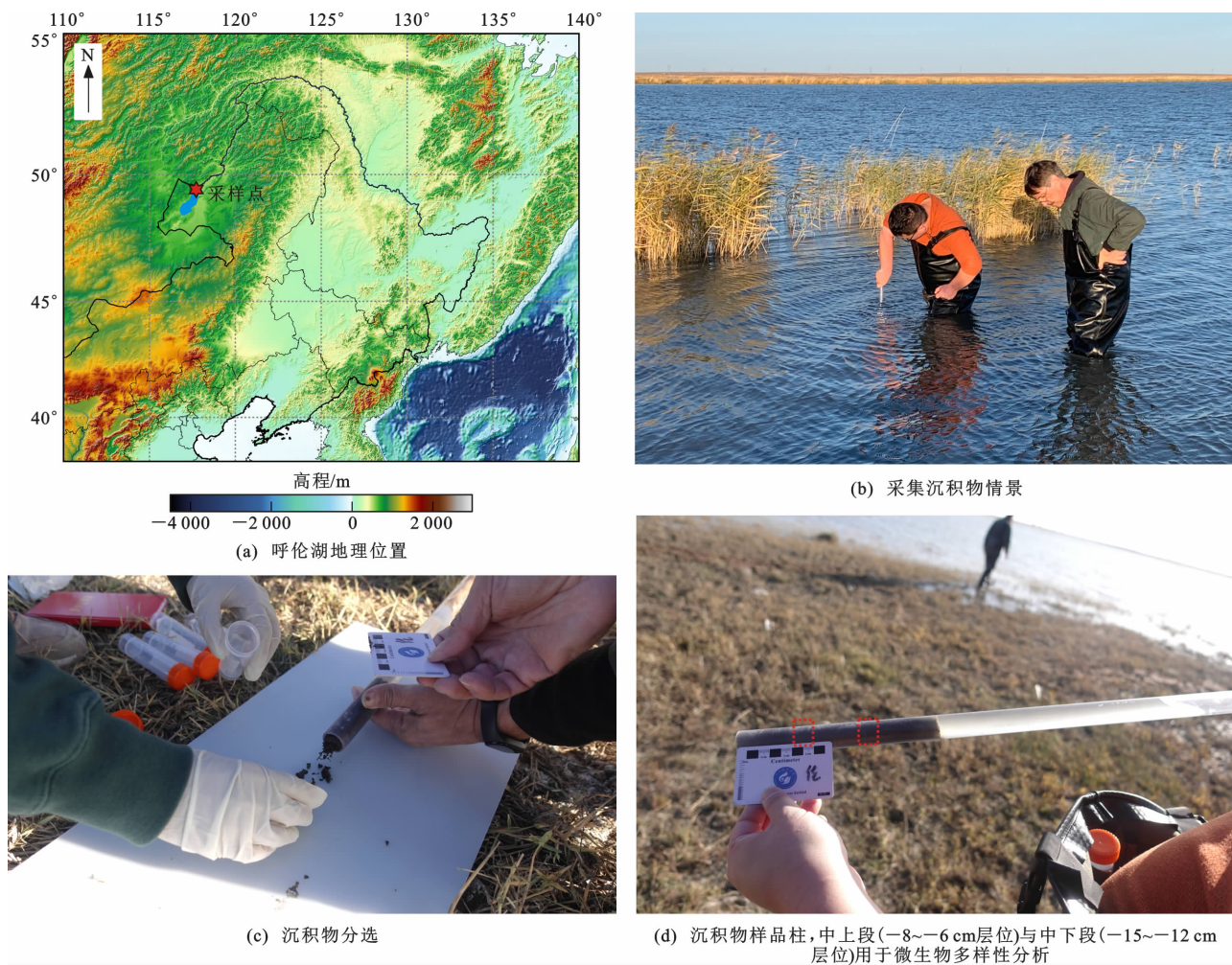


图1 内蒙古呼伦湖地理位置以及沉积物采样与处理照片

Fig. 1 Location of Hulun Lake in Inner Mongolia and Photos of Sediment Sampling and Processing

国赛默飞世尔科技公司)。总碳(Total Carbon, TC)、无机碳含量和总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)的测定在中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室使用岛津 TOC-LCPH 分析仪(日本岛津公司)和非色散红外(Non-dispersive Infrared, NDIR)检测器完成,测试方法参考了李明慧等的研究成果^[12];分子模拟工作在中国石油大学(华东)重质油全国重点实验室完成;水化学分析与微生物多样性测序分析工作由杭州研趣生物科技有限公司完成,用于水化学分析的电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪型号为 Agilent 770(美国安捷伦科技有限公司),测试方法参考了 Luo 等的研究成果^[27]。

样品的前处理与分析流程为:首先,从沉积柱的中上段(-8~-6 cm 层位,样品 H1-2)与中下段(-15~-12 cm 层位,样品 H1-5)分别取样,在超净工作台中,用无菌枪头小心吸取部分沉积物用于微生物多样性分析;随后,将全部 8 个分层沉积物样

品经冷冻干燥处理,并在体视显微镜下剔除植物残体(如根、叶等),以获得相对无杂质的样品粉末;最后,干燥粉末分别送往相应实验平台进行地球化学、矿物学分析。为确保碳酸盐矿物的有效识别与精准分析,本文基于碳组分分析结果,选取-15~-12 cm 层位的沉积物样品用于傅里叶变换红外光谱、X射线衍射与拉曼光谱分析。该层位样品中无机碳含量相对较高,有利于提高碳酸盐矿物的检测效率与谱图解析精度。

2.2 分子动力学模拟

为验证微生物在促进无机碳沉淀方面的潜在作用,本文构建了不含有机质的无机矿化体系模型和含有机质的有机矿化体系模型。两种模型均基于呼伦湖区域水化学测试结果构建,尽可能模拟自然环境中水体成分,以探讨有无有机质参与下无机碳的沉淀行为。

有机矿化体系模型中添加的有机质选取了天然环境中广泛存在、微生物易于降解的富里酸(Fulvic

Acid)作为代表性有机组分^[10,28-29]。无机矿化体系模型中主要包括 Ca^{2+} (分子数量为 15 个)、 Mg^{2+} (5 个)、 CO_3^{2-} (15 个)、 HCO_3^- (15 个)和水分子(2 000 个);有机矿化体系模型在保持无机离子组分相同的基础上,额外引入了富里酸分子(分子数量为 3 个)以及用于中和其羧基(COO^-)所携带电荷的 Na^+ (18 个),从而维持体系整体电中性。需要说明的是,研究区实际 Mg^{2+} 摩尔浓度($1.709 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)与 Ca^{2+} 摩尔浓度($0.626 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)的比值($\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值)约为 3 : 1。然而,根据 Gao 等的研究结果, Mg^{2+} 由于具有较高的水化能,在溶液中难以与 CO_3^{2-} 形成稳定络合物,从而影响碳酸盐矿物的生成^[30-31]。为提高模拟效率、减少计算资源消耗,模型中对 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值进行了适当调整,设定为 1 : 3,以加快矿化过程的动力学演化速率,同时不影响无机碳形成趋势和机制分析。

体系中原子间的静电作用与范德华力分别采用 Ewald 方法和 Atom-based 方法进行计算,并在 CFF 力场(Compass II Force Field)下运行。模拟流程包括两个主要阶段:①采用恒压恒温(NPT)系综对模型进行预优化,以确保体系在合适的温度和压力下达到热力学平衡;②在 298 K 温度条件下采用恒体积恒温(NVT)系综对体系进行 10 ns 的平衡模拟,模拟过程中采用 Nose-Hoover-Langevin 热控算法维持体系温度稳定,上述模型均在 Forcite 模块进行^[25,30]。最终,获得模拟盒尺寸分别为 $39.86 \text{ \AA} \times 39.86 \text{ \AA} \times 38.18 \text{ \AA}$ 的无机矿化体系模型和 $39.22 \text{ \AA} \times 39.22 \text{ \AA} \times 39.80 \text{ \AA}$ 的有机矿化体系模型。最后,统计从运行开始到结束时各个组分的均方位移(Mean Square Displacement, MSD)。均方位移是一种确定选定粒子随时间的位移统计方法,它可以确定粒子是自由扩散还是束缚,并量化富里酸对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的加速沉淀效应。当各组分沉淀较慢时,其均方位移较大;反之,则均方位移较小。均方位移计算公式为

$$D_{\text{MSD}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle |r_i(t)^2 - r_i(0)^2| \rangle \quad (1)$$

式中: D_{MSD} 为均方位移; N 为目标粒子的个数; $r_i(t)$ 为粒子 i 在时刻 t 的位置; $r_i(0)$ 为粒子 i 在初始时刻的位置。

3 结果分析

内蒙古呼伦湖北岸采样点水化学分析结果如表 1 所示。该区域水体的全盐量为 $866 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,矿

化度为 $950 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,碱度为 $394 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 浓度为 $25.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Mg^{2+} 浓度为 $41.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ba^{2+} 浓度为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Sr^{2+} 浓度为 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Na^+ 浓度为 $171.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CO_3^{2-} 浓度为 $42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HCO_3^- 浓度为 $394 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明该区域属淡水湖泊系统。沉积物微生物多样性分析结果显示,前三位优势菌属分别为 *BD2-11_terrestrial_group*、*Halomonas* 和 *Nitrolancea* (图 2)。其中,*Halomonas* 为耐盐微生物,在碳酸盐矿化中具有潜在作用,*BD2-11_terrestrial_group* 亦被报道广泛存在于湖泊及湿地环境中。扫描电镜图像进一步揭示,沉积物中富含藻类结构[图 3(a)~(d)]及细菌类微生物[图 3(e)、(f)],为沉积物中碳循环过程提供了潜在的生物学证据。沉积物中无机碳含量、总碳和总有机碳均随埋藏深度的增加而增加[图 4(a)、(b)],表明碳组分在沉积过程中呈富集趋势。碳同位素分析结果表明,无机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-19.16\text{‰} \sim -11.39\text{‰}$ [图 4(c)],整体偏负,表明碳酸盐矿物的形成可能与生物源 CO_2 密切相关,符合微生物介导矿化的碳同位素特征。

X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱以及拉曼光谱分析均在沉积物样品中检测到了明显的碳酸盐矿物特征峰[图 4(d)~(f)],同样佐证了该区域湖泊沉积物中存在碳酸盐矿物。傅里叶变换红外光谱分析结果中,2 927、1 799、1 431、872 和 714 cm^{-1} 等波段均出现了典型碳酸盐矿物的吸收峰,对应文献中方解石和白云石的特征峰值范围(例如,2 920、1 795、1 426、875、712 cm^{-1} 波段对应方解石;1 441、879、727 cm^{-1} 波段对应白云石;870 cm^{-1} 波段对应球霏石)^[16-17,30,32-33]。不过,本研究也观察到部分吸收峰位置与朱莹等的研究结果^[26] 存在一定偏差,可能与矿物中 Mg^{2+} 掺杂有关。已有研究表明,当方解石晶体中 Mg^{2+} 浓度升高时,其傅里叶变换红外光谱吸收峰会整体向高波数方向偏移^[26]。根据傅里叶变换红外光谱特征峰位置及其组合推断,呼伦湖沉积物中至少包含方解石和单水方解石等类型。X 射线衍射分析结果表明,样品中除碳、石英、沸石、钠长石、镁硫酸盐以及水化钙铝硅外,主要碳酸盐矿物为方解石和白云石,谱图中出现了这两种矿物的典型衍射峰。拉曼光谱分析中,1 086 cm^{-1} 强峰对应于方解石中 CO_3^{2-} 的 V_1 对称伸缩振动,是其典型的指纹峰。综上所述,无论是傅里叶变换红外光谱、X 射线衍射,还是拉曼光谱,其分析结果均一致表明呼伦湖沉积物中存在碳酸盐类矿物,且以方解石和

表1 采样点水化学分析结果

Table 1 Analysis Results of Water Chemistry in Sampling Point

| 参数 | 全盐量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 矿化度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 碱度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | pH 值 | CO_3^{2-} 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | HCO_3^- 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Ca^{2+} 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Mg^{2+} 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Ba^{2+} 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Sr^{2+} 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Na^+ 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) |
|------|---|---|--|---------|---|---|---|---|---|---|--|
| 分析结果 | 866 | 950 | 394 | 8.36 | 42 | 394 | 25.09 | 41.56 | 0.04 | 0.33 | 171.43 |

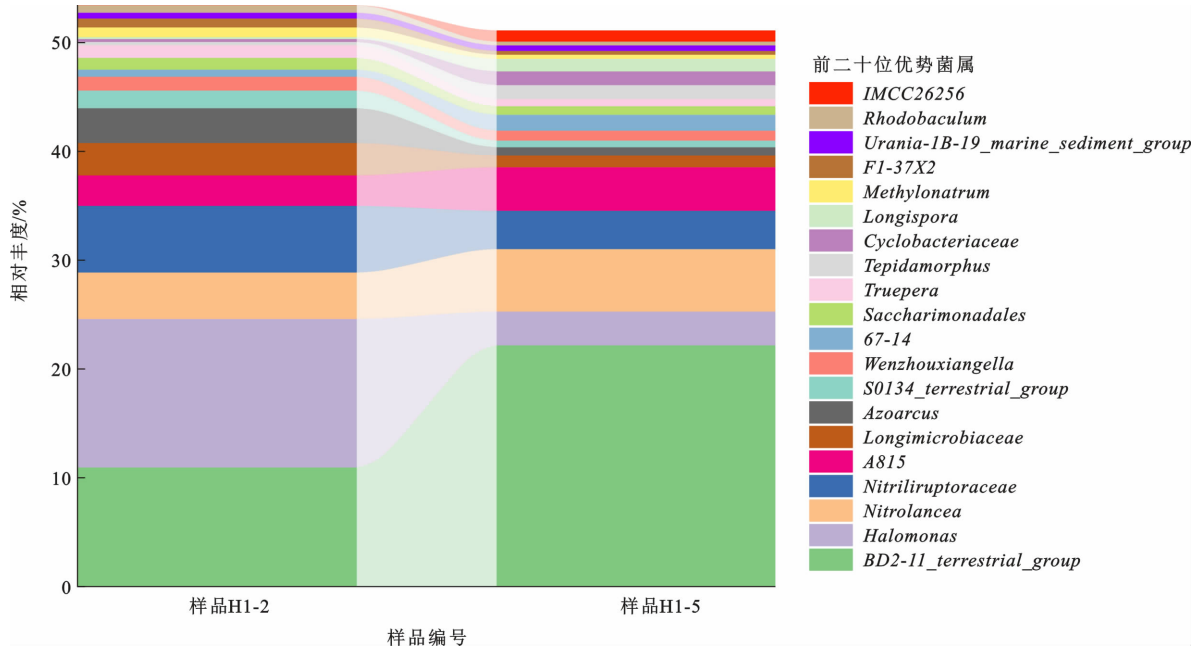


图2 中上段与中下段微生物多样性分析结果

Fig. 2 Analysis Results of Microbial Diversity in Middle-upper and Middle-lower Sections

白云石为主。

分子动力学模拟结果显示,在无机矿化体系模型中,经过约 10 ns 的动力学模拟后, HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 逐渐形成具有一定空间结构的聚集体团簇,其尺寸约为 $20 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA} \times 20 \text{ \AA}$ [图 5(a)]。相比之下,在有机矿化体系模型中,富里酸分子与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 协同作用,约在 5 ns 内快速形成团簇,其尺寸达到约 $30 \text{ \AA} \times 20 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA}$,且团簇结构更为复杂[图 5(b)]。在无机矿化体系模型中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 以及 CO_3^{2-} 的均方位移均大于有机矿化体系模型,这表明有机组分的存在促进了这些离子成核、沉降,导致迁移速率较低(图 6)。

4 讨论

4.1 沉积物中无机碳矿化的生物地球化学过程

微生物是湖泊生态系统沉积物中碳矿化的核心驱动力,其在沉积物中驱动着有机质降解、无机碳转化及碳酸盐矿物的沉淀过程,构成了生物-地球化学过程中的核心纽带^[3,14-15,34]。

碳酸盐矿物的析出与水体中的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值存在重要的耦合控制关系。样品水化学分析结果表

明, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度分别为 41.56 和 $25.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 摩尔浓度分别为 1.709 和 $0.626 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值约为 3,属于高 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值环境。现有研究表明, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值低于 1 时易析出方解石, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值为 1~2 时易析出方解石以及少量文石或高镁方解石, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值为 2~5 时易析出文石以及高镁方解石,当 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值大于 5 时易析出白云石或其先驱体,但白云石的形成通常受动力学障碍限制,多为缓慢演变产物^[16,32]。因此, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值不仅影响矿物类型(如方解石、文石、白云石),也影响其成核速率、晶体形貌与结晶度,也是白云石可否形成沉淀的前提与基础。

16S rRNA 微生物多样性分析结果表明,研究区沉积物中存在多种功能类群的微生物,如 *Halomonas*、*Nitrolancea*、*Nitriliruptoraceae*、*Longimicrobiaceae* 和 *Azoarcus* 等。这些微生物不仅代表了丰富的生理代谢类型,还可能在碳循环过程中起到重要作用。部分嗜盐细菌具有诱导碳酸盐沉淀的潜力,在适宜的培养条件下可直接沉淀出白云石类矿物^[32-33]。沉积物中发现了多种形态的微生物

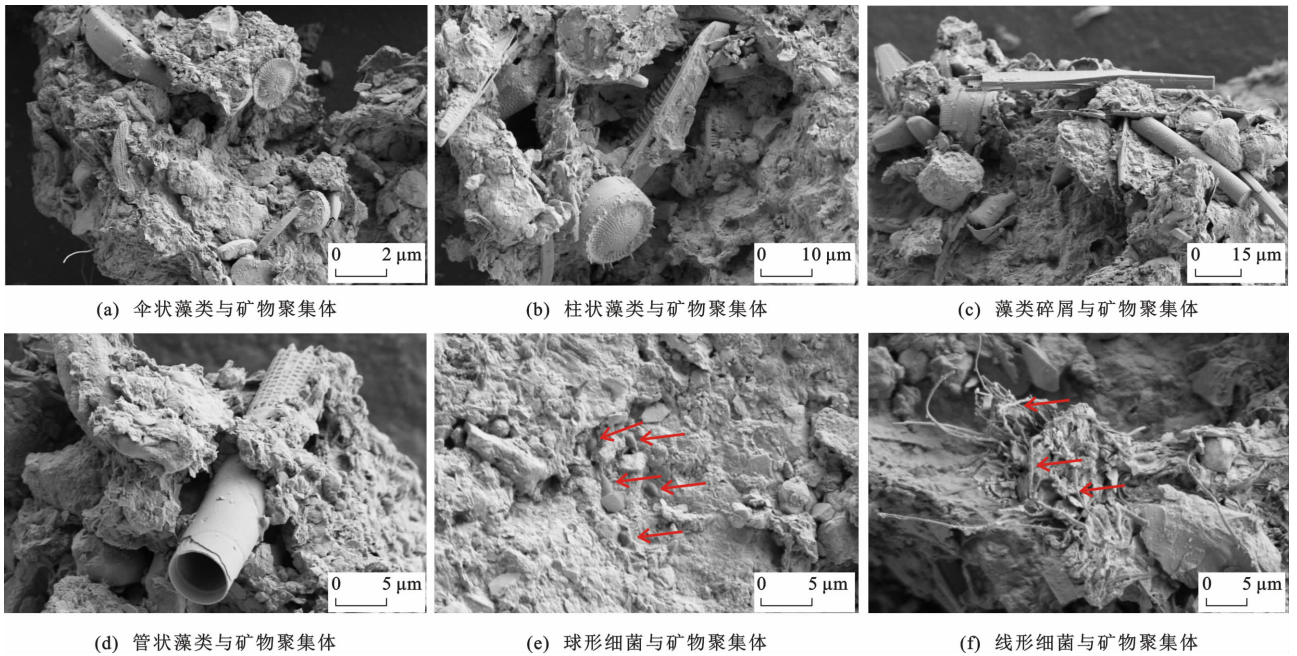
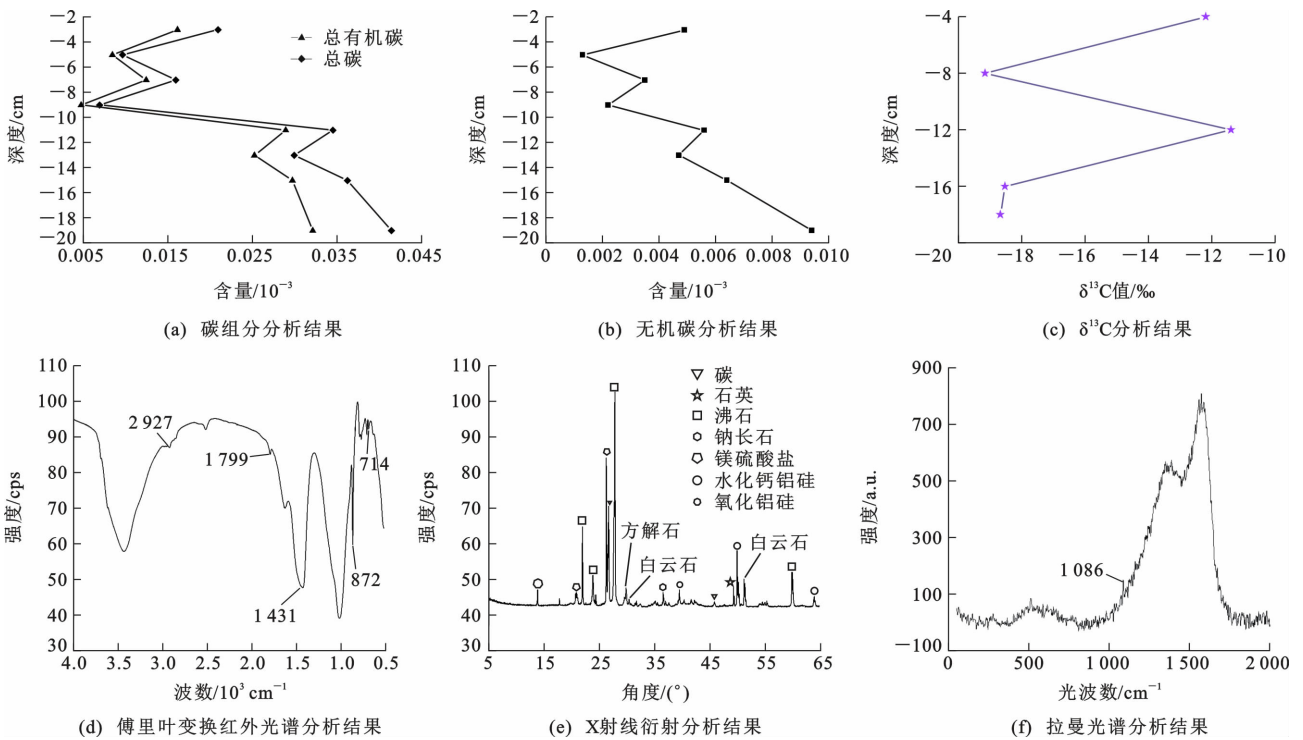


图 3 沉积物中微生物与矿物聚集体扫描电镜图像

Fig. 3 SEM Images of Microbial and Mineral Aggregates in Sediments



傅里叶变换红外光谱、X 射线衍射以及拉曼光谱分析样品选自 -15 ~ -12 cm 层位

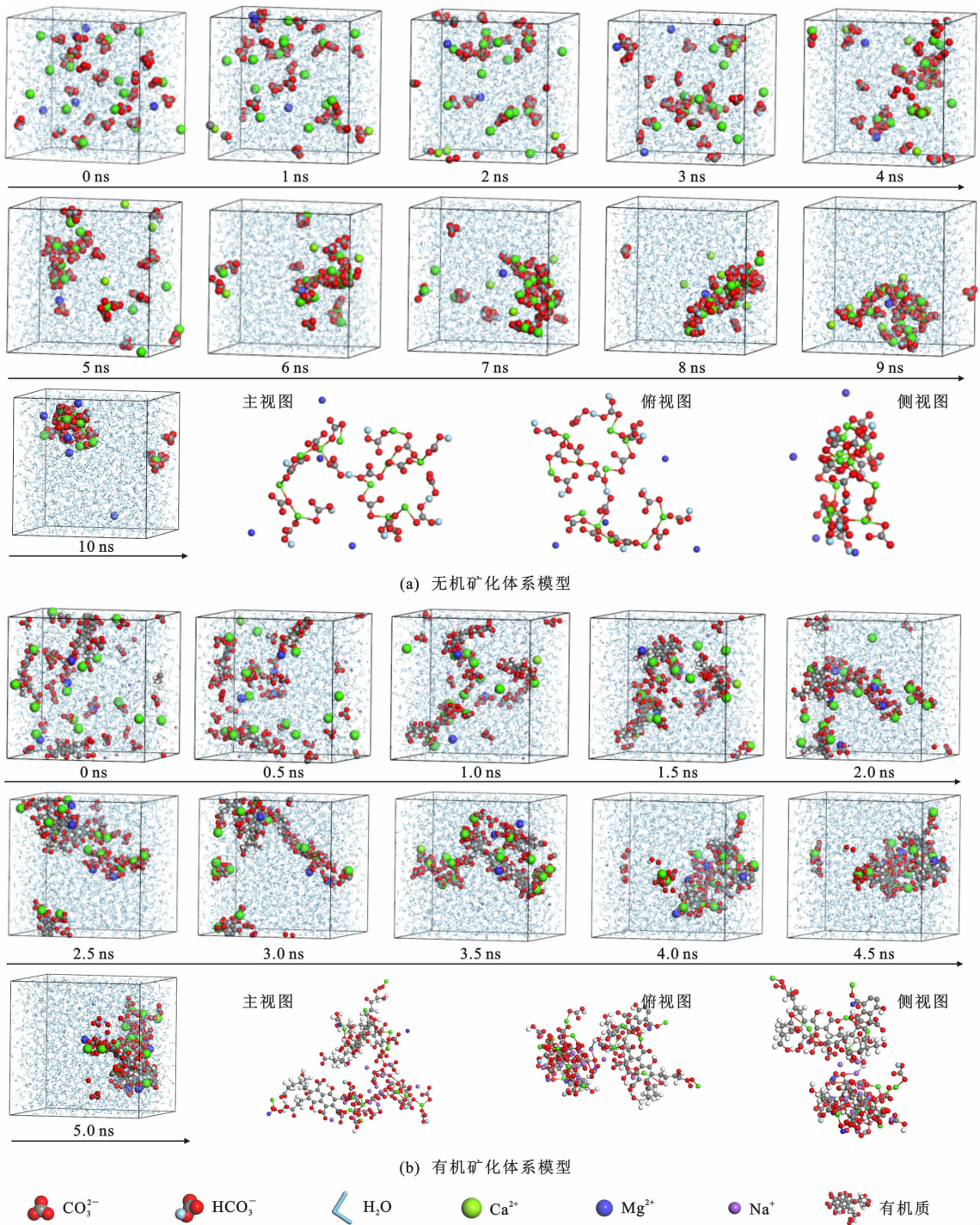
图 4 沉积物矿物成分及生物地球化学分析结果

Fig. 4 Analysis Results of Mineral Composition and Biogeochemistry in Sediments

结构(如球状、线状等),这些结构附着于矿物颗粒表面,显示出强烈的生物模板特征[图 3(e)、(f)]。此外,沉积物中还观察到丰富的硅藻结构,如伞状、圆柱状、管状等类型[图 3(a)~(d)]。硅藻作为水体中的初级生产者,具有光合作用吸收 CO_2 并形成有

机质的能力,间接影响水体中溶解性无机碳的组成与分布,也为后续无机碳沉淀创造了条件^[35-36]。

从沉积剖面碳组分的垂向变化特征来看,无机碳含量、总碳和总有机碳均随埋藏深度的增加而增加,均呈现出负相关性。这种趋势可能与沉积物中



图(a)中,主视图、俯视图、侧视图是 CO₃²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺ 以及 Mg²⁺ 形成的络合物的动力学演化快照;图(b)中,主视图、俯视图、侧视图是 CO₃²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 以及富里酸形成的络合物的动力学演化快照

图 5 有机、无机矿化体系模型中 CO₃²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 以及有机质动力学演化过程

Fig. 5 Kinetic Evolution Processes of CO₃²⁻, HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ and Organic Matter in Organic and Inorganic Mineralization System Models

有机质输入量、分解程度及矿物稳定化过程有关。第一层位(深度为-3 cm)的无机碳含量、总碳和总有机碳相对于第二、三、四层位(-9~-5 cm)要稍高一些,这或许是由表层的氧化带以及丰富的菌藻微生物引起的,表层大量的微生物通过降解作用生

产出较高含量的有机质。此外,浮游藻类(如蓝藻、绿藻)也可以通过光合作用吸收大气 CO₂,并利用表层水体溶解的 HCO₃⁻ 形成无机碳沉淀。随着沉积深度的增加,相对深处的厌氧或者有氧兼性厌氧微生物开始利用有机碳维持微生物自身必要的代谢活

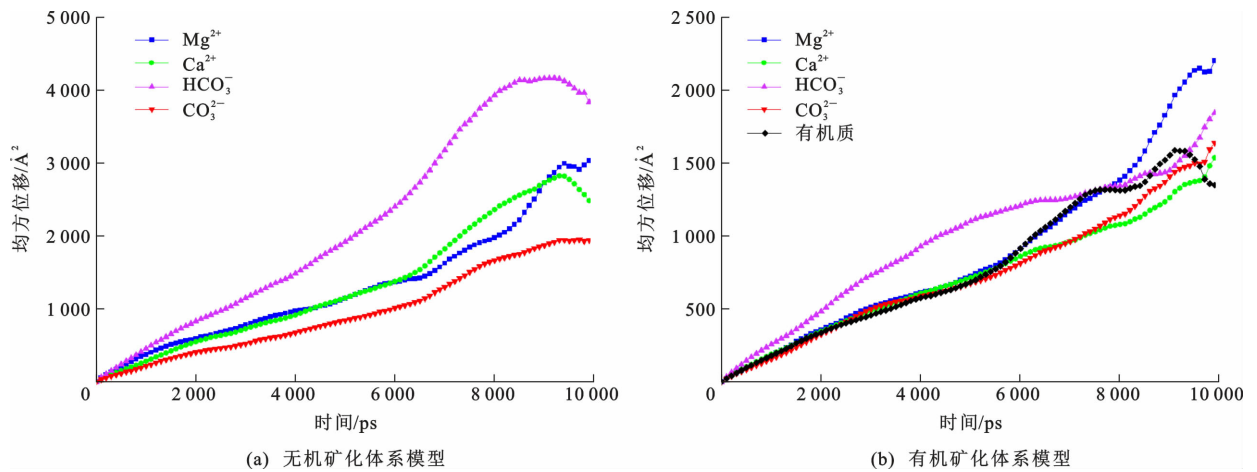


图 6 有机、无机矿化体系模型中各组分均方位移变化

Fig. 6 Mean Square Displacement Change of Each Component in the Organic and Inorganic Mineralization System Models

动,进而造成总有机碳以及总碳的降低^[37-38]。然而,本研究中沉积剖面的总有机碳约为无机碳含量的 3 倍,显示出以有机碳储存为主的碳汇特征。尽管总有机碳较高,但是以碳酸盐矿物形式沉积的无机碳在地质尺度上的稳定性显著优于有机碳。因此,无机碳矿化在碳汇功能中的长期贡献不容忽视。这也是近年来湖泊碳汇研究中,越来越多学者关注无机碳固定路径的原因所在^[39-40]。

$\delta^{13}\text{C}$ 值是研究碳来源与转化路径的重要地球化学示踪指标。呼伦湖沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值稳定在 -19‰ 左右,明显偏负,说明其中碳酸盐矿物的形成深受生物过程控制。主要路径包括:藻类或细菌在光合作用或代谢过程中优先吸收 ^{12}C ,导致水体中残留的溶解性无机碳相对富集 ^{13}C ,但随后形成的碳酸盐矿物则体现出较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。特别是在硫酸盐还原、脱氨或发酵等厌氧代谢过程中,微生物释放出 ^{12}C 富集的 HCO_3^- 或 CO_3^{2-} ,可进一步促使碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值负偏。芽孢杆菌、硫酸盐还原菌等被认为在此类过程中扮演关键角色^[31,35,41]。因此, $\delta^{13}\text{C}$ 值的显著偏负不仅指示了微生物活动的存在,也佐证了生物诱导无机碳矿化过程的发生。

总体而言,微生物通过一系列代谢活动(如硫酸盐还原、光合固碳、脱氨反应、尿素水解等),能够调控其周围微环境的理化条件(如 pH 值、碳酸盐饱和度及 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值等),进而诱导碳酸盐矿物(如方解石、白云石等)的沉淀过程。例如,蓝藻可通过吸收 CO_2 或释放 HCO_3^- 等方式,显著提高局部无机碳含量,从而促进其向稳定的矿物相转化^[31]。在这些生物诱导矿物沉淀过程中,碳酸盐矿物往往会记录显著的生物信号,如碳同位素组成的负偏移,即

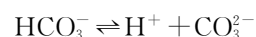
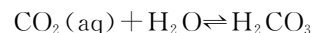
$\delta^{13}\text{C}$ 值的减小反映了微生物对 ^{12}C 的优先利用^[34]。本研究样品中,一方面观察到沉积物中存在丰富的微生物群落,以及与微生物活动密切相关的碳酸盐矿物;另一方面,该类生物驱动的碳酸盐沉积在滨海湿地、湖泊与碱性水体等环境中广泛存在,成为当前“蓝碳”系统研究的重要组成部分和潜在碳汇的重要因子。

4.2 微生物调控碳酸盐矿物沉淀作用机制

微生物通过一系列代谢活动,能够显著改变其周围微环境的理化条件(如 pH 值、溶液饱和度、氧化-还原状态、阳离子浓度)等,从而驱动无机碳酸盐矿物(如方解石、文石、白云石等)的成核与沉淀。该过程可归纳为 pH 值与碳酸盐饱和度、电荷中和与细胞表面模板效应、有机矿化作用与无机碳沉淀等关键机制。

4.2.1 pH 值与碳酸盐饱和度

首先,pH 值与碳酸盐沉淀之间的耦合关系主要体现在碳酸盐体系的化学平衡与沉淀反应动力学,可通过平衡反应来实现碳酸盐或无机碳的沉淀。该平衡反应为



样品采集区域水化学分析结果表明,该区域的水体 pH 值为 8.36,呈现出一定的碱性。水体碱性意味着 CO_3^{2-} 浓度增加并有利于碳酸盐矿物沉淀。从溶解度角度来说,碳酸盐矿物(如方解石、文石、白云石等)的沉淀依赖于离子活度积(Ionic Activity Product, IAP)与溶解度积(Solubility Product Con-

stant, SPC)。当离子活度积大于溶解度积时,处于过饱和状态的体系有利于碳酸盐沉淀, pH 值升高可以提高 CO_3^{2-} 活度,从而增加离子活度积,推动碳酸盐矿物沉淀^[42]。因此,水体的 pH 值或碱度是碳酸盐矿物沉淀的关键因素。

其次,微生物在有氧或厌氧代谢(如呼吸作用、硝酸盐还原、硫酸盐还原、尿素水解等)过程中,常伴随酸性物质的消耗或碱性代谢产物(如 NH_4^+ 、 HCO_3^-)的释放,也可以导致局部 pH 值升高^[40]。微生物多样性分析结果表明,沉积物中含有 *BD2-11_terrestrial_group*、*Halomonas*、*Nitrolancea*、*Nitrospirillum*、*Longimicrobiaceae* 和 *Azoarcus* 等,这些微生物代表了丰富的生理代谢类型。在这些代谢作用下,水体的碱度可进一步提升,促进 CO_2 水解生成的 HCO_3^- 进一步转化为 CO_3^{2-} ,导致 CO_3^{2-} 浓度显著上升。随之,当溶液中存在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等与 CO_3^{2-} 结合时,体系的碳酸盐矿物饱和度增加,并促使其沉淀析出^[25,43]。因此,微生物通过调节局部碳酸盐体系的碱度,是驱动无机碳固定的重要方式之一。

4.2.2 电荷中和与细胞表面模板效应

扫描电镜分析结果表明:沉积物中具有多种形态的微生物结构(如球状、线状等),这些结构通常附着于矿物颗粒表面,显示出强烈的生物模板特征[图 3(e)、(f)]。微生物细胞表面富含羧基、磷酸基、氨基等带负电的功能基团,可有效吸附 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子,在其表面形成带正电的离子壳层。随着 CO_3^{2-} 浓度升高,离子间结合促进成核反应在细胞表面发生。微生物细胞及胞外聚合物在此过程中不仅提供物理吸附位点,还可作为模板调控矿物晶体的形貌、生长取向与结晶习性。例如,在潮坪或湖泊环境中形成的微生物垫、凝块石、球粒结构等碳酸盐沉积构造,往往保留有明显的微生物成核与钙化特征^[36]。这是微生物通过电荷中和与细胞表面模板效应驱动无机碳固定的另一种重要方式。

4.2.3 有机矿化作用与无机碳沉淀

微生物代谢产物(如胞外聚合物、蛋白质、腐殖酸等)中富含的活性基团(如羧基、羟基、 PO_4^{3-} 等)与阳离子发生络合作用,形成稳定的有机-无机络合物,从而诱导或加速矿物沉淀的过程。与单纯的无机矿化体系相比,有机矿化体系中形成的成核络合物不仅反应速率更快,而且粒径更大、结构更复杂。在富里酸存在的模拟体系中,富里酸与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 等组分往往先形成稳定的络合物(图 5、6),

既延缓其扩散迁移速率,又提高了局部浓度,从而有助于矿物的快速沉淀与晶体生长^[17]。从另一个角度来看,这些有机质亦可通过包裹成核晶体,限制其过度生长,最终形成具有特定形貌和微生物指征的碳酸盐矿物。

4.3 生物地球化学意义

微生物驱动无机碳碳汇,本质上是通过微生物代谢活动将溶解态无机碳(如 HCO_3^- 、 CO_3^{2-})转化为固态碳酸盐矿物(如方解石、白云石等)的过程。该过程不仅实现了无机碳的有效固存,还在全球碳循环中发挥着关键作用,特别是在湖泊、海洋、盐湖及滨海湿地等沉积环境中,从而有效提升了碳汇效率^[8,13,43]。微生物在促进碳酸盐沉淀过程中发挥着双重作用:一方面,其代谢活动通过调节局部 pH 值、碳酸盐饱和度及阳离子浓度,为矿物沉淀创造有利的热力学与动力学条件;另一方面,微生物及其分泌的有机聚合物(如胞外聚合物)作为模板或络合剂,显著降低了碳酸盐矿物成核所需的能垒,使其可在相对低的过饱和度条件下沉淀析出。此外,微生物及有机分子在碳酸盐沉淀过程中往往被包裹于晶体内部或吸附于其表面,成为保留在矿物结构中的“生物地球化学指纹”。这些指纹信息包括稳定同位素(如 $\delta^{13}\text{C}$ 值的生物偏负性)、有机碳组分、微生物形态痕迹等,构成沉积环境演化的重要记录,在地层解析与古环境重建中具有广泛应用价值^[34]。从地质尺度上来说,碳酸盐矿物具有良好的化学稳定性和长期封存能力,因此,微生物诱导的碳酸盐沉淀也被视为自然界实现“长效碳储”的关键路径之一。由此可见,微生物驱动无机碳碳汇不仅是碳循环的重要环节,更是理解地球系统“ CO_2 呼吸”机制的窗口,对揭示生物地球化学演化及气候变化背景下的碳汇动态具有重要科学意义。

5 结 语

本文以内蒙古呼伦湖北岸为研究区域,详细分析了湖水的成分,沉积物中的微生物种类,无机碳含量、种类及成因,讨论了微生物对无机碳的沉淀机制及其碳汇意义。

(1)呼伦湖属于淡水湖泊,其沉积物中存在丰富的微生物群落,主要包括 *BD2-11_terrestrial_group*、*Halomonas* 和 *Nitrolancea* 等菌属及藻类微生物。

(2)沉积物中无机碳含量、总碳和总有机碳随深度的增加而增加,表现出明显的垂向分布趋势;无机

碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体偏负,暗示沉积碳酸盐矿物可能源自生物代谢产生的 CO_2 。

(3)矿物学分析(X射线衍射、傅里叶变换红外光谱与拉曼光谱分析)均识别出典型的碳酸盐矿物特征峰,如方解石和白云石。

(4)分子动力学模拟结果表明,在含有富里酸的有机矿化体系中, CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 更易形成尺寸更大的团簇,且聚集过程明显快于无机矿化体系,有机质显著促进了无机碳成核沉淀。

本研究将进一步揭示湖泊碳酸盐泵机制中的微生物作用机理,拓展对微生物在湖泊碳汇中生物地球化学功能的认识,深化学理解“湖泊碳汇-微生物作用”耦合过程。

中国科学院青藏高原研究所高少鹏工程师在碳组分测试中给予了非常有价值的指导,中国石油大学(华东)刘芳教授对分子动力学模拟工作提供了大量支持和帮助,在此一并表示感谢!

参考文献:

References:

- [1] 谢树成,焦念志,罗根明,等.海洋生物碳泵的地质演化:微生物的碳汇作用[J].科学通报,2022,67(15):1715-1726.
- XIE Shu-cheng, JIAO Nian-zhi, LUO Gen-ming, et al. Evolution of Biotic Carbon Pumps in Earth History: Microbial Roles as a Carbon Sink in Oceans [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(15): 1715-1726.
- [2] MACREADIE P I, ANTON A, RAVEN J A, et al. The Future of Blue Carbon Science[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 3998.
- [3] MCCUTCHEON J, POWER I M, SHUSTER J, et al. Carbon Sequestration in Biogenic Magnesite and Other Magnesium Carbonate Minerals[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(6): 3225-3237.
- [4] 黄力,董海良,全哲学,等.水圈微生物:推动地球重要元素循环的隐形巨人[J].微生物学报,2020,60(9):1747-1750.
- HUANG Li, DONG Hai-liang, QUAN Zhe-xue, et al. Microbiology in Hydrosphere: A Hidden Giant Behind the Cycling of Important Elements on Earth[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, 60(9): 1747-1750.
- [5] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The Oceanic Sink for Anthropogenic CO_2 [J]. Science, 2004, 305: 367-371.
- [6] SADERNE V, GERALDI N R, MARCEADIE P I, et al. Role of Carbonate Burial in Blue Carbon Budgets[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1106.
- [7] PAN Y W, LI Y F, CHEN C A, et al. New Pathway of Diatom-mediated Calcification and Its Impact on the Biological Pump [J]. Science Bulletin, 2023, 68(21): 2540-2543.
- [8] 兰敏文,宋友桂,程良清.湖泊碳酸盐矿物的形成过程及古气候环境指示意义[J].地球科学与环境学报,2022,44(2):156-170.
- LAN Min-wen, SONG You-gui, CHENG Liang-qing. Review on Formation of Lacustrine Carbonate Minerals and Their Paleoclimate Significance [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(2): 156-170.
- [9] LI Y, ZHANG X Z, ZHANG Z S, et al. Global Lake Carbon Burial from Endorheic Zones Since the Last Glacial Maximum and the Future Projection [J]. The Innovation Geoscience, 2025, 3(2): 100132.
- [10] GUO J Q, SHEN Y, YUAN H M, et al. Bacterial Reworking of Particulate Organic Matter in a Dynamic Marginal Sea: Implications for Carbon Sequestration [J]. Organic Geochemistry, 2023, 179: 104583.
- [11] 类延斌,姚檀栋,张恩楼,等.羌塘高原湖水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值特征及影响因素分析[J].湖泊科学,2011,23(5):673-680.
- LEI Yan-bin, YAO Tan-dong, ZHANG En-lou, et al. Characteristics of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ Value in Lakes on Qiangtang Plateau and Its Affected Factors [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(5): 673-680.
- [12] 李明慧,朱立平,鞠建廷,等.不同环境下湖泊矿物和湖水性质对碳埋藏的制约:以西藏郭扎错为例[J].地球学报,2024,45(5):769-776.
- LI Ming-hui, ZHU Li-ping, JU Jian-ting, et al. Carbon Burial Inferred from Minerals and Lake Water Properties: A Case Study of Guozha Co in Tibet [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2024, 45(5): 769-776.
- [13] 王露,陈光杰,黄林培,等.近百年来湖泊有机碳与无机碳埋藏响应流域开发的协同变化:以石林喀斯特地区为例[J].湖泊科学,2022,34(5):1751-1764.
- WANG Lu, CHEN Guang-jie, HUANG Lin-pei, et al. Synchronic Changes of Lake Organic and Inorganic Carbon Burial in Response to Catchment Development over the Past Century: A Case Study of Shilin Karst Area [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1751-1764.
- [14] LI H M, ZHANG Z H, XIONG T Q, et al. Carbon Sequestration in the Form of Recalcitrant Dissolved Organic Carbon in a Seaweed (Kelp) Farming Environment [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(12): 9112-9122.

- [15] LI Y, FU C C, YE C L, et al. Increased Mineral-associated Organic Carbon and Persistent Molecules in Allochthonous Blue Carbon Ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(1): e70019.
- [16] 赵东方, 谭秀成, 罗冰, 等. 微生物诱导白云石沉淀研究进展及面临的挑战[J]. *沉积学报*, 2022, 40(2): 335-349.
ZHAO Dong-fang, TAN Xiu-cheng, LUO Bing, et al. A Review of Microbial Dolomite: Advances and Challenges[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 335-349.
- [17] GAO X, HAN Z Z, ZHAO Y Y, et al. Interaction of Microorganisms with Carbonates from the Micro to the Macro Scales During Sedimentation: Insights into the Early Stage of Biodegradation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 356: 120714.
- [18] 王雯雯, 王书航, 姜霞, 等. 多方法研究呼伦湖表层沉积物有机质的赋存特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(2): 305-318.
WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, JIANG Xia, et al. Occurrence Characteristics and Sources Analysis of Sediment Organic Matter of Lake Hulun by Multiple Methods[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(2): 305-318.
- [19] 宋文杰, 张瑾, 郭晶晶. 呼伦湖沉积物中有机碳无机碳分布特征研究[J]. *环境与发展*, 2018, 30(6): 97-102.
SONG Wen-jie, ZHANG Jin, GUO Jing-jing. Characteristics of Organic Carbon and Inorganic Carbon Distribution in the Sediment of Hulunhu Lake[J]. *Environment and Development*, 2018, 30(6): 97-102.
- [20] ZHANG F J, XUE B, YAO S C, et al. Organic Carbon Burial from Multi-core Records in Hulun Lake, the Largest Lake in Northern China[J]. *Quaternary International*, 2018, 475: 80-90.
- [21] 张凤菊, 薛滨, 姚书春. 1850年以来呼伦湖沉积物无机碳埋藏时空变化[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(6): 1770-1782.
ZHANG Feng-ju, XUE Bin, YAO Shu-chun. Spatio-temporal Pattern of Inorganic Carbon Sequestration in Lake Hulun Since 1850[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1770-1782.
- [22] 金章东. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(1): 34-44, 77.
JIN Zhang-dong. Composition, Origin and Environmental Interpretation of Minerals in Lake Sediments and Recent Progress[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(1): 34-44, 77.
- [23] 张彦辉, 安彦杰, 朱迟, 等. 水体无机碳条件对常见沉水植物生长和生理的影响[J]. *水生生物学报*, 2009, 33(6): 1020-1030.
ZHANG Yan-hui, AN Yan-jie, ZHU Chi, et al. Physiological Effects of Dissolved Inorganic Carbon on Common Submerged Macrophytes[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(6): 1020-1030.
- [24] 金鸽, 安慧君, 虎日乐. 1991年~2018年呼伦湖区域气候特征及其对水域面积的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(1): 68-74.
JIN Ge, AN Hui-jun, HU Ri-le. Regional Climate Characteristics of Hulun Lake and Its Impact on Water Area from 1991 to 2018[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 2022, 40(1): 68-74.
- [25] GAO X, HAN Z Z, ZHOU G, et al. Salinity Influence on Adsorption of Lipid Molecules in Clay Minerals: Results from Experiments and Calculations[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112878.
- [26] 朱莹, 黎晏彰, 鲁安怀, 等. 方解石-白云石-菱镁矿的中远红外光谱学特征研究[J]. *地学前缘*, 2022, 29(1): 459-469.
ZHU Ying, LI Yan-zhang, LU An-huai, et al. Middle and Far Infrared Spectroscopic Analysis of Calcite, Dolomite and Magnesite[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(1): 459-469.
- [27] LUO W X, WANG P, LIU J C, et al. Microbial Keystone Taxa and Network Complexity, Rather than Diversity, Sustain Soil Multifunctionality Along an Elevational Gradient in a Subtropical Karst Mountain[J]. *Catena*, 2025, 256: 109115.
- [28] 刘小兰, 宋志鑫, 宋刚福, 等. 水体溶解性有机质与重金属影响机理的研究进展[J]. *环境科技*, 2024, 37(2): 62-67.
LIU Xiao-lan, SONG Zhi-xin, SONG Gang-fu, et al. Research Progress on Interaction Mechanism Between Dissolved Organic Matter and Heavy Metals in Water[J]. *Environmental Science and Technology*, 2024, 37(2): 62-67.
- [29] 黄海涛, 王崇, 耿康慧, 等. 富里酸对生物成因次生高铁矿物形成的影响[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(8): 3559-3568.
HUANG Hai-tao, WANG Chong, GENG Kang-hui, et al. Effect of Fulvic Acid on Biogenic Secondary High Iron Minerals Synthesis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(8): 3559-3568.
- [30] GAO X, LI J, HU K M, et al. Calcification of Cell

- Membranes; From Ions to Minerals[J]. *Chemical Geology*, 2023, 617: 121266.
- [31] QIU X, WANG H M, YAO Y C, et al. High Salinity Facilitates Dolomite Precipitation Mediated by Haloferax Volcanii DS52[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 472: 197-205.
- [32] 段 勇, 药彦辰, 邱 轩, 等. 三株嗜盐古菌诱导形成白云石[J]. *地球科学*, 2017, 42(3): 389-396.
- DUAN Yong, YAO Yan-chen, QIU Xuan, et al. Dolomite Formation Facilitated by Three Halophilic Archaea[J]. *Earth Science*, 2017, 42(3): 389-396.
- [33] LIU D, XU Y Y, YU Q Q, et al. Catalytic Effect of Microbially-derived Carboxylic Acids on the Precipitation of Mg-calcite and Disordered Dolomite: Implications for Sedimentary Dolomite Formation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 193: 104301.
- [34] LIU W, CHANG C, YUN H, et al. A Laminated Microbial Ecosystem at the Summit of the Cambrian Explosion[J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 205, 103619.
- [35] CHEN Q R, TANG K, CHEN X F, et al. Microbial Sulfurization Stimulates Carbon Sequestration in Marine Oxygen Minimum Zones [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(9): 895-898.
- [36] DUPRAZ C, REID R P, BRAISSANT O, et al. Processes of Carbonate Precipitation in Modern Microbial Mats[J]. *Earth-science Reviews*, 2009, 96(3): 141-162.
- [37] BOUSSAGOL P, VENNIN E, MONNA F, et al. Carbonate Mud Production in Lakes Is Driven by Degradation of Microbial Substances[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 533.
- [38] 蒋宏忱, 王北辰. 青藏高原湖泊碳氮循环微生物作用[J]. *地球科学*, 2025, 50(3): 877-886.
- JIANG Hong-chen, WANG Bei-chen. Microbial Role in Carbon and Nitrogen Cycling in Lakes on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Earth Science*, 2025, 50(3): 877-886.
- [39] 赖 珊, 万宏滨, 唐 芳, 等. 抚仙湖沉积物有机碳埋藏特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(3): 1246-1256.
- LAI Shan, WAN Hong-bin, TANG Fang, et al. Characteristics and Source Analysis of Organic Carbon Buried in Sediments of Fuxian Lake[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(3): 1246-1256.
- [40] 韩 磊, 胡 益, 任明磊, 等. 湖泊微生物群落及其介导的碳循环过程[J]. *生命科学*, 2023, 35(12): 1613-1629.
- HAN Lei, HU Ang, REN Ming-lei, et al. Lake Microbial Communities and Their Mediated Carbon Cycling Processes[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2023, 35(12): 1613-1629.
- [41] HUANG L J, LI F C, JI C, et al. Carbon Isotope Fractionation and Its Tracer Significance to Carbon Source During Precipitation of Calcium Carbonate in the Presence of *Bacillus Cereus* LV-1[J]. *Chemical Geology*, 2022, 609: 121029.
- [42] KEIR R S. The Dissolution Kinetics of Biogenic Calcium Carbonates in Seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(2): 241-252.
- [43] 王伟颖, 吕昌伟, 何 江, 等. 湖泊水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量及耦合关系[J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3674-3682.
- WANG Wei-ying, LYU Chang-wei, HE Jiang, et al. Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-sediment Interface in Lakes [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10): 3674-3682.