



黄河内蒙古段水体氧化亚氮溶存浓度、水-气界面排放通量和沉积物微生物群落结构

乌音嘎^{1,2}, 王晓丽^{1,2*}, 阿如汗^{1,2}, 吴霞^{1,2}, 虹霞^{1,2}, 贺晓雯¹, 刘娜¹

1 内蒙古师范大学 化学与环境科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022

2 内蒙古自治区环境化学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022

乌音嘎, 王晓丽, 阿如汗, 吴霞, 虹霞, 贺晓雯, 刘娜. 黄河内蒙古段水体氧化亚氮溶存浓度、水-气界面排放通量和沉积物微生物群落结构[J]. 微生物学报, 2024, 64(10): 3780-3797.

Wuyinga, WANG Xiaoli, Aruhan, WU Xia, HONG Xia, HE Xiaowen, LIU Na. Dissolved concentration of nitrous oxide, water-air interface emission flux, and sediment microbial community structure in the Inner Mongolia section of the Yellow River[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(10): 3780-3797.

摘要: 【目的】基于全球气候治理背景以及黄河流域在我国生态文明建设中的重要地位, 本研究于2023年7月选择黄河内蒙古段流域为对象, 测定流域内表层沉积物微生物群落结构与多样性、水体理化性质及水-气界面氧化亚氮(nitrous oxide, N₂O)气体通量。【方法】使用静态箱-气相色谱仪法对黄河内蒙古段水体 N₂O 溶存浓度、水-气界面 N₂O 排放通量进行探究, 使用高通量测序分析表层沉积物。【结果】结果表明黄河内蒙古段水体 N₂O 溶存浓度变化范围在 0.547 8–0.598 2 mg/m³ 之间, 均值为 0.574 1 mg/m³, 水-气界面 N₂O 排放通量(FN₂O)变化范围为–3.645 3–4.392 5 mg/(m²·d), 均值为 1.086 1 mg/(m²·d), 总体表现为大气 N₂O 的“源”。FN₂O 和 pH 呈极显著正相关、和电位呈显著负相关。表层沉积物中细菌共有 7 784 个操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU), 其中变形菌门(*Proteobacteriota*)以平均 35.13% 的丰度成为最优势菌群。氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA)相关基因丰度较低, 检测到 116 个 OTUs, *unclassified_d_Unclassified* 为优势菌属(平均丰度为 31.69%)。反硝化细菌共有 3 660 个 OTUs, 优势菌属为 *unclassified_k_norank_d_Bacteria* (平均丰度为 63.12%)。【结论】由于黄河内蒙古段 N₂O

资助项目: 国家自然科学基金(42167027); 内蒙古自治区自然科学基金(2020MS04013); 内蒙古自治区水环境安全协同创新中心(XTCX003); 内蒙古自治区教育厅资助内蒙古师范大学优秀研究生科研创新基金(2023HHYC012); 内蒙古师范大学支持在校优秀学生提升基本科研能力基金(2024BKCX06, 2024BKCX07)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42167027), the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (2020MS04013), the Collaborative Innovation Centre for Water Environment Safety of Inner Mongolia Autonomous Region (XTCX003), the Fundamental Research Funds for Inner Mongolia Normal University (2023HHYC012), and the Inner Mongolia Normal University Supporting Excellent Students to Enhance Basic Research Abilities Fund Project (2024BKCX06, 2024BKCX07).

*Corresponding author. E-mail: hxxwangxiaoli@163.com

Received: 2024-03-26; Accepted: 2024-07-19; Published online: 2024-07-24

相关数据较少, 因此本研究结果对填补江河 N_2O 数据具有积极意义, 为进一步了解沉积物微生物群落结构及功能菌在黄河治理中的应用提供参考, 有助于黄河的保护和净化计划。

关键词: 黄河内蒙古段; 氧化亚氮; 群落多样性; 浓度和通量; 影响因素

Dissolved concentration of nitrous oxide, water-air interface emission flux, and sediment microbial community structure in the Inner Mongolia section of the Yellow River

Wuyinga^{1,2}, WANG Xiaoli^{1,2*}, Aruhan^{1,2}, WU Xia^{1,2}, HONG Xia^{1,2}, HE Xiaowen¹, LIU Na¹

1 College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China

2 Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Chemistry, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China

Abstract: [Objective] Within the framework of global climate governance and considering the pivotal role of the Yellow River basin in China's ecological progress, this study focused on the Inner Mongolia segment of the Yellow River in July 2023. [Methods] We collected the surface sediment, water, and gas samples, with the aim of investigating the dissolved nitrous oxide (N_2O) concentration in the water, the N_2O emission flux (FN_2O) at the water-air interface, and the microbial community composition and diversity in surface sediments. [Results] The results revealed that the dissolved nitrous oxide (N_2O) concentration in the water of this segment varied between 0.547 8 mg/m^3 and 0.598 2 mg/m^3 , with an average of 0.574 1 mg/m^3 . The FN_2O at the water-air interface ranged from -3.645 3 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ to 4.392 5 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, averaging 1.086 1 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, which suggested this area was a net source of atmospheric N_2O . FN_2O showed a significantly positive correlation with pH and a significantly negative correlation with potential. The surface sediments harbored 7 784 operational taxonomic units (OTUs), with *Proteobacteria* (average abundance of 35.13%) being dominant. Ammonia-oxidizing archaea (AOA), a category of nitrifying bacteria, presented low abundance, with 116 OTUs among which *unclassified_d_Unclassified* (average abundance of 31.69%) was the dominant genus. For denitrifying bacteria, 3 660 OTUs were identified, with *unclassified_k_norank_d_Bacteria* (average abundance of 63.12%) being the dominant genus. In view of the scarcity of N_2O data for the Inner Mongolia section of the Yellow River, the findings of this study enrich the N_2O data repository of the Yellow River. [Conclusion] This study not only augments our understanding of the microbial community structure and functionality in sediments but also supports the conservation and purification of the Yellow River.

Keywords: Inner Mongolia section of the Yellow River; nitrous oxide; community diversity; concentration and flux; influencing factors

温室气体排放造成的温室效应是当今世界三大环境问题之一^[1], 氧化亚氮(N_2O)作为三大温室气体之一^[2], 具有显著的温室效应。尽管 N_2O 在大气中的浓度排在二氧化碳(carbon dioxide, CO_2)和甲烷(methane, CH_4)之后, 但它在吸收太阳辐射能量的能力上却显著超过前两者, 其效率分别是 CO_2 的 300 倍和 CH_4 的 12 倍^[3]。 N_2O 在大气中的存在时间长达 130 至 170 年之久^[4], N_2O 在大气中的稳定性极高, 目前唯一已知的消耗路径是通过大气中的光化学反应, 释放出的氮氧化物进一步破坏臭氧层。因此, N_2O 的排放量直接影响到臭氧层的恢复进程^[5]。因此, N_2O 在不同生态系统中的生成与排放正受到广大研究者的关注。

河流作为 N_2O 的重要排放源, 也是全球 N_2O 收支核算的重要贡献者^[6]。 N_2O 的产生途径主要包括硝化、反硝化、硝化细菌反硝化、硝酸盐异化还原成铵等微生物过程^[7]。然而, 消耗 N_2O 的微生物途径仅有 N_2O 还原过程一条^[8]。河流 N_2O 是多种氮转化的副产物或中间产物, 主要受微生物调控^[9]。河流 N_2O 的产生和排放不仅受河流内部水环境条件的调控, 还受到土地利用类型等流域特征的影响^[10]。

沉积物微生物群落结构与沉积物环境紧密相关且可以反映出河流生态系统的健康状况, 微生物(包括细菌、真菌和古菌)在河流及沉积物中的营养转化与氮素循环、有机物的形成与分解、能量流动及各种其他生态过程中发挥着重要作用^[11-12]。微生物种类丰富, 功能多样, 对环境变化十分敏感^[13-14], 是环境变化的重要指示物。河流微生物群落结构和演替过程影响河流中物质的迁移和转化^[15], 反映河流生态系统受到外部干扰的程度。

内蒙古自治区是黄河上游的重要源头地区之一, 为 I-III 类水质^[16]。境内河流、湖泊和地

下水资源又是黄河水系的重要补给源, 直接影响着黄河流域的水资源供给。黄河内蒙古段流经地区有工业、农业、旅游区等, 同时也流经草原、沙漠等具有地貌特征的地区, 是较具地域特色和代表性的河段。河流的地域差异性以及 N_2O 产排机制较为复杂, 现有关于 N_2O 生成和排放的研究多集中于农业生态系统, 水生生态系统中 N_2O 的排放受到的关注较少, 需要更多的研究进行填补说明^[17]。因此, 本研究对黄河内蒙古段水体氧化亚氮的溶存浓度、水-气界面 N_2O 排放通量 FN_2O 的变化特征及其影响因素和沉积物微生物的群落结构进行了探究。期望研究结果为河流 N_2O 的排放提供数据支持, 为估算河流温室气体的排放提供参考, 为进一步了解沉积物微生物群落结构及功能菌在黄河治理中的应用提供参考, 有助于黄河的保护和净化计划。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黄河全长约为 5 464 km, 流域面积为 752 400 km²。起源于青藏高原东部, 自西向东流经青海、甘肃、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西、山西、河南及山东等 9 个省(自治区), 总体呈“几”字型^[18-19]。黄河内蒙古段全长 830 km^[4], 从宁夏石嘴山附近流入内蒙古自治区境内, 石嘴山到呼和浩特市托克托县(Tuo Xian, TX)属于黄河上游, 上游以山地为主。TX 到老牛湾景区(Laoniawan, LNW)属于黄河中游, 黄河中下游以平原、丘陵为主。考虑到工业、农业、污水排放以及人为因素都会对温室气体排放通量产生影响, 因此本研究在黄河内蒙古段设 6 个采样点: 分别为拥有丰富的煤炭资源的工业城市乌海(Wuhai, WH)、地处河套平原的临河(Linhe, LH)、大规模农业种植的乌拉

特前旗(Wulateqian Qi, QQ)、经济中心和工业城市的包头(Baotou, BT)、厂房众多的 TX 和旅游景区 LNW。总体上各采样点位于黄河流域的最北端,地貌以高原为主,平均海拔在 1 000 m 以上,属温带大陆性季风气候。季节变化明显,春季风大、夏季炎热、秋季早晚温差大、冬季严寒,全区年平均降水量为 314.5 mm^[20]。黄河内蒙古段河道泥沙淤积主要来源于内蒙古境内的乌兰布和沙漠和库布齐沙漠,因此河流及沉积物都具有一定的典型性和代表性^[21]。表 1 为采样点的基本情况介绍。

1.2 样品采集和环境因子的测定

根据河流分布及水文特征,野外采样展开于 2023 年 7 月,在黄河内蒙古段设置的 6 个采样点进行样品采集。水体溶解氧(dissolved oxygen, DO)、电位(oxidation reduction potential, ORP)和电导率(electrical conductivity, EC)等使用便携式水质监测仪原位实时测得,平均风速和采样时的气温(temperature, T)由内蒙古气象局提供。野外使用黄河上覆水冲洗聚乙烯瓶 3–5 次,再将聚乙烯瓶置于水面以下采集水样,当水完全充满聚乙烯瓶为止,平行采集 3 份水样,将其置于暗箱低温环境(4 °C)中,在 4 h 内带回实验室,冷藏保存至 4 °C 的冷藏箱中,并用于后续理化性质的测定。

在实验室使用国标法测定总氮(total nitrogen, TN)浓度、氨氮(NH₄⁺-N)浓度、总磷(total phosphorus, TP)浓度,使用总有机碳分析仪测定溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、过

滤法测定总悬浮固体(total suspended solids, TSS)浓度。所有实验平行测定 3 份,在 1 周内测定完毕。

1.3 N₂O 浓度测定

水体中溶解的 N₂O 气体采集使用的是顶空平衡法^[22–24]:将收集的水样利用虹吸原理分装于 3 个 120 mL 顶空瓶中,将 60 mL 高纯氮气注入 120 mL 顶空瓶内置换出 60 mL 水,在顶空瓶上部形成顶空,振荡 60 s 后静置 0.5 h 使瓶内水气平衡,然后将顶空气体转移到镀铝内膜的气体采样袋中带回实验室测定浓度。

N₂O 溶存浓度的按照公式(1)计算^[25–26]。

$$C_{\text{water}} = C_0 \left(\frac{\beta RT}{22.4} + \frac{V_0}{V_1} \right) \quad (1)$$

式中: C_{water} 是河流表层水体温室气体的浓度, $\mu\text{mol/L}$; C_0 是平衡器内气液平衡时气相中 N₂O 的浓度, $\mu\text{mol/L}$; T 是平衡过程中水体的温度, °C; 22.4 是标准状况下的气体摩尔体积, L/mol; R 是理想气体状态常数, 8.314 J/(mol·K); V_0 是平衡器中气体的体积, mL; V_1 是平衡器中水体的体积, mL; β 是 Bunsen 系数, L/(L·Pa)。

Bunsen 系数是在一个标准大气压的条件下,单位体积的纯溶剂溶解气体溶质的最大体积, β 的计算见公式(2)^[26]。

$$\beta = 22.4 \times 10^{-6} K_{\text{H}} \quad (2)$$

式中: K_{H} 为采样时水温和标准大气压条件下的 N₂O 的 Henry 常数, $\mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{Pa})$, 其计算按照公式(3)进行。

表 1 采样点基本情况

Table 1 Basic information of sampling points

| Sampling points | Longitude | Latitude | Altitude (m) | Annual rainfall (mm) | $T/^\circ\text{C}$ | Wind velocity (m/s) |
|-----------------|-------------|------------|--------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| WH | E106°63'35" | N39°57'20" | 1 150 | 283 | 33 | 2 |
| LH | E107°23'40" | N40°43'33" | 1 050 | 148 | 31 | 2 |
| QQ | E108°37'45" | N40°43'19" | 1 500 | 286 | 33 | 2 |
| BT | E109°92'10" | N40°53'27" | 1 067 | 309 | 28 | 3 |
| TX | E111°18'75" | N40°21'74" | 1 132 | 358 | 28 | 2 |
| LNW | E111°44'39" | N39°66'68" | 1 129 | 410 | 30 | 2 |

$$K_H = K_H^0 e^{K_r \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0} \right)} \quad (3)$$

式中： K_H^0 是在 0 °C 和 101 325 Pa 条件下的 Henry 常数，根据文献[27]N₂O 的 K_H^0 值为 0.024 μmol/(L·Pa)； K_r 是表征 Henry 常数随温度变化的参数； T 是水样的实际温度，°C， T^0 为 0 °C。

1.4 水-气界面 N₂O 通量

水-气界面气体采集使用静态箱法^[24,28-29]：用特制箱子罩在一定面积液体的下垫面上方，隔绝箱内外气体的交换，是只对底部的水面气体开放的通量箱，通常 N₂O 浓度在箱内顶空呈只对底部(水面)气体开放的通量箱，能在一定时间内监测 N₂O 箱内浓度，通常 N₂O 浓度在箱内顶空增长，每 5 min 抽取 1 次气体，抽取气体转移进气袋中带回实验室，最后使用气相色谱仪测定 N₂O 的浓度。采样前，抽样查看采样袋是否漏气膨胀，以确保采样袋在存储和运输的过程中无泄漏。采样时，首先用橡胶管把采样袋跟便携式采样泵连上，并将采样泵带有针头的另一端插入静态箱中。先打开便携式气体采样泵，再打开采样袋上的采样阀，空气样品在泵的抽取下进入采样袋，每次抽取 100–200 mL 气体。其中应注意采样阀不宜开得过大，开得过大导致采样袋漏气使采样泵无法将采样袋充满。通过气相色谱法^[30-31]测定气体样品中 N₂O 的含量。

气相色谱法是指每隔一定时间抽取采样袋气体，利用气相色谱仪测定该气体浓度，从而计算出被测气体的交换通量^[32]。气相色谱仪的前进样口温度为 375 °C，柱温为 55 °C，前后电子

捕获检测器温度分别为 350 °C 和 200 °C。在样品分析过程中随机插入标准气体进行质量控制。静态箱法 N₂O 的气体通量由公式(4)计算^[33-34]。

$$F = \frac{K \times F_1 \times F_2 \times V}{A \times F_3} \quad (4)$$

式中： F 为温室气体通量，mg/(m²·d)； K 为拟气直线的斜率； F_1 为浓度转换系数； F_2 为 min 与 h 的转化系数； V 为浮箱有效容积，m³； A 为界面表面积，m²； F_3 为 μg 与 mg 的转化系数。

1.5 微生物群落结构分析

采集 0–10 cm 的河流表层沉积物，一部分装入采样袋中低温带回实验室进行沉积物理化性质的测定。一部分沉积物装入 50 mL 离心管中，立即放入装满干冰的泡沫箱中并送至上海美吉生物医药科技有限公司进行微生物 DNA 的提取，提取合格的 DNA 进行 PCR 扩增和产物纯化，PCR 反应体系：2×Pro Taq 10 μL，正、反向引物(5 μmol/L)各 0.8 μL，DNA 模板 10 ng/μL，ddH₂O 补至 20 μL。PCR 反应条件：95 °C 预变性 3 min；95 °C 变性 30 s，55 °C 退火 30 s，72 °C 延伸 45 s，35 个循环；72 °C 延伸 10 min。扩增结束后，采用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物，上样量为 3 μL。然后对 PCR 产物进行定量和均一化，构建 Illumina 平台文库，进行 Illumina 平台测序，使用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 对环境因子进行多元直接梯度分析反映菌群与环境因子之间关系；通过相关性热图发现 top10 的优势微生物与环境因子之间的相关性大小，说明影响环境变量的关键微生物物种。高通量测序引物序列列表如表 2 所示。

表 2 高通量测序引物序列列表

Table 2 Primers used in this study

| Microbial group | Target genes | Primers name | Primer sequences (5'→3') |
|-------------------------------------|--|----------------|---|
| Prokaryotic organism | Bacterial 16S rRNA gene (468 bp, V3–V4) | 338F 806R | ACTCCTACGGGAGGCAGCAG GGACTACHVGGGTWTCTAAT |
| Prokaryotic organism (archaea) | AOA (600 bp) | amoAF amoAR | STAATGGTCTGGCTTAGACG GCGCCATCCATCTGTATGT |
| Prokaryotic organism (bacterium) | Denitrifying bacteria (400 bp) | cd3aF R3cdR | G TSAACG TSAAGGARACSGG GASTTCGGRTGSGTCTTGA |

测序的序列提交并上传到 NCBI 数据库, 相关的登录号信息如下: BioProject ID 为 PRJNA1100980, Submission ID 为 SUB14382376。

1.6 数据计算

本研究所有原始数据使用 Microsoft Excel 2019 进行标准化处理和计算, 使用 Arc GIS 10.8 进行采样点制图, 使用 Origin 9.1 进行 N₂O 通量与环境变量、水样和沉积物理化性质间相关的数据处理分析, 通过皮尔逊双变量分析和偏相关分析研究水-气界面 N₂O 通量的环境影响因子, 并进行线性回归拟合分析, 以 $P < 0.05$ 作为相关, $P < 0.01$ 作为显著相关, $P < 0.001$ 作为极显著相关。采用邻近算法, 按照 97%相似性对非重复序列(不含单序列)进行可操作性分类单元(operational taxonomic unit, OTU)聚类分析。微生物多样性指数中 ACE 指数和 Chao1 指数用于表

征物种丰富度。香农指数(Shannon index)与辛普森指数(Simpson index)相结合, 通常用来反映 α 多样性指数。香农指数值越大, 群落多样性越高。辛普森指数值越大, 表明群落多样性越低。生态优势度指数(sobs 指数)反映的是样本实际包含的物种数目。sobs 指数越大, 说明群落内物种数量分布越不均匀, 优势种的地位越突出。

2 结果与讨论

2.1 水质的基本理化性质

2023 年 7 月黄河内蒙古段流域气温变化范围在 28–33 °C 之间, 平均气温为 31 °C; 风速变化范围在 2–3 m/s 之间, 平均值为 2.2 m/s。本研究中测定的基本理化性质结果见图 1。其中, 水温(temperature of water, T_w)变化范围在 23.8–26.8 °C 之间, 平均温度为 25.6 °C; pH 值变化范围在

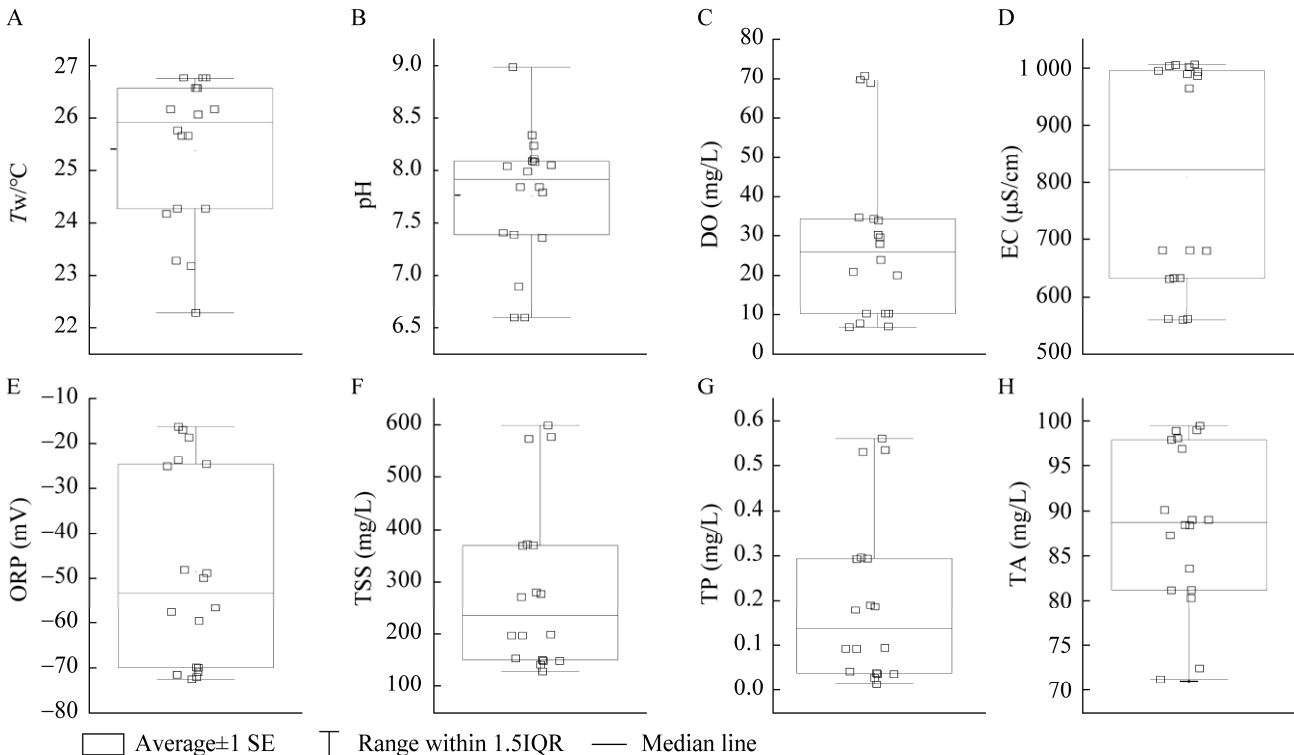


图 1 黄河内蒙古段水质的理化性质 A–H 分别为内蒙古段水质的 T_w 、pH、DO、EC、ORP、TSS、TP 和 TA 参数

Figure 1 Physical and chemical properties of water quality in the Inner Mongolia section of the Yellow River. A–H are T_w , pH, DO, EC, ORP, TSS, TP, and TA, respectively.

6.70–8.28 之间, 平均值为 7.75, 水体呈弱碱性; DO 变化范围在 7.22–70.06 mg/L 之间, 平均值为 28.87 mg/L; EC 变化范围在 561–1 004 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间, 平均值为 811 $\mu\text{S}/\text{cm}$; ORP 变化范围在 -72.8–17.4 mV 之间, 平均值为 -48.9 mV; TSS 变化范围在 138–582 mg/L 之间, 平均值为 284 mg/L; TP 变化范围在 0.039–0.568 mg/L 之间, 平均值为 0.040 mg/L; TA 变化范围在 74.73–98.75 mg/L 之间, 平均值为 88.36 mg/L。

图 2 为黄河内蒙古段表层水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 含量随水体 N_2O 溶存浓度和 FN_2O 的变化的拟合曲线图, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 整体在 0.840–1.510 mg/L 之间浮动, 平均值为 1.100 mg/L; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 0.787–2.114 mg/L 之间浮动, 平均值为 1.139 mg/L; TN 在 5.968–8.009 mg/L 之间浮动, 平均值为 7.124 mg/L; 从图 2A 可知, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($R^2=0.255$) 和 TN ($R^2=0.025$) 的分布较为离散,

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($R^2=0.122$) 的拟合较好。可以表明, 水体中较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度促进硝化作用从而会产生更多的 N_2O ^[35]。从图 2B 可知, $c(\text{N}_2\text{O})$ ($R^2=0.319$) 拟合得较好, 其余点较为离散。

2.2 沉积物的基本理化性质

本研究测定了沉积物中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、烧失量(loss on ignition, LOI)和阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC), 结果见表 3。由表 3 可知, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化范围在 14.75–42.42 mg/kg 之间, 平均值为 26.42 mg/kg; TN 变化范围在 0.83–4.04 mg/kg 之间, 平均值为 2.23 mg/kg; TP 变化范围在 36.23–61.06 mg/kg 之间, 平均值为 50.37 mg/kg; LOI 变化范围在 5.63%–12.90% 之间, 平均值为 7.69%; CEC 变化范围在 1.30–10.35 cmol/kg 之间, 平均值为 3.62 cmol/kg; 体积平均粒径变化范围在 25.90–33.27 μm 之间, 平均值为 30.96 μm 。

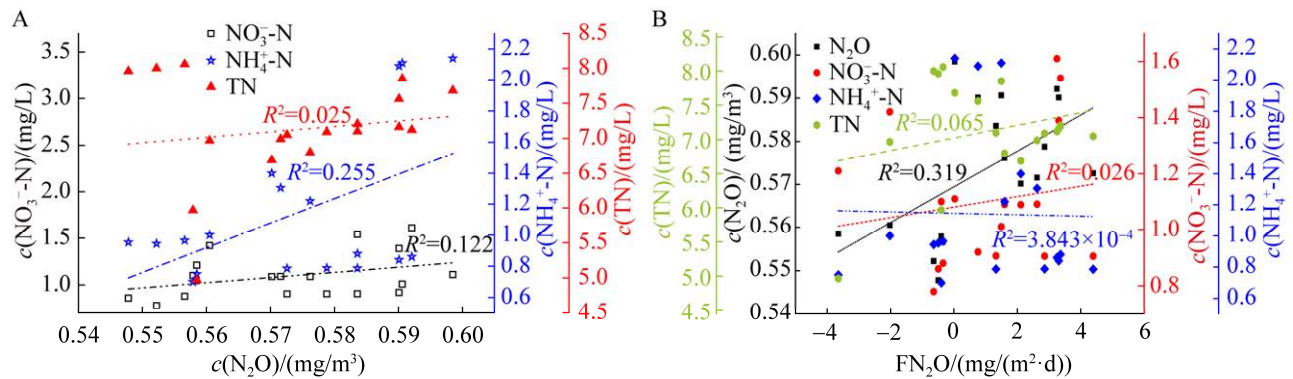


图 2 黄河内蒙古段表层水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 随 N_2O 溶存浓度的变化(A)和随 FN_2O 的变化(B)
Figure 2 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN in the surface water of the Inner Mongolia section of the Yellow River with N_2O concentration (A) and FN_2O (B).

表 3 黄河内蒙古段沉积物的理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of sediments in the Inner Mongolia section of the Yellow River

| Sampling points | WH | LH | QQ | BT | TX | LNW |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/kg) | 35.62 | 28.26 | 19.78 | 42.42 | 14.75 | 17.70 |
| TN (mg/kg) | 2.73 | 0.83 | 2.90 | 4.04 | 1.49 | 1.37 |
| TP (mg/kg) | 61.06 | 51.06 | 46.87 | 51.39 | 55.58 | 36.23 |
| LOI (%) | 12.90 | 6.44 | 8.37 | 6.17 | 6.66 | 5.63 |
| CEC (cmol/kg) | 10.35 | 1.96 | 2.82 | 1.30 | 1.67 | 3.62 |
| Volume average particle size (μm) | 33.27 | 26.40 | 27.90 | 40.12 | 25.90 | 32.18 |

2.3 N₂O 浓度和通量的变化

通过图 3 对比黄河内蒙古段 6 个采样点的 N₂O 溶存浓度和排放通量的平均值后发现, 水体 N₂O 溶存浓度高于大气中 N₂O 浓度, 可证明湖泊温室气体的平衡浓度相较于大气过饱和, 这一现象与天津市滨海河流 N₂O 的研究是相同的^[36]。内蒙古地区夏季的降水量较其他季节偏高, 降水冲刷能使更多的土壤流入黄河, 间接导致河流中的 N₂O 过饱和, 致使河流温室气体排放量增加。N₂O 溶存浓度变化范围在 0.547 8–0.598 2 mg/m³ 之间, 均值为 0.574 1 mg/m³, 最高值出现在 TX, 最低值出现在 BT; 大气中 N₂O 的浓度变化范围在 0.542 9–0.566 1 mg/m³ 之间, 均值为 0.553 4 mg/m³, 最大值出现在 TX, 最小值出现在 BT, 变化走势与 N₂O 溶存浓度大致相同; FN₂O 变化范围为–3.645 3–4.392 5 mg/(m²·d), 均值为 1.086 1 mg/(m²·d)。其中, WH 和 BT 的 N₂O 通量为负值, 说明河流从大气中吸收气体, 表现为大气 N₂O 的“汇”, 其他采样点为正值, 说明河流向大气排放气体, 为大气 N₂O 的“源”且值高于“汇”。总体上看, 黄河内蒙古段表现为大气 N₂O 的“源”, 与其他研究结果^[37–40]一致。

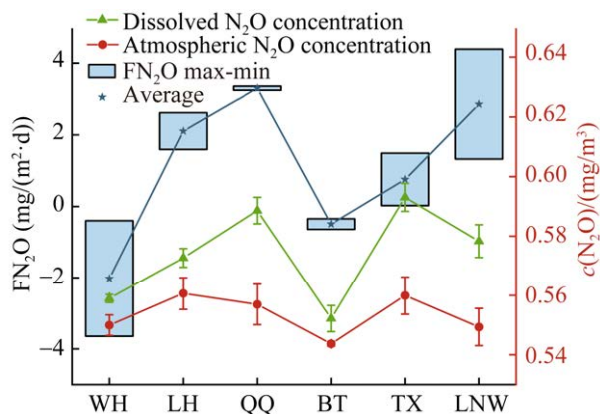


图 3 黄河内蒙古段 N₂O 溶存浓度和通量变化图
Figure 3 Changes in dissolved N₂O concentration and flux in the Inner Mongolia section of the Yellow River.

2.4 N₂O 溶存浓度及通量与理化性质的相关性分析

本研究综合考虑了河流 N₂O 浓度和水文等条件, 使得本研究计算结果更加可靠。黄河内蒙古段水体 N₂O 溶存浓度、FN₂O 和环境因子的相关性分析结果如图 4 所示。将数据结合起来进行皮尔逊相关性分析后得出, 黄河内蒙古段水-气界面 FN₂O 主要受到 pH 和氧化还原电位的影响。其中, FN₂O 和 pH 呈极显著正相关($P < 0.001$), 与电位呈显著负相关($P < 0.01$); N₂O 溶存浓度及通量与其他水质参数未表现出明显的相关性。

2.5 微生物群落结构

2.5.1 沉积物微生物群落多样性

表 4 为 6 个采样点的沉积物样品所获得的多样性数据, 共 18 个沉积物样品。本研究检索出细菌 7 784 个 OTUs, 分属于 56 门 178 纲 436 目 696 科 1 290 属 2 659 种, 主要为变形菌门 (*Proteobacterota*) 占优势; 氨氧化古菌 116 个 OTUs 分属于 6 门 8 纲 9 目 9 科 9 属 15 种, 属水平上 *unclassified_d__Unclassified* 为优势菌群。反硝化细菌的 3 660 个 OTUs 分属 4 门 8 纲 8 目 26 科 38 属 62 种, 属水平上 *unclassified_k__norank_d__Bacteria* 为优势类群。细菌的 ACE 指数在 2 345.96–5 109.92 之间, AOA 的 ACE 指数在 42.28–90.05 之间, 反硝化细菌 ACE 指数在 384.30–4 132.70 之间。各样本的覆盖率在 87.97%–99.98% 之间, 表明大多数样本的采样足以代表土著物种且较为丰富。其中, QQ 的变形菌门 (50.33%) 占细菌整体比例最大; BT 的 *unclassified_d__Unclassified* (57.99%) 占 AOA 整体比例最大, LH 的 *unclassified_k__norank_d__Bacteria* (78.76%) 占反硝化细菌整体比例最大。而 ACE 指数、Shannon 指数和 sobs 指数进一步显示出细菌群落结构和反硝化细菌里 WH 最为丰富且多样性最高、AOA 里 TX 最丰富且多样

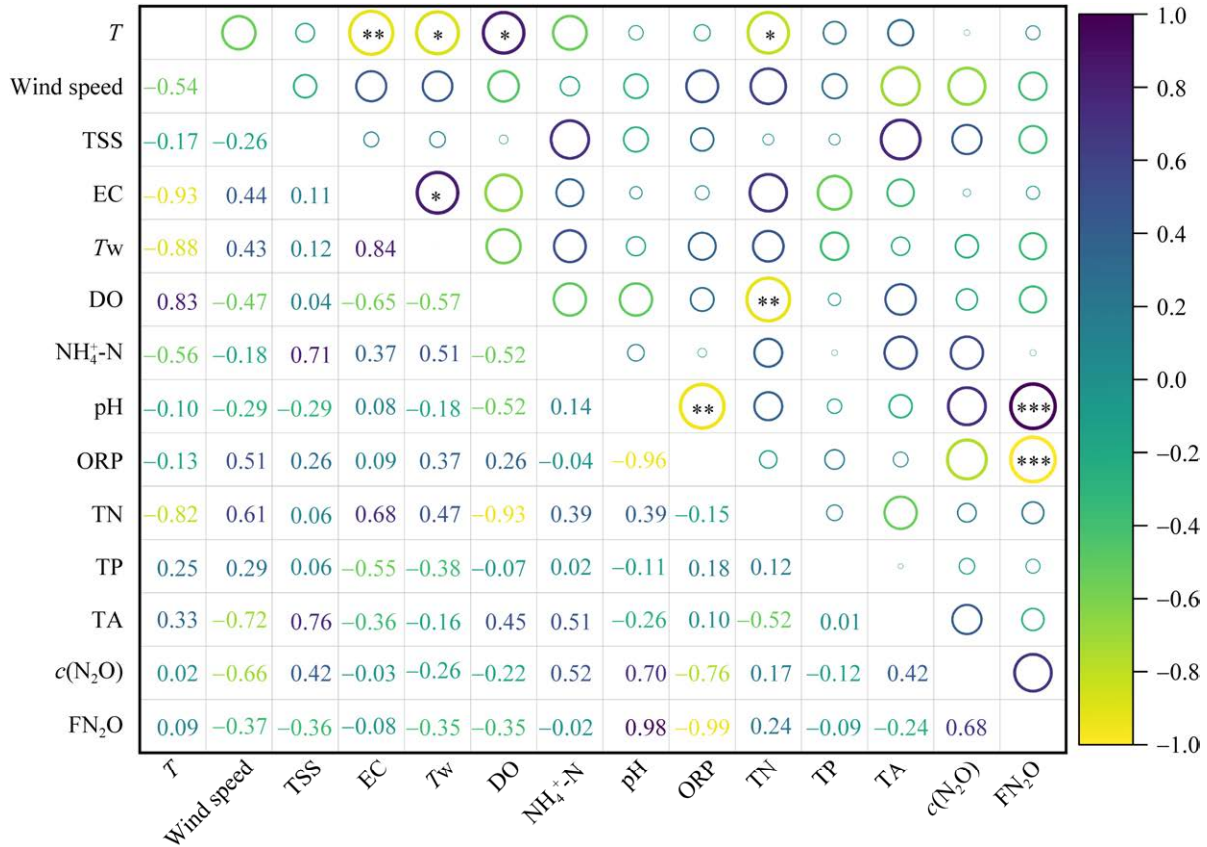


图 4 水体 N₂O 溶存浓度、FN₂O 和理化性质的皮尔逊相关性

Figure 4 Pearson correlation between dissolved N₂O concentration, FN₂O and physicochemical properties. *: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001.

表 4 黄河内蒙古段沉积物微生物群落多样性指数表

Table 4 Diversity index of sediment microbial community in the Inner Mongolia section of the Yellow River

| Bacterial species | Sampling points | OTUs | OTU sequence | ACE index | Chao1 index | Coverage | Shannon index | Simpson index | Sobs index |
|----------------------------|-----------------|-------|--------------|-----------|-------------|----------|---------------|---------------|------------|
| Bacterial 16S rRNA gene | WH | 4 098 | 92 090 | 5 109.92 | 4 874.47 | 0.964 3 | 7.133 1 | 0.002 189 | 4 098 |
| | LH | 2 828 | 40 339 | 3 137.75 | 3 095.84 | 0.984 4 | 6.719 3 | 0.003 654 | 2 828 |
| | QQ | 2 722 | 46 455 | 3 141.82 | 3 031.08 | 0.981 6 | 6.016 9 | 0.016 533 | 2 722 |
| | BT | 3 510 | 51 719 | 3 870.92 | 3 739.22 | 0.981 6 | 7.045 4 | 0.002 569 | 3 510 |
| | TX | 3 299 | 65 396 | 4 144.50 | 4 225.41 | 0.971 0 | 6.814 0 | 0.004 911 | 3 299 |
| | LNW | 2 214 | 50 475 | 2 345.96 | 2 296.85 | 0.992 0 | 6.576 6 | 0.003 236 | 2 214 |
| AOA | WH | 76 | 30 954 | 80.45 | 80.67 | 0.999 1 | 2.592 8 | 0.143 600 | 76 |
| | LH | 54 | 76 155 | 58.97 | 56.50 | 0.999 4 | 2.248 1 | 0.185 500 | 54 |
| | QQ | 41 | 36 748 | 42.28 | 41.50 | 0.999 8 | 2.504 2 | 0.147 500 | 41 |
| | BT | 71 | 30 071 | 75.15 | 75.67 | 0.999 1 | 1.866 2 | 0.344 700 | 71 |
| | TX | 86 | 11 759 | 90.05 | 90.67 | 0.999 1 | 2.819 4 | 0.133 600 | 86 |
| | LNW | 42 | 31 191 | 45.33 | 44.00 | 0.999 5 | 2.090 0 | 0.199 200 | 42 |
| Denitrifying bacteria nirS | WH | 1 670 | 59 101 | 4 132.70 | 2973.57 | 0.879 7 | 6.322 3 | 0.006 040 | 1 670 |
| | LH | 911 | 58 377 | 1 828.87 | 1458.11 | 0.943 5 | 5.236 4 | 0.017 470 | 911 |
| | QQ | 941 | 59 778 | 1 352.36 | 1 300.03 | 0.950 1 | 5.455 8 | 0.012 950 | 941 |
| | BT | 1 547 | 81 608 | 3 971.91 | 2 876.25 | 0.887 5 | 6.166 0 | 0.006 570 | 1 547 |
| | TX | 1 078 | 16 783 | 1 521.01 | 1 501.46 | 0.943 7 | 5.680 0 | 0.017 360 | 1 078 |
| | LNW | 324 | 47 453 | 384.30 | 391.68 | 0.989 7 | 4.275 5 | 0.032 680 | 324 |

性最高。与之对应 WH 和 TX 沉积物中的 TP 含量也较其他采样点高,这说明 WH 和 TX 为更多的微生物提供了生存空间。

2.5.2 沉积物微生物群落组成

图 5 展示了各采样点细菌群落相对丰度组成,细菌门水平上 top10 的优势类群为变形菌门, 占总细菌群落的 23.13%–50.33%, 均值为 35.13%。大多数为兼性或专性厌氧的革兰氏阴性菌,可以有效去除废水中的有机物。变形菌门可以通过异养或从太阳光中获得能量进行代谢,多样化的能量途径有利于其在自然界中存在^[41]。其次为绿弯菌门(*Chloroflexota*),占 4.90%–14.80%,均值为 10.25%。绿弯菌门是一类光合作用细菌,具有独特的叶绿素荧光素 a/b 吸收光谱。在水生和陆地环境中广泛存在,同时也是好氧异养菌,在活性污泥系统中有较好的生物除磷作用,但当绿弯菌门丝状菌大量生长变为优势菌群时会引发污泥膨胀从而降低活性污泥沉降性能。酸杆菌门(*Acidobacteriota*)占 4.57%–21.24%,均值为 10.28%,其是革兰氏阴性菌,在土壤中发挥着重要的分解和生物转化作用,对土壤健康和植物生长有着重要影响。因此在河流或沉积物中普遍存在,但现在对它们研究较少;放线菌门(*Actinomycetota*)占 3.80%–15.40%,均值为 8.79%,绝大多数为异养好氧型,在好氧条件下

可以吸收磷元素,在厌氧条件下可以分解氨基酸等有机物。拟杆菌门(*Bacteroidota*)占 2.97%–14.33%,均值为 8.53%,其为专性厌氧微生物,具有降解生物大分子蛋白质和多糖的能力,是降解化学需氧量的主要菌群。脱硫杆菌门(*Desulfobacterota*)占 2.03%–5.91%,均值为 3.90%,其能将硫化物和亚铁盐还原成硫和硫酸盐,这个过程对于全球硫循环的平衡和维持非常重要,硫化物和硫酸盐是水体和土壤中重要的化学成分。脱硫杆菌门还具有生物修复的潜力,能够对土壤中的污染物进行厌氧转化,减少铀、铬和铁等有毒金属,并对环境中的污染物进行转化。硝化螺旋菌门(*Nitrospirota*)占 1.45%–4.61%,均值为 2.83%,其是一类革兰氏阴性细菌,是污水处理厂中执行亚硝酸盐氧化功能的关键类群。厚壁菌门(*Firmicuteota*)占 1.60%–5.67%,均值为 3.33%,其是可抵抗极端环境的革兰氏阳性菌,能在有氧或缺氧的环境中进行代谢,并参与了硝化、反硝化过程^[42],细胞壁肽聚糖含量较高。芽单胞菌门(*Gemmatimonadota*)占 1.59%–6.55%,均值为 2.85%,其在低氧或缺氧条件下能够生长,并且耐受一定的重金属和有机污染物。芽单胞菌门在土壤和水体中发挥重要的生态功能,如有机物分解和氮循环等;还能降解土壤中的钾元素,并释

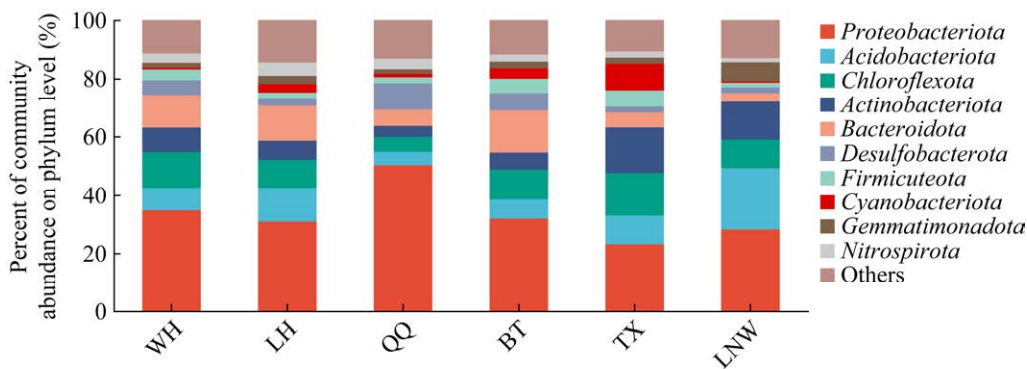


图 5 沉积物细菌优势菌门水平上的相对丰度图

Figure 5 The relative abundance of dominant bacterial phyla at the level of sediment bacteria.

放出可溶性钾以及其他中微量元素, 如钙、硫、镁、铁、锌、铜、锰等来提供营养, 增强作物的抗逆性能; 更能够促进土壤团粒结构的形成, 防止土壤板结和土壤水分蒸发, 从而活化土壤, 提高土壤肥力。蓝绿藻门 (*Cyanobacteriota*) 占 0.63%–9.21%, 均值为 3.05%, 有些细菌能通过产氧光合作用获取能量, 有些也能通过异营来获取能量。蓝绿藻门还可以对细胞进行保护和筛选物质进出, 调解细胞代谢生长, 与 N 和 P 浓度具有耦合关系^[43]。除变形菌门、绿弯菌门和酸杆菌门外, 放线菌门、拟杆菌门和蓝藻菌门也是水体浮游细菌群落中的常见优势类群^[44-45]。

沉积物 AOA 群落组成在属水平上的相对丰度见图 6A, 优势菌分别为 *unclassified_d_Unclassified*, 相对丰度在 15.54%–57.99%之间。

其次是 *norank_p_Crenarchaeota* (17.56%–39.99%)、*norank_d_Archaea* (0.78%–35.78)、*unclassified_k_norank_d_Archaea* (5.55%–17.64%)、*norank_d_Bacteria* (0.23%–14.22%)、*norank_p_Thaumarchaeota* (0.94%–6.76%)、*Nitrososphaera* (0.34%–6.65%)、*Nitrosopumilus* (0.31%–5.87%) 和 *unclassified_p_Thaumarchaeota* (0.03%–1.63%)。氮球菌属好氧, 但能在低氧压下生长。几乎所有菌株能产生水溶性或荧光色素, 能利用糖、醇、有机酸和盐类生长。每消耗 1 g 碳水化合物(通常是葡萄糖)至少可固氮 10 mg, 而产氧脱氮古菌会通过不同的途径产生氮气和氧气。其中, N₂O 充当中间产物而被吸收或排放。图 6B 为反硝化细菌属水平群落组成的相对丰度, 其中优势菌为 *unclassified_k_norank_d_Bacteria*

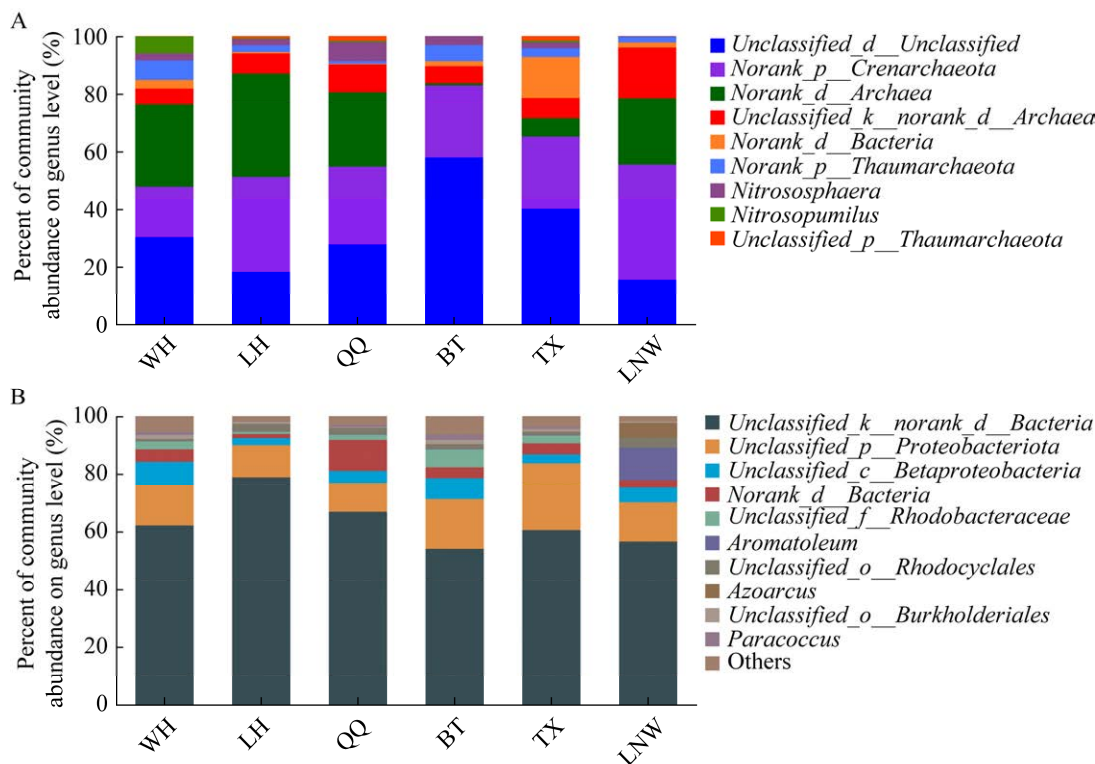


图 6 沉积物 AOA 优势菌属(A)和反硝化细菌优势菌属(B)的相对丰度

Figure 6 Relative abundance of dominant genera of ammonia oxidizing bacteria (A) and dominant genera of denitrifying bacteria (B) in sediment.

k_norank_d_Bacteria, 相对丰度在 54.04%–78.76% 之间。其次是 *unclassified_p_Proteobacterota* (9.95%–23.16%)、*unclassified_c_Betaproteobacteria* (2.42%–8.28%)、*norank_d_Bacteria* (1.43%–10.80%)、*unclassified_f_Rhodobacteraceae* (0.77%–6.29%)、芳香菌属 (*Aromatoleum*, 0.11%–11.43%)、*unclassified_o_Rhodocyclales* (0.65%–3.99%)、固氮弓菌属 (*Azoarcus*, 0.08%–5.15%)、*unclassified_o_Burkholderiales* (0.27%–1.46%) 和副球菌属 (*Paracoccus*, 0.14%–1.88%)。其中

芳香菌属通常参与硝化过程和有机物释放出氮化合物的分解代谢过程。固氮弓菌属依赖硝酸盐, 在硝化过程中有固氮作用, 会增加沉积物中的氮含量。副球菌属多数好氧, 是以有机碳作为能源的异养硝化菌。

2.5.3 微生物 RDA 分析

为探究细菌群落组成与 N_2O 通量的相关性, 将样本中细菌门水平群落分别与 N_2O 排放通量进行 RDA 分析, 结果见图 7A。优势菌群用箭头表示, 箭头长短表示菌群对物种影响程度, 线

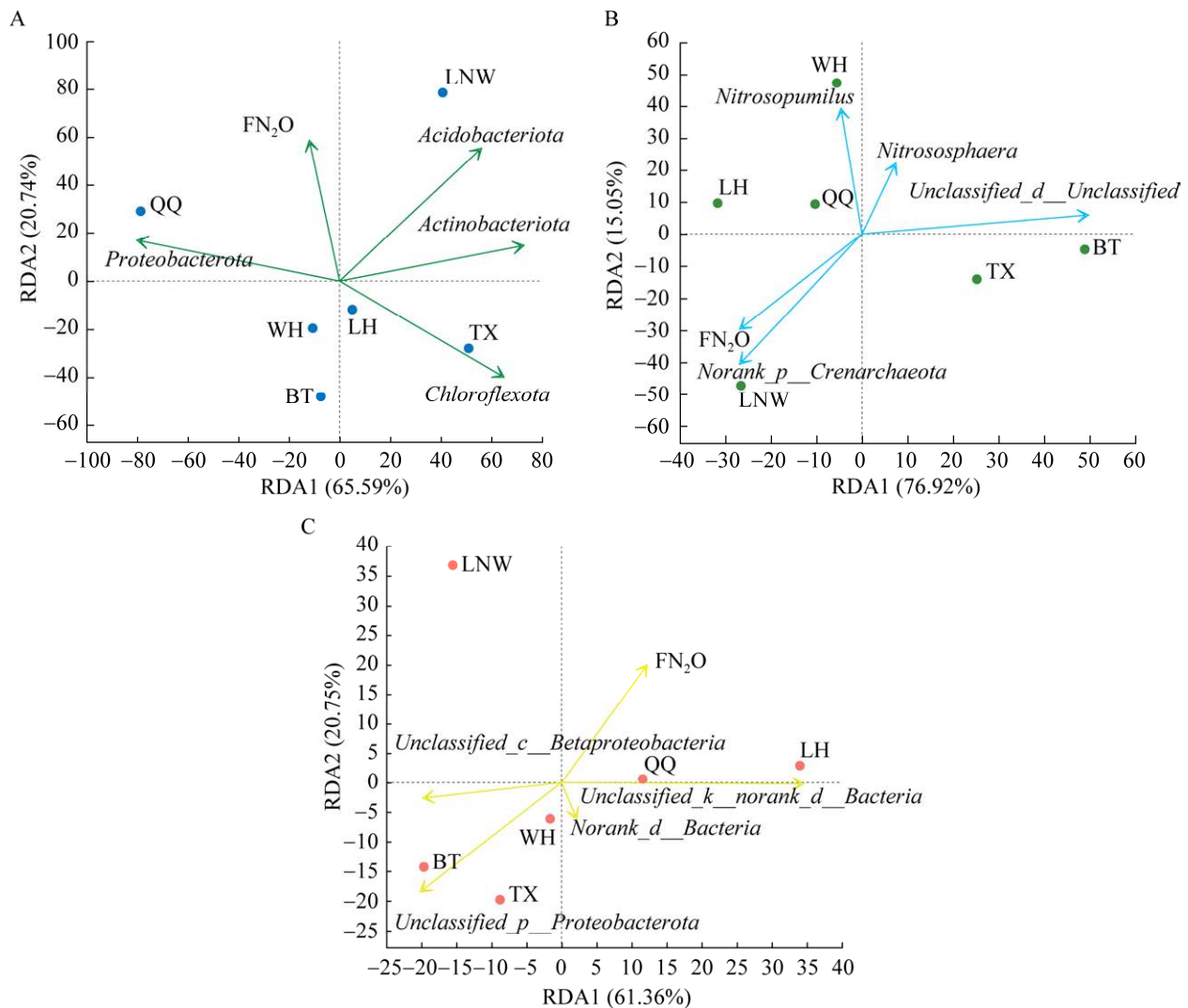


图 7 沉积物细菌门水平群落(A)、AOA 属水平群落(B)和反硝化细菌属水平群落(C)与 FN_2O 的冗余分析
Figure 7 RDA analysis of phylum level of bacterial (A), genus level of ammonia oxidizing bacteria (B) and genus level of denitrifying bacteria (C) in sediment with FN_2O .

越长影响越大。箭头间的夹角代表正、负相关性(锐角:正相关;钝角:负相关;直角:无相关性);从样品点向箭头做投影,投影点距离原点的距离代表菌群对样本点整体群落分布相对影响的大小。由图 7 可知,沉积物中细菌群落对 N_2O 通量变化的解释度为 86.33%。变形菌门和酸杆菌门与 N_2O 排放通量呈正相关。绿弯菌门与 N_2O 排放通量呈显著负相关。例如样本点 QQ 和 LNW 细菌群落组成与 N_2O 排放通量呈正相关,样本点 WH、LH、BT 和 TX 细菌群落组成与 N_2O 排放通量呈显著负相关。

将 AOA 和反硝化细菌属水平群落分别与 N_2O 排放通量进行 RDA 分析,如图 7B、7C 所示。由图 7 可知,沉积物中 AOA 对 N_2O 通量变化的解释度为 91.97%。其中 *norank_p_Crenarchaeota* 与 N_2O 排放通量呈显著正相关,*unclassified_d_Unclassified* 和氮球菌属与 N_2O 排放通量呈显著负相关,产氧脱氮古菌与 N_2O 排放通量呈负相关。例如 AOA 对样本点 BT 的群落分布的相对影响最大。反硝化细菌群落对 N_2O 通量变化的解释度为 82.11%。*unclassified_k_norank_d_Bacteria* 与 N_2O 排放通量呈显著正相关,*unclassified_p_Proteobacterota* 与 N_2O 排放通量呈显著负相关,*unclassified_c_Betaproteobacteria* 与 N_2O 排放通量呈负相关。反硝化细菌对样本点 TX 的群落分布的相对影响最大。

2.5.4 微生物环境因子相关性分析

微生物易受环境因子的改变而影响群落结构^[46]。如图 8A 所示, NH_4^+-N 与 *Bacteroidota* 呈显著正相关($P<0.01$), Tw 与变形菌门呈显著负相关($P<0.01$),张紫薇等^[47]利用 RDA 分析发现, Tw 是影响水体内微生物群落结构变化的重要驱动因素。 ECw 与硝化螺旋菌门呈负相关($P<0.05$), TP 与芽单胞菌门呈负相关($P<0.05$)。 NH_4^+-N 和 Tw 对沉积物中细菌群落的影响较大。

如图 8B 所示,产氧脱氮古菌与 LOI 和 CEC 呈显著正相关($P<0.01$),与 DOw 呈正相关($P<0.05$)。 *norank_d_Bacteria* 与 $TSSw$ 呈正相关($P<0.05$), TSS 是浮游微生物群落结构与食物网变化的主要驱动因素之一^[43]。 pHw 与 *norank_p_Thaumarchaeota* 呈极显著负相关($P<0.001$),与产氧脱氮古菌呈负相关($P<0.05$)。 *norank_p_Crenarchaeota* 和 *unclassified_k_norank_d_Archaea* 与 TP 呈负相关($P<0.05$)。 pHw 对沉积物中细菌群落的影响较大。在富营养化水体中,氮素对部分微生物有限制作用^[48],本研究中也表明沉积物 NH_4^+-N 和 TN 浓度对 AOA 群落结构无显著影响。如图 8C 所示, TN 与 *unclassified_f_Rhodobacteraceae* 和副球菌属呈正相关($P<0.05$)。 pHw 与 *unclassified_o_Burkholderiales* 呈负相关($P<0.05$), Tw 与 *norank_d_Bacteria* 呈负相关($P<0.05$), TP 与芳香菌属、*unclassified_o_Rhodocyclales* 和固氮弓菌属都是呈负相关($P<0.05$)。

沉积物微生物群落组成结构和功能通常被认为对有机物、某些无机盐和含氧量等水的物理化学性质的变化很敏感^[49-50]。然而表层沉积物微生物群落的结构对位置、深度和温度的变化都十分敏感。本研究未对沉积物深度进行探究,其余物理化学性质的变化还需要在未来的长期时间尺度上进行验证。期望之后能进一步研究其他细菌群落结构及其相互作用机理,这可能有助于改进黄河内蒙古段的保护和设计。

3 结论

本研究揭示了黄河内蒙古段水体中 N_2O 的溶存浓度、水-气界面 N_2O 排放通量和沉积物微生物群落结构与多样性。结果表明,水体 N_2O 溶存浓度变化范围在 $0.547\ 8\text{--}0.598\ 2\ \text{mg/m}^3$ 之

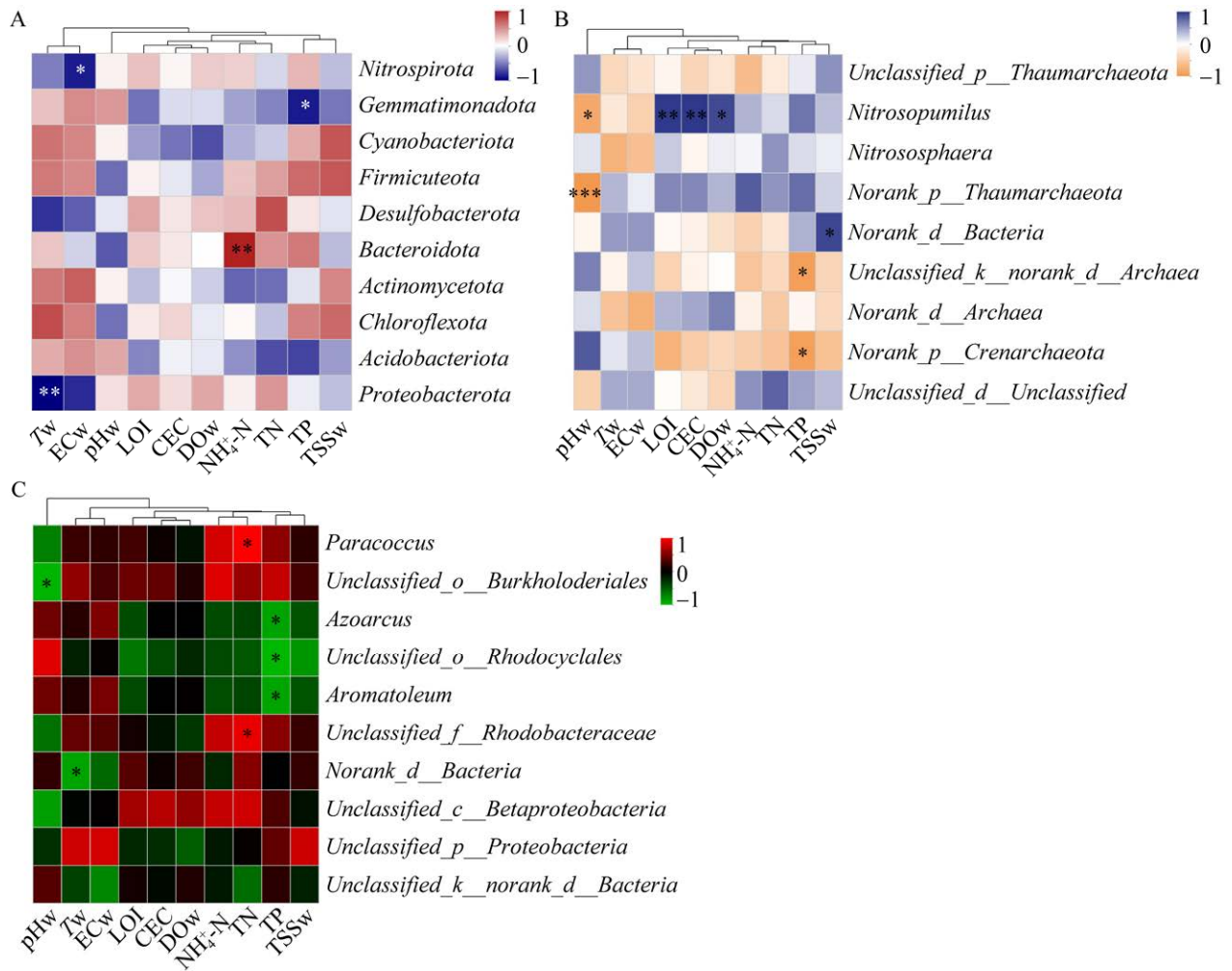


图 8 细菌门水平群落(A)、AOA 属水平群落(B)、反硝化细菌属水平群落(C)与环境因子的相关性热图
 Figure 8 Correlation analysis between phylum level of bacterial (A), genus level of AOA (B), genus level of denitrifying bacteria (C) and environmental factors. pHw is the pH of the water; Tw is the temperature of the water; ECw is the conductivity of the water; LOI is the loss on ignition of sediment; CEC is the cation exchange capacity of sediment; DOW is the dissolved oxygen of the water; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is the ammonia nitrogen of sediment; TN is the total nitrogen of sediment; TP is the total phosphorus of sediment; TSSw is the total suspended solids of the water. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

间, 均值为 0.574 1 mg/m^3 , 最高值出现在 TX, 最低值出现在 BT。FN₂O 变化范围为 $-3.645 \text{ 3-4.392 5 mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 均值为 $1.086 \text{ 1 mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 总体表现为大气的“源”。FN₂O 表现出明显的空间差异, 主要受到 pH 和电位的影响。其中, FN₂O 和 pH 呈极显著正相关, 与电位呈显著负相关。

本研究利用 Illumina MiSeq 测序技术, 对黄河内蒙古段表层沉积物中微生物群落结构和多样性进行了分析。细菌群落结构和反硝化细菌里 WH 的最为丰富且多样性最高、AOA 里 TX 最丰富且多样性最高。表层沉积物中细菌的 7 784 个 OTUs 分属于 56 门 178 纲 436 目 696 科 1 290 属 2 659 种, 变形菌门为最优势菌, top10 占细菌总

比 85%以上。AOA 相关基因丰度较低, 检测到 116 个 OTUs 分属于 6 门 8 纲 9 目 9 科 9 属 15 种, *unclassified_d__Unclassified* 为优势菌属(平均丰度为 31.69%), top10 占比 90%以上。反硝化细菌的 3 660 个 OTUs 分属 4 门 8 纲 8 目 26 科 38 属 62 种, 优势菌属为 *unclassified_k__norank_d__Bacteria* (平均丰度为 63.12%), top10 占比 90%以上。EC_w、TP、NH₄⁺-N、Tw、LOI、CEC、DO_w、TSS_w、pH_w 和 TN 等环境因子对黄河内蒙古段沉积物细菌群落分布影响较大。本研究揭示了黄河内蒙古段 N₂O 的空间差异。表明 N₂O 的生成主要以反硝化作用为主, 但在时间上的差异还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 陈红彦. 碳中和目标下全球气候治理的竞争转向与中国对策[J]. 法商研究, 2023, 40(3): 3-16.
CHEN HY. The shift of competition of global climate governance under the carbon neutrality goal and China's countermeasures[J]. *Studies in Law and Business*, 2023, 40(3): 3-16 (in Chinese).
- [2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, In press, 2021.
- [3] MONTZKA SA, DLUGOKENCKY EJ, BUTLER JH. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change[J]. *Nature*, 2011, 476: 43-50.
- [4] BEAULIEU JJ, NIETCH CT, YOUNG JL. Controls on nitrous oxide production and consumption in reservoirs of the Ohio River Basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(10): 1995-2010.
- [5] 张树礼. 加快推进内蒙古黄河流域生态环境保护和高质量发展[J]. 实践(思想理论版), 2021(7): 35-38.
ZHANG SL. Accelerate the ecological environment protection and high-quality development of the Yellow River Basin in Inner Mongolia[J]. *Practice (Theory of Thought Edition)*, 2021(7): 35-38 (in Chinese).
- [6] WANG JF, WANG GQ, ZHANG SB, XIN Y, JIANG CR, LIU SD, HE XJ, McDOWELL WH, XIA XH. Indirect nitrous oxide emission factors of fluvial networks can be predicted by dissolved organic carbon and nitrate from local to global scales[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(24): 7270-7285.
- [7] HU HW, CHEN DL, HE JZ. Microbial regulation of terrestrial nitrous oxide formation: understanding the biological pathways for prediction of emission rates[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2015, 39(5): 729-749.
- [8] SUN X, JAYAKUMAR A, TRACEY JC, WALLACE E, KELLY CL, CASCIOTTI KL, WARD BB. Microbial N₂O consumption in and above marine N₂O production hotspots[J]. *The ISME Journal*, 2021, 15: 1434-1444.
- [9] QUICK AM, REEDER WJ, FARRELL TB, TONINA D, FERIS KP, BENNER SG. Nitrous oxide from streams and rivers: a review of primary biogeochemical pathways and environmental variables[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 224-262.
- [10] STEIN LY, KLOTZ MG. The nitrogen cycle[J]. *Current Biology*, 2016, 26(3): R94-R98.
- [11] ZHANG WL, ZHU MJ, LI Y, WANG C, QIAN B, NIU LH, WANG PF, GU JF, YANG N. How fluvial inputs directly and indirectly affect the ecological status of different lake regions: a bio-assessment framework[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124502.
- [12] PROSSER JI. Ecosystem processes and interactions in a morass of diversity[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 81(3): 507-519.
- [13] FERIS KP, RAMSEY PW, RILLIG M, MOORE JN, GANNON JE, HOLBEN WE. Determining rates of change and evaluating group-level resiliency differences in hyporheic microbial communities in response to fluvial heavy-metal deposition[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(8): 4756-4765.
- [14] ZHANG S, LI KX, HU JM, WANG F, CHEN DH, ZHANG ZJ, LI T, LI LF, TAO J, LIU D, CHE RX. Distinct assembly mechanisms of microbial sub-communities with different rarity along the Nu

- River[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(5): 1530-1545.
- [15] TAKAKI Y, HATTORI K, YAMASHITA Y. Factors controlling the spatial distribution of dissolved organic matter with changes in the C/N ratio from the upper to lower reaches of the Ishikari River, Japan[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 826907.
- [16] 侯元松. 内蒙古黄河流域生态环境质量状况评价[J]. *环境与发展*, 2023, 35(3): 12-17.
HOU YS. Evaluation of eco-environmental quality in the Yellow River Basin of Inner Mongolia[J]. *Environment and Development*, 2023, 35(3): 12-17 (in Chinese).
- [17] 杨帆, 苗雨青, 叶爱中, 崔乾, 孙奕琳, 罗浩, 洪炜林, 孙方虎. 巢湖水-气界面 N_2O 通量排放特征及影响因素[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(6): 2000-2009.
YANG F, MIAO YQ, YE AZ, CUI Q, SUN YL, LUO H, HONG WL, SUN FH. Characterization of N_2O emission at the water-gas interface and influences of Lake Chaohu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(6): 2000-2009 (in Chinese).
- [18] WU P, LIANG SH, WANG XS, FENG YQ, McKENZIE JM. A new assessment of hydrological change in the source region of the Yellow River[J]. *Water*, 2018, 10(7): 877.
- [19] GAO T, WANG HL. Trends in precipitation extremes over the Yellow River Basin in north China: changing properties and causes[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(13): 2412-2428.
- [20] ZHANG XJ, WANG GQ, XUE BL, WANG YT, WANG LB. Spatiotemporal variation of evapotranspiration on different land use/cover in the inner Mongolia reach of the Yellow River Basin[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4499.
- [21] 庞红丽, 高红山, 李富强, 张连科. 黄河宁蒙段沉积物地球化学元素组成及分布特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5): 44-53.
PANG HL, GAO HS, LI FQ, ZHANG LK. Geochemical element composition and spatial distribution characteristics of sediments in the Ningxia-Inner Mongolia section of the Yellow River[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(5): 44-53 (in Chinese).
- [22] RAO GD, RAO VD, SARMA VVSS. Distribution and air-sea exchange of nitrous oxide in the coastal Bay of Bengal during peak discharge period (southwest monsoon)[J]. *Marine Chemistry*, 2013, 155: 1-9.
- [23] Coupe RH. Transport of nitrate in the Mississippi River in July-August 1999[J]. *Annals of Environmental Science*, 2013, 7(3): 31-46.
- [24] 黄向华, 曾宏达, 陈惠, 王婷婷, 杨玉盛. 基于静态箱法研究城市草坪空气负离子来源及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(4): 949-955.
HUANG XH, ZENG HD, CHEN H, WANG TT, YANG YS. Sources and influence factors of negative air ions in urban lawn based on static chamber method[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(4): 949-955 (in Chinese).
- [25] JOHNSON KM, HUGHES JE, DONAGHAY PL, SIEBURTH JM. Bottle-calibration static head space method for the determination of methane dissolved in seawater[J]. *Analytical Chemistry*, 1990, 62(21): 2408-2412.
- [26] WANG R, ZHANG H, ZHANG W, ZHENG XH, BUTTERBACH-BAHL K, LI SQ, HAN SH. An urban polluted river as a significant hotspot for water-atmosphere exchange of CH_4 and N_2O [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 264: 114770.
- [27] SANDER R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(8): 4399-4981.
- [28] 杨晶, 张桂玲, 赵玉川, 李佩佩. 胶州湾河口潮滩沉积物中 N_2O 的产生和释放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2723-2732.
YANG J, ZHANG GL, ZHAO YC, LI PP. Production and emission of nitrous oxide from the estuarine tidal flat around Jiaozhou Bay and their influencing factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(12): 2723-2732 (in Chinese).
- [29] 余丹, 陈光程, 陈顺洋, 陈雅萍, 陈彬, 叶勇, 侯建平. 夏季九龙江口红树林土壤-大气界面温室气体通量的研究[J]. *应用海洋学学报*, 2014, 33(2): 175-182.
YU D, CHEN GC, CHEN SY, CHEN YP, CHEN B, YE Y, HOU JP. Summer fluxes of atmospheric greenhouse gases from mangrove soils in Jiulongjiang Estuary[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33(2): 175-182 (in Chinese).
- [30] 金宝石, 谢建国, 闫鸿远, 杨平, 曾从盛. 九龙江河口养虾塘氧化亚氮排放通量及影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(9): 2031-2038.

- JIN BS, XIE JG, YAN HY, YANG P, ZENG CS. Nitrous oxide fluxes and its influencing factors in the shrimp ponds of the Jiulong River Estuary[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 2031-2038 (in Chinese).
- [31] 廖远珊, 肖启涛, 刘臻婧, 胡正华, 张弥, 肖薇, 段洪涛. 藻型湖区氧化亚氮排放特征及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(2): 483-492.
- LIAO YS, XIAO QT, LIU ZJ, HU ZH, ZHANG M, XIAO W, DUAN HT. Nitrous oxide emission and its influencing factors at the cyanobacteria-dominated lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(2): 483-492 (in Chinese).
- [32] ERKKILÄ KM, OJALA A, BASTVIKEN D, BIERMANN T, HEISKANEN JJ, LINDROTH A, PELTOLA O, RANTAKARI M, VESALA T, MAMMARELLA I. Methane and carbon dioxide fluxes over a lake: comparison between eddy covariance, floating chambers and boundary layer method[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(2): 429-445.
- [33] 张艳春, 张志法, 陶雅琴, 陈玉鹏, 毛旭锋. 连续筑坝湟水一级支流火烧沟对河流水-气界面温室气体通量的影响研究[J]. *生态科学*, 2020, 39(5): 100-108.
- ZHANG YC, ZHANG ZF, TAO YQ, CHEN YP, MAO XF. Effects of cascade dams on greenhouse gases fluxes at water-air interface of the Huoshaogou River[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(5): 100-108 (in Chinese).
- [34] DUCHEMIN E, LUCOTTE M, CANUEL R. Comparison of static chamber and thin boundary layer equation methods for measuring greenhouse gas emissions from large water bodies[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(2): 350-357.
- [35] 陈露, 欧光南, 何碧烟. 九龙江口水体中 N₂O 的产生、释放和输出[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(6): 841-852.
- CHEN L, OU GN, HE BY. Production, emission and export of nitrous oxide from the Jiulong River Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(6): 841-852 (in Chinese).
- [36] 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承. 天津市滨海河流 N₂O 扩散通量及控制因子[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1481-1491.
- TANG MY, HU XK, WANG HW, WANG YC, CHANG SY, WANG SQ, ZHONG JC. Diffusive fluxes and controls of N₂O from coastal rivers in Tianjin city[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1481-1491 (in Chinese).
- [37] WELLS NS, MAHER DT, ERLER DV, HIPSEY M, ROSENRETER JA, EYRE BD. Estuaries as sources and sinks of N₂O across a land use gradient in subtropical Australia[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(5): 877-894.
- [38] YUAN JJ, XIANG J, LIU DY, KANG H, HE TH, KIM S, LIN YX, FREEMAN C, DING WX. Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 318-322.
- [39] YAO YZ, TIAN HQ, SHI H, PAN SF, XU RT, PAN NQ, CANADELL JG. Increased global nitrous oxide emissions from streams and rivers in the Anthropocene[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 138-142.
- [40] SOUED C, del GIORGIO PA, MARANGER R. Nitrous oxide sinks and emissions in boreal aquatic networks in Québec[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 116-120.
- [41] MUKHOPADHYA I, HANSEN R, EL-OMAR EM, HOLD GL. IBD: what role do Proteobacteria play?[J]. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2012, 9: 219-230.
- [42] OSPINA-BETANCOURTH C, ACHARYA K, ALLEN B, ENTWISTLE J, HEAD IM, SANABRIA J, CURTIS TP. Enrichment of nitrogen-fixing bacteria in a nitrogen-deficient wastewater treatment system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6): 3539-3548.
- [43] WU QL, CHEN YW, XU KD, LIU ZW, HAHN MW. Intra-habitat heterogeneity of microbial food web structure under the regime of eutrophication and sediment resuspension in the large subtropical shallow Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581(1): 241-254.
- [44] ZWART G, CRUMP BC, KAMST-VAN AGTERVELD MP, HAGEN F, HAN SK. Typical freshwater bacteria: an analysis of available 16S rRNA gene sequences from plankton of lakes and rivers[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, 28: 141-155.
- [45] HAN MZ, GONG YH, ZHOU CY, ZHANG JQ, WANG Z, NING K. Comparison and Interpretation of Taxonomical Structure of Bacterial Communities in

- Two Types of Lakes on Yun-Gui Plateau of China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30616.
- [46] 史传奇, 胡宝忠, 于少鹏, 孟博, 杨春雪, 刘嘉, 丁俊男. 不同处理条件下金鱼藻净水效果与微生物群落变化[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(6): 1070-1081.
SHI CQ, HU BZ, YU SP, MENG B, YANG CX, LIU J, DING JN. Water purification effect of *Ceratophyllum demersum* L. and change of microbial community under different treatments[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(6): 1070-1081 (in Chinese).
- [47] 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓. 基于高通量绝对定量测序解析岗南水库微生物群落的时空分布特征及关键驱动因素[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(2): 224-239.
ZHANG ZW, CHEN ZY, ZHANG TN, ZHOU SL, CUI JS, LUO X. Spatiotemporal characteristics and key driving factors of microbial community evolution based on high-throughput absolute quantification sequencing in the Gangnan Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(2): 224-239 (in Chinese).
- [48] 周莉娜, 苏润华, 马思佳, 何甦, 任洪强, 丁丽丽. 基于 PLFA 法分析亚硝氮、硝氮和氨氮对厌氧微生物细菌群落的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 499-505.
ZHOU LN, SU RH, MA SJ, HE S, REN HQ, DING LL. Effects of nitrite, nitrate and ammonia nitrogen on anaerobic microbial community characterized by using phospholipid fatty acid PLFA method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 499-505 (in Chinese).
- [49] HERLEMANN DPR, LABRENZ M, JÜRGENS K, BERTILSSON S, WANIEK JJ, ANDERSSON AF. Transitions in bacterial communities along the 2 000 km salinity gradient of the Baltic Sea[J]. *The ISME Journal*, 2011, 5(10): 1571-1579.
- [50] BJØRLYKKE K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins[J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 301: 1-14.