

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

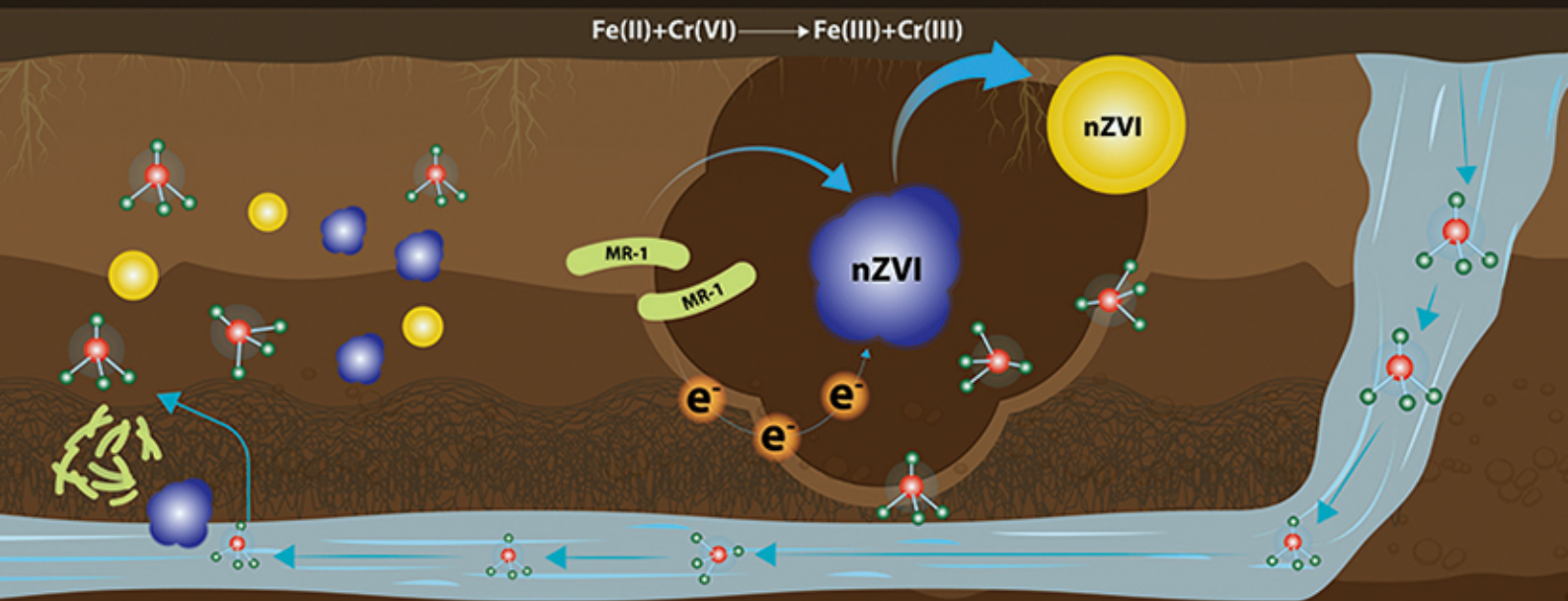
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市2014~2020年PM _{2.5} 和O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市2020年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气VOCs污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻(<i>Scenedesmus obliquus</i>)生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下短SRT强化短程SNEDPR系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1株草螺属植物内生菌R-13的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿康伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米N ₂ O排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载NH ₄ ⁺ -N生物炭对土壤N ₂ O-N排放和NH ₃ -N挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019年中国全氟辛酸酯基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201)	
《环境科学》征稿简则(4340)	
信息(4382, 4537, 4565)	

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应

周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓

(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要: 溶解性有机物(DOM)是影响微生物群落演变的重要因素,而生态输水是白洋淀的一个重要特征,为了探究输水情境下DOM对好氧反硝化菌的影响,本文结合水体DOM的组分解析和好氧反硝化高通量测序技术,进行了水体好氧反硝化菌对DOM的响应研究.结果显示,白洋淀水体DOM的相对浓度存在显著差异,河口区要低于内部区;DOM呈现出较强自生源特征,河口区具有更高的分子量和更强的腐殖化;平行因子法解析出3种类蛋白组分和1种类腐殖质组分,类蛋白组分占比达到35.64%~96.38%,与荧光区域积分得到类蛋白占主体的结果相一致.与此同时,该时期水体好氧反硝化菌主要属于变形菌门(Proteobacteria),主要包括 *Cupriavidus*、*Aeromonas*、*Thauera*、*Shewanella* 和 *Pseudomonas*,与随机森林筛选出的指示物种相一致;网络分析得到35个网络关键节点,主要隶属于 *Thauera*、*Cupriavidus* 以及 *Unclassified_bacteria*;冗余分析(RDA)显示类腐殖质物质是影响水体整体好氧反硝化菌群落组成的因子,类蛋白物质是影响指示物种群落和关键节点群落结构分布的重要因素.综上所述,水体溶解性有机物中类蛋白组分可以作为筛选适于生态输水期水体特征的耐低温高效好氧反硝化菌的碳源选择.

关键词: 白洋淀; 溶解性有机物(DOM); 平行因子分析(PARAFAC); 好氧反硝化; 生物信息分析; 网络分析

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4319-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101290

Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period

ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, YU Ming-hui, YAO Bo, CUI Jian-sheng, LUO Xiao

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) plays an important role in the evolution of microbial communities. Meanwhile, ecological water delivery is an important feature of Baiyangdian Lake. To explore how the structure of the aerobic denitrification bacteria community responds to DOM during the water delivery period, the DOM components of water were examined and high-throughput sequencing of aerobic denitrification bacteria was performed. The results showed significant differences in DOM concentration in Baiyangdian Lake, with the estuary area exhibiting lower DOM concentrations. The water exhibited strong autogenous source, while DOM in the estuary area had a higher molecular weight and degree of humification. Three protein-like substances (C1, C2, and C4) and one humic-like substance (C3) were identified through PARAFAC. The protein-like substances accounted for the major proportion of DOM, which was consistent with the results of fluorescence regional integration (FRI). The genera of the water body were mainly in the Proteobacteria phylum, including *Cupriavidus*, *Aeromonas*, *Thauera*, *Shewanella*, and *Pseudomonas*. Meanwhile, *Cupriavidus*, *Thauera*, *Shewanella*, *Agrobacterium*, and *Pseudomonas* were the main indicator species, according to random forest (RF) analysis. Through network analysis, 35 key nodes of the network were obtained, belonging to *Thauera*, *Cupriavidus*, and *Unclassified_bacteria*, respectively. Redundancy analysis (RDA) showed that a humic-like substance was the main environmental factor regulating the whole structure of the aerobic denitrification bacterial community, while protein-like substances played important roles in changes to the indicator species and key nodes of the community. Overall, protein-like substances could provide an important reference for selecting carbon sources during the screening of efficient and cold resistance aerobic denitrification bacteria that are adapted to actual water bodies.

Key words: Baiyangdian Lake; dissolved organic matter (DOM); parallel factor analysis (PARAFAC); aerobic denitrification; bioinformatics analysis; network analysis

好氧反硝化不仅可以在同一系统中完成硝化和反硝化的过程,同时还能利用反硝化过程产生的碱中和硝化过程产生的酸.因此,好氧反硝化逐渐成为生物脱氮的研究热点^[1].近年来,研究者从不同的环境中分离出大量的高效好氧反硝化菌.比如,人工湿地系统中的 *Alcaligenes faecalis* strain WT14^[2] 和

收稿日期: 2021-01-31; 修订日期: 2021-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909056); 河北科技大学引进人才科研启动基金项目(1181278); 河北省自然科学基金项目(E2021208011); 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(QN2021064)

作者简介: 周石磊(1987~),男,博士,讲师,主要研究方向为好氧反硝化菌脱氮机制与调控机制, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

Paracoccus thiophilus strain LSL 251^[3]; 水产养殖废水处理系统中的 *Pseudomonas* sp. DM02^[4]、*Achromobacter* sp. JL9^[5] 和 *Arthrobacter* sp. HHEP5^[6]; 海底淤泥中的 *Paracoccus versutus* LYM^[7]; 污水处理厂中的 *Pseudomonas mendocina* X49^[8] 和 *Thauera* sp. strain SND5^[9]; 水库沉积物中的 *Pseudomonas* sp. HXF1^[10]; 河流沉积物中的 *Pseudomonas stutzeri* ADP-19^[11]; 松花江中的 *Janthinobacterium* sp. M-11^[12]; 工业园区沉积物中的 *Achromobacter* sp. L3^[13]. 众多分离的高效好氧反硝化菌还具有异养硝化、聚磷、耐低温、耐重金属以及降解抗生素的特性^[14,15].

然而,目前关于好氧反硝化菌的分析大多集中于分离鉴定和实验室的脱氮特性分析^[14,15]. 虽然,在自然环境中关于好氧反硝化有所研究^[16,17]. 但是,涉及应用好氧反硝化菌进行实际天然水体环境脱氮的研究却鲜见报道. 仅有如下研究涉及实际水体的应用,Guo 等^[18]将好氧反硝化菌 *Pseudomonas stutzeri* strain T1 投加到太湖水体试验系统中实现总氮水质从 V 类到 II 类水体的转变; Tang 等^[19]应用好氧反硝化菌剂修复城市河流,实现沉积物中 14.7% 的总氮的去除;文献[20,21]通过原位混合充氧强化了水库土著好氧反硝化菌,使水体氮素得到高效去除. 适于实际天然水体的高效好氧反硝化菌难于获取很重要的原因,可能是实验室采用的培养基与实际水体中碳源组成差异太大,使筛选出来的高效好氧反硝化菌株无法在实际水体中发挥作用. 然而,涉及天然环境中好氧反硝化菌群分布与环境中溶解性有机物的相关分析却相对较少. 目前,有学者研究了不同分子量的天然有机物^[22]以及水库沉积物中有机物^[23]对好氧反硝化细菌脱氮的影响;有学者研究了白洋淀冬季好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素^[24,25]. 考虑到自然环境下好氧反硝化菌群分布与溶解性有机物存在耦合作用,有机碳源的种类直接影响高效好氧反硝化菌筛选的成功与否. 因此,开展天然环境中好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应研究变得十分必要.

白洋淀作为雄安新区的核心水体,是新区建设的重要生态屏障. 为恢复白洋淀的生态功能,河北省统筹调度了黄河水、南水北调水、上游水库水以及再生水等多种水源对白洋淀进行了生态输水. 本文选取冬季输水期白洋淀典型区域的水体样品,通过研究该时期水体好氧反硝化菌群落分布特征和关键物种;并结合溶解性有机物组分的分析,来研究输水情景下好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应,以期将来制定适应白洋淀冬季输水期水体特征的

耐低温好氧反硝化菌筛选的碳源选择提供必要的技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

结合研究者的文献资料和白洋淀的历史承载功能^[26],白洋淀划分为 5 个典型区域,分别为河口区、自然区、旅游区、养殖区以及生活区^[24](图 1).

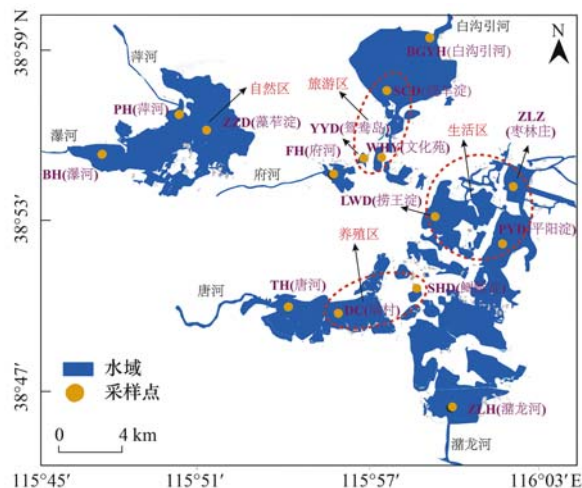


图1 白洋淀采样点示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites in Baiyangdian Lake

其中,河口区承接上游入淀河流的来水,主要包括白沟引河(BGYH, 水库水)、萍河(PH, 水库水)、瀑河(BH, 南水北调水)、府河(FH, 保定再生水)、唐河(TH, 南水北调和水库水)和潴龙河(ZLH, 黄河水);自然区包括藻荇淀(ZZD);旅游区为白洋淀主要观赏景点、承接游客的区域,主要包括文化苑(WHY)、鸳鸯岛(YYD)和烧车淀(SCD);养殖区主要包括端村(DC)和鲌鲌淀(SHD);生活区主要包括捞王淀(LWD)、平阳淀(PYD)和枣林庄(ZLZ). 同时依据河流输水的影响程度,将白洋淀分为河口区和内部区(自然区、旅游区、养殖区和生活区). 本研究于 2020 年 1 月(生态输水期)对白洋淀进行取样,用纯水清洗过的聚乙烯瓶采集各采样点 5 L 中层水样,冷藏避光运回实验室,用于分析水体好氧反硝化菌群落分布和溶解性有机物特征. 其中,水样用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后进行光谱测定,3 d 内测定完成.

1.2 DNA 提取与 PCR 扩增

本文利用 0.22 μm 醋酸纤维滤膜过滤水样,将滤膜送至测序公司进行水体总 DNA 样本的提取. 通过引物 F: 5'-TGGACVATGGGYTTTAAAYC-3' 和 R: 5'-ACYTCRCGHGCVGTRCCRCA-3' 对水体的 *napA* 基因进行 PCR 扩增,完成好氧反硝化菌高通量测序^[27](上海派森诺生物科技股份有限公司). 25 μL

PCR 反应体系为: 5 × reaction buffer 5 μL, 5 × GC buffer 5 μL, 2.5 mmol·L⁻¹ dNTP 2 μL, forward primer (10 μmol·L⁻¹) 1 μL, reverse primer (10 μmol·L⁻¹) 1 μL, Q5 DNA polymerase 0.25 μL, DNA Template 2 μL, ddH₂O 8.75 μL. 扩增条件为: 预变性温度 98℃ 2 min; 98℃ 变性 15 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 s, 循环 30 次; 72℃ 延伸 10 min.

1.3 溶解性有机物测定及分析

利用紫外-可见分光光度计 (DR6000, 美国) 和荧光分光光度计 (F-7000, 日本) 测量过滤水样的紫

外-可见吸收光谱和三维荧光光谱, 具体测定参数设定参见文献 [28, 29] 执行. 采用 a_{254} 、 a_{355} 和 a_{440} 来表征溶解性有机物相对浓度 [29]. 采用三维荧光平行因子法 [28] 和荧光区域积分法 [30] 对三维荧光光谱的组分进行解析. 与此同时, 选用了一系列紫外可见光谱以及三维荧光光谱的光谱指数来表征 DOM 的特征, 包括 E2/E3、E3/E4、 S_R 、荧光指数 (FI)、腐殖化指数 (HIX)、生物源指数 (BIX) 以及新鲜度指数 (β : α) 等 (表 1). 三维荧光光谱的荧光强度进行拉曼 (单位 R. U) 的标准化处理, 具体操作详见文献 [38].

表 1 荧光区域积分组分以及光谱特征指数
Table 1 Components of fluorescence region integration and spectra indices

项目	具体指标	环境意义	文献
荧光区域积分	第 I 区域 (P1)	酪氨酸类蛋白质含量	[30]
	第 II 区域 (P2)	色氨酸类蛋白质含量	
	第 III 区域 (P3)	类富里酸含量	
	第 IV 区域 (P4)	微生物代谢产物含量	
	第 V 区域 (P5)	类腐殖酸含量	
光谱特征指数	E2/E3	表征 DOM 分子量的大小	[31]
	E3/E4	衡量 DOM 腐殖质腐殖化程度	[31]
	S_R	反映 DOM 来源信息	[32]
	荧光指数 (FI)	评估 DOM 的来源	[33]
	腐殖化指数 (HIX)	评估 DOM 的腐殖化程度	[34]
	生物源指数 (BIX)	反映内源 DOM 的贡献程度	[35]
	新鲜度指数 (β : α)	反映新生 DOM 的所占比例	[36]
	Fn280	反映 DOM 中类蛋白相对丰度	[37]
	Fn355	反映 DOM 中类腐殖质相对丰度	[37]

1.4 生物信息分析

利用 R 进行好氧反硝化菌的生物信息学分析 (<http://www.r-project.org/>). 具体分析如下, 通过 Chao1 指数来表征好氧反硝化菌的丰度 [39], 通过香农指数、辛普森指数来反映好氧反硝化菌的多样性 [39], 通过覆盖度指数评估好氧反硝化菌的测序深度 [39]; 通过主坐标分析 (principal co-ordinates analysis, PCoA) 来研究不同区域好氧反硝化菌的差异; 基于随机森林分析 (random forest, RF) 来筛选输水期好氧反硝化菌群落的指示物种 [40, 41]; 依据 Spearman 的相关分析, 选取相关性 $|r| > 0.7$, 显著性 $P < 0.05$ 的物种进行网络分析; 研究好氧反硝化菌群落中各个物种的相互关系 [42], 并基于对节点的类型分析研究网络中关键物种 [43]; 通过冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 得到溶解性有机物各组分与好氧反硝化菌的相关性 [44]. 本文中绘图由 R 和 Gephi 完成, 数据统计分析中 P 值 < 0.05 , $0.001 < P$ 值 < 0.01 以及 P 值 < 0.001 表示统计学不同水平上存在显著差异.

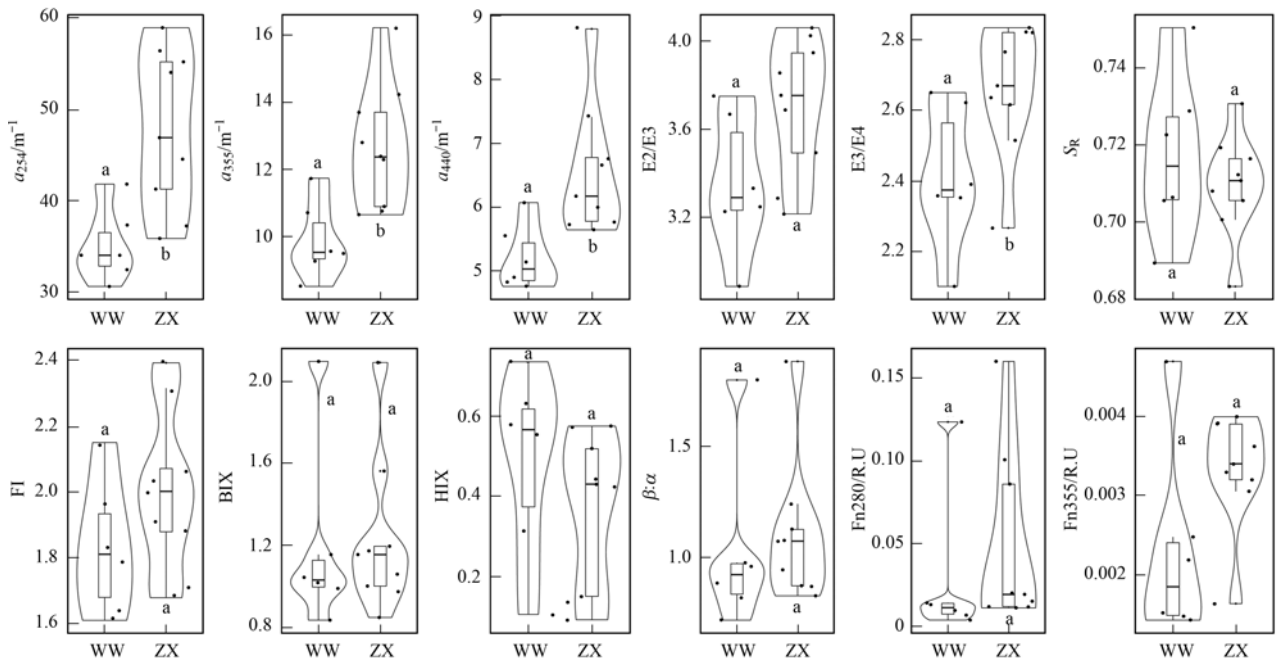
2 结果与讨论

2.1 水体溶解性有机物分析

从 a_{254} 、 a_{355} 和 a_{440} 的数据可知 (图 2), 河口区的 a_{254} 、 a_{355} 和 a_{440} 达到 (35.05 ± 3.98) 、 (9.88 ± 1.15) 和 $(5.21 \pm 0.51) \text{ m}^{-1}$, 白洋淀内部区的 a_{254} 、 a_{355} 和 a_{440} 达到 (47.81 ± 8.64) 、 (12.66 ± 1.85) 和 $(6.55 \pm 1.02) \text{ m}^{-1}$; 河口区的溶解性有机物的相对浓度显著低于内部区 ($P < 0.05$). 从统计学上看, 河口区和内部区的 E2/E3 不存在显著差异, 但是白洋淀内部区的 E2/E3 达到 3.70 ± 0.31 高于河口区的 3.35 ± 0.32 ; 数据表明河口区的水体溶解性有机物的分子量要高于内部区, 与入淀河流输水携带大分子量溶解性有机物有关. 河口区的 E3/E4 达到 2.41 ± 0.20 , 要小于内部区的 2.66 ± 0.18 , 表明河口区水体溶解性有机物的腐殖化程度要高于内部区. S_R 值呈现出河口区 (0.72 ± 0.02) 高于内部区 (0.71 ± 0.01) , 也显示出河口区溶解性有机物呈现出更高的分子量和腐殖化特征. 白洋淀内部区 FI 达到 2.00 ± 0.24 , 高于河口区

的 1.83 ± 0.20 ; 内部区 FI 大于 1.9, 河口区的小于 1.9, 表明内部区水体溶解性有机物的自生源特征要强于河口区. 河口区和内部区的 BIX 达到 1.19 ± 0.46 和 1.23 ± 0.38 , 都大于 1.0, 表明都呈现较强的自生源特征, 其中内部区的自生源更强一些. 两个区域的 HIX 都小于 4, 与 FI 和 BIX 呈现的结果相一致, 该时

期水体的溶解性有机物腐殖化程度较低. 内部区和河口区的 $\beta:\alpha$ 达到 1.10 ± 0.32 和 1.02 ± 0.39 , 结果表明内部区的新生 DOM 占比要高于河口区. Fn280 和 Fn355 指数显示, 河口区和内部区在统计学上不存在显著差异; 但是相比于河口区而言, 内部区具有更高的类蛋白丰度.



WW 表示河口区采样点; ZX 表示内部区采样点, 下同; 图中不同小写字母表示存在显著差异

图2 白洋淀溶解性有机物相对浓度和光谱特征指数

Fig. 2 Concentration of DOM and spectral characteristics of the sampling sites in Baiyangdian Lake

通过平行因子分析得出 4 种荧光组分 (图 3): 组分 C1 ($E_x/E_m = 275 \text{ nm}/340 \text{ nm}$) 为长波类酪氨酸物质, 多源于微生物降解和生活污水^[45]; 组分 C2 ($E_x/E_m = 230 \text{ nm}/340 \text{ nm}$) 为类色氨酸物质, 属于类蛋白组分, 多源于微生物降解和生活污水^[46]; 组分 C3 ($E_x/E_m = 240 \text{ nm}/400 \text{ nm}$) 为富里酸物质, 属于腐殖质类, 较难降解^[47]; 组分 C4 ($E_x/E_m = 220 \text{ nm}/325 \text{ nm}$) 为短波类酪氨酸物质, 属于类蛋白组分, 多源于微生物降解和生活污水^[48]. C1 组分相对丰度的变化范围为 5.92%~52.04%, 最大值为养殖区的 SHD 采样点, 最小值为河口区的 PH 采样点; C2 组分相对丰度的变化范围为 3.71%~40.00%, 最大值为 TH 采样点, 最小值为 PH 采样点; C3 组分相对丰度的变化范围为 3.62%~64.36%, 最大值为 PH 采样点, 最小值为 DC 采样点; C4 组分相对丰度的变化范围为 5.70%~26.01%, 最大值为 PH 采样点, 最小值为 FH 采样点; 类蛋白类物质 (C1 + C2 + C4) 变化范围为 35.64%~96.38%, 最大值为 SHD 采样点, 最小值为 PH 采样点. 基于河口区和内部区进行分类, 平行因子解析的各组分荧光强度和相对丰度在统计学上不存在显著差异, 但是类蛋白类组

分 C1、C2 和 C4 都呈现出内部区高于河口区的特点, 类腐殖质物质 C3 呈现出河口区高于内部区的特点 (图 3), 与入淀河流输送腐殖质的情况有关.

荧光区域积分解析的 5 种组分的分布情况如图 4 所示, 河口区和内部区的各个组分同样在统计学上都不存在显著差异. 其中类蛋白质 (P1、P2 和 P4) 都呈现出内部区占比高于河口区的特点, 类腐殖质物质 (P3 和 P5) 呈现出河口区高的特征. 荧光区域积分的结果与平行因子解析出荧光组分的情况相一致.

与此同时, 分布对紫外可见光谱 [图 4(f)]、平行因子分析组分 [图 4(g)] 和荧光区域积分组分 [图 4(h)] 进行了 PCoA 分析. 基于紫外可见光谱的 PCoA 分析显示, 前两轴共解释了总体变化的 88.94%, 河口区与内部区呈现显著差异 ($\text{Adonis}, R^2 = 0.49, P < 0.01$); 基于平行因子分析组分的 PCoA 分析显示, 前两轴共解释了总体变化的 75.85%; 基于荧光区域积分组分的 PCoA 分析显示, 前两轴共解释了总体变化的 82.15%; 平行因子和荧光区域积分组分并未存在统计学上的显著差异. 平行因子解析的荧光组分与紫外可见光谱和荧

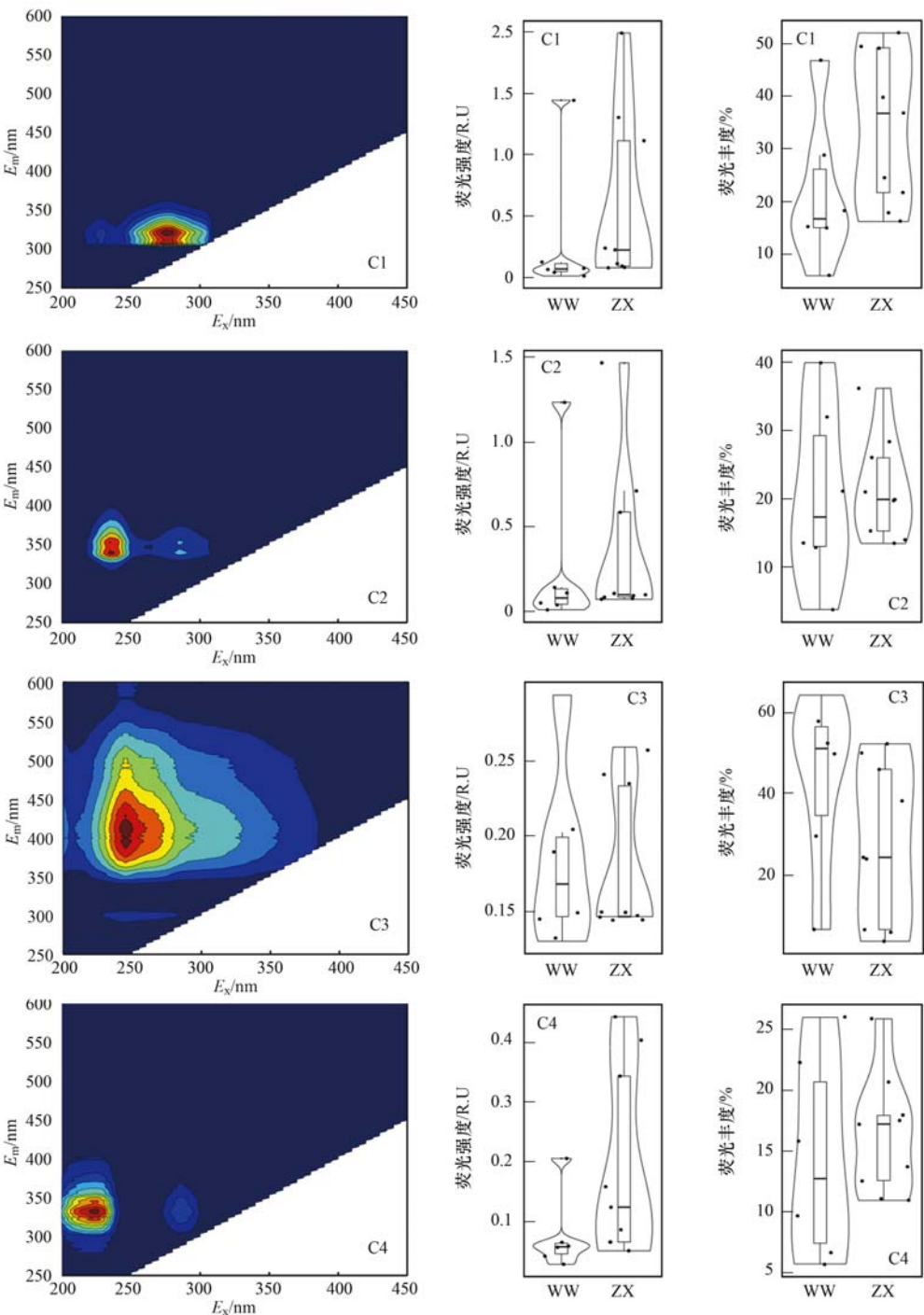


图3 基于平行因子法解析出的白洋淀水体 CDOM 的荧光组分及分布特征

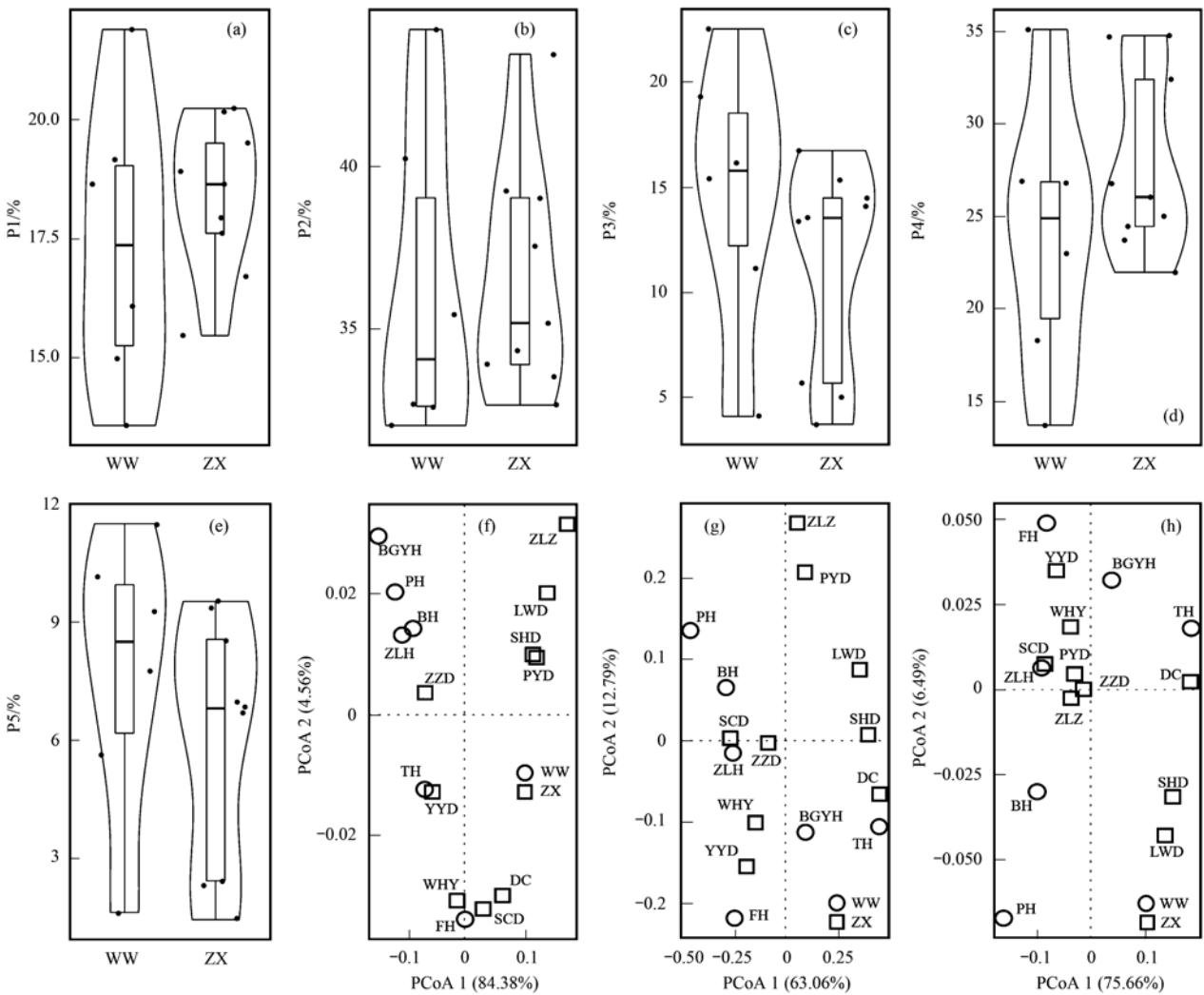
Fig. 3 Distribution and fluorescence components of CDOM identified using the PARAFAC model in Baiyangdian Lake

光区域积分组分的相关性分析如图 5 所示,荧光组分 C1 与 C2 和 C4 呈现显著正相关($P < 0.001$), C2 与 C4 呈现显著正相关($P < 0.001$), C1、C2 和 C4 与 Fn280 呈现显著正相关($P < 0.001$),表明 C1、C2 和 C4 存在相似的来源,与 3 个组分为类蛋白质相一致.类蛋白类物质(C1、C2 和 C4)与 E2/E3 呈现显著正相关($P < 0.05$),表明分子量越小类蛋白质物质越多.类蛋白类物质(C1、C2、C4 和 Fn280)与荧光区域积分的类蛋白组分 P2 和 P4 呈现显著正相关($P < 0.01$),与类腐殖质组分 P3 和

P5 呈现显著负相关($P < 0.001$). 综上可知,平行因子法解析的组分和荧光区域积分划分的组分呈现较高的一致性.

2.2 微生物 α 多样性分析

如表 2 所示,依据历史功能划分来看,自然区的 Chao1 指数最高,其次为旅游区和生活区,最后为河口区和养殖区,表明自然区的好氧反硝化菌微生物群落的丰富度最高;依据河口区和内部区划分,内部区的 Chao1 指数($2\,184.37 \pm 323.35$)高于河口区($1\,815.93 \pm 260.70$). 各个采样点的 Simpson 和



(a) ~ (e) 荧光区域积分组分分布情况; (f) ~ (g) 基于紫外可见、平行因子以及区域积分的主坐标分析

图 4 荧光区域积分组分分布特征及 DOM 光谱的主坐标分析

Fig. 4 Distribution characteristics of components identified using the FRI model and PCoA of the DOM spectrum

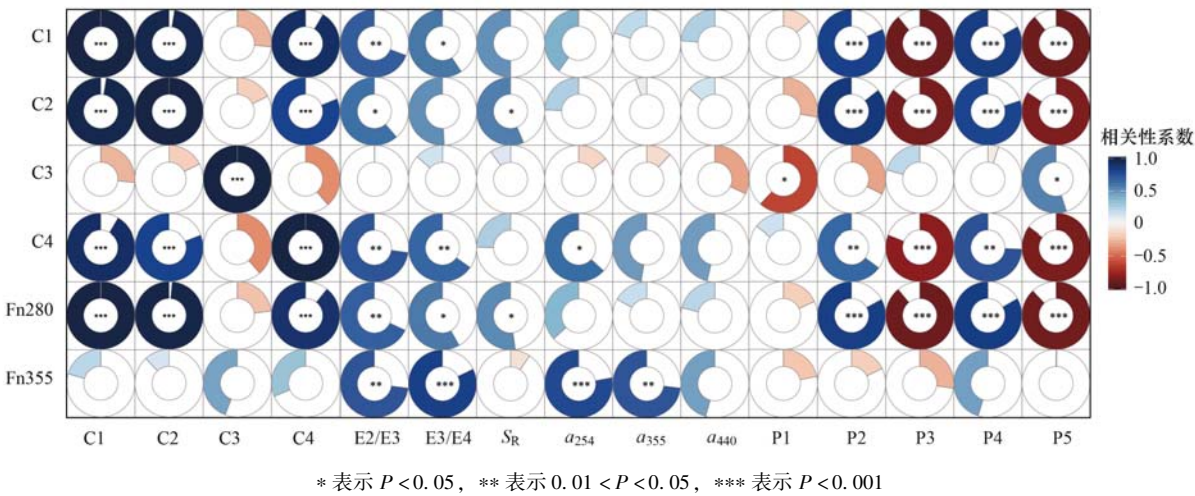


图 5 三维荧光平行因子荧光组分与荧光区域积分组分以及光谱特征的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of PARAFAC components and FRI components/spectral characteristics

Shannon 指数中,养殖区和河口区较高,自然区最低;内部区的 Simpson 和 Shannon 指数要低于河口区. 各个采样点间覆盖度指数大于 0.99,显示出各

样本测序深度能够很好地覆盖物种信息. 综上,白洋淀河口区与内部区的好氧反硝化菌群落丰富度和多样性存在一定差异.

表 2 白洋淀好氧反硝化菌微生物多样性指数

Table 2 Microbial diversity indices of aerobic denitrification bacteria in Baiyangdian Lake

区域	样本	Chao1 指数	Simpson 指数	Shannon 指数	覆盖度指数
河口区	6	1 815. 93 ±260. 70	0. 97 ±0. 01	6. 51 ±0. 18	0. 99 ±0. 00
自然区	1	2 716. 91 ±0. 00	0. 95 ±0. 00	6. 22 ±0. 00	0. 99 ±0. 00
旅游区	3	2 285. 76 ±170. 19	0. 96 ±0. 00	6. 46 ±0. 06	0. 99 ±0. 00
养殖区	2	1 781. 08 ±72. 08	0. 97 ±0. 00	6. 65 ±0. 11	0. 99 ±0. 00
生活区	3	2 174. 33 ±258. 18	0. 96 ±0. 01	6. 40 ±0. 34	0. 99 ±0. 00
河口区	6	1 815. 93 ±260. 70	0. 97 ±0. 01	6. 51 ±0. 18	0. 99 ±0. 00
内部区	9	2 184. 37 ±323. 35	0. 96 ±0. 01	6. 46 ±0. 22	0. 99 ±0. 00

2.3 好氧反硝化菌群落组成

该时期各个采样点的好氧反硝化菌主要属于变形菌门 (Proteobacterice) 和未分类 (Unclassified _bacteria), 其中变形菌门为第一大门类, 占比为 39.34% ~ 57.92%; 未分类菌达到 41.93% ~ 60.54%. 变形菌门中,β-Proteobacteria 为第一大纲, 占比达到 15.46% ~ 32.11%; γ-Proteobacteria 是第二大纲, 占比达到 4.14% ~ 12.95%; α-Proteobacteria 是为第三大纲, 占比为 3.05% ~ 8.03%. 在属水平上 (图 6), Cupriavidus 是第一大纲, 占比范围为 2.05% ~ 14.91%, 自然区 ZZD 最多, 河口区 BH 最少. Cupriavidus 作为重要的好氧反硝化菌属被广泛报道, 包括具有耐重金属性能的高效异养硝化-好氧反硝化菌 Cupriavidus sp. S1^[49], 能在好氧条件下同时去除硝酸盐、磷和镉的高效菌株 Cupriavidus sp. H29^[50] 以及兼具修复地下水硝酸盐和锰污染的混合营养的反硝化菌 Cupriavidus sp. HY129^[51]. Aeromonas 是第二大属, 占比为 2.22% ~ 4.08%, 在 DC 和 ZLZ 的占比最大; 与此同时, 有研究不仅发现 Aeromonas 是水源水库好氧反硝化脱氮过程中主要的菌属^[37], 而且还发现好氧反硝化菌 Aeromonas sp. VNT^[52] 和 Aeromonas sp. HN-02^[53] 都

具有耐低温的特性. Thauera 占比为 2.06% ~ 3.83%, 在 TH 和 PH 占比较多; 有研究发现 Thauera sp. strain SND5 是 1 株高效且同时具有脱氮和聚磷功能的菌株^[9], 而且还有以好氧反硝化菌 Thauera 为主的微生物燃料电池实现脱氮和发电的报道^[54, 55]. Shewanella 占比 0.05% ~ 7.83%, 有研究发现 Shewanella baltica OS678 具有好氧反硝化特性^[56], 而且 Shewanella oneidensis MR-1 还可以通过影响电子竞争和分布提高反硝化性能^[57]. Pseudomonas 作为典型好氧反硝化菌被广泛地研究, 包括: 能在高溶解氧环境下实现氨氮、硝氮和亚硝氮高效去除的 Pseudomonas sp. DM02^[4], 能同时去除地下水中氮素和氟的 Pseudomonas sp. HXF1^[10], 具有脱氮和聚磷的 Pseudomonas stutzeri ADP-19^[11], 还有耐低温的 Pseudomonas sp. VNT^[52]. Magnetospirillum 菌在府河的占比最大, 达到 0.91%. Janthinobacterium sp. M-11 是 1 株分离于松花江的耐低温高效异养硝化-好氧反硝化菌^[12]. 异养硝化-好氧反硝化菌 Agrobacterium sp. LAD9 能实现氮素以“NH₄⁺ → NH₂OH → NO₂⁻ → N₂O → N₂”的方式高效去除^[58]. Azoarcus 菌是低盐度硝化反硝化系统中的优势菌^[59]. Serratia marcescens W5 是 1 株

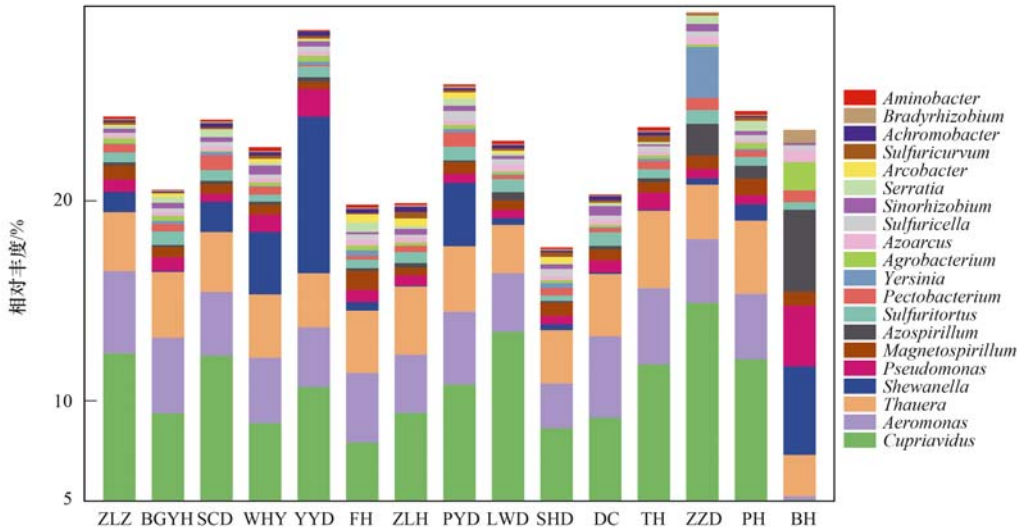


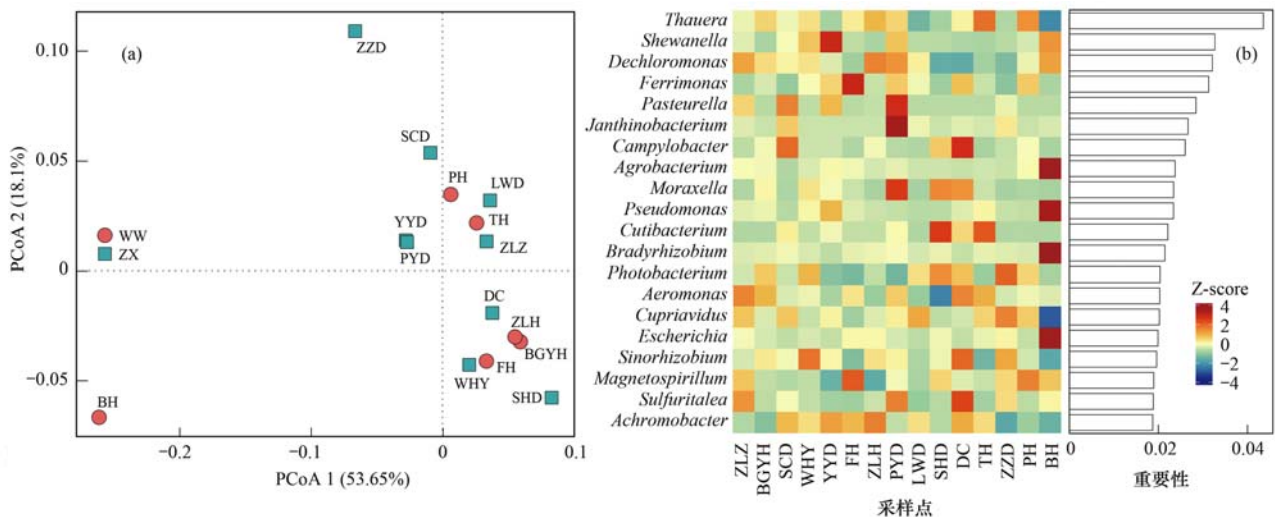
图 6 好氧反硝化菌在属水平上前 20 的菌种分布

Fig. 6 Distribution characteristics of top 20 aerobic denitrification bacteria at genus level

高效的异养脱氮菌^[60]. *Achromobacter* sp. JL9 是能够同时降解抗生素和氮素的高效菌株^[61]. *Bradyrhizobium* 也是具有脱氮功能的反硝化菌^[62]. 综上分析,白洋淀冬季输水期解析的好氧反硝化菌与已报道的典型高效好氧反硝化菌相吻合.

基于属水平对该时期的好氧反硝化菌进行了 PCoA 分析[图 7(a)],结果显示,PCoA1 和 PCoA2 分别解释了总体变化的 53.65% 和 18.1%,其中 PCoA1 起主要作用.在河口区和内部区的划分角度来看,不存在统计学上的显著差异;ZLH、BGYH 和 FH 采样点的差异较小,PH 和 TH 间物种组成差异较小,DC、WHY 和 SHD 采样点的差异较小,SCD、YYD、PYD、LWD 和 ZLZ 间的差异较小.与此同时,对该时期的好

氧反硝化菌进行随机森林分析,筛选出重要性前 20 的重要物种[图 7(b)].其中属于丰度前 10 的主要有 *Thauera* (2.06% ~ 3.83%)、*Shewanella* (0.05% ~ 7.83%)、*Agrobacterium* (0.07% ~ 1.42%)、*Pseudomonas* (0.39% ~ 3.03%)、*Bradyrhizobium* (0.03% ~ 0.66%)、*Aeromonas* (2.24% ~ 4.08%)、*Cupriavidus* (2.05% ~ 14.91%)、*Sinorhizobium* (0.07% ~ 0.47%)、*Magnetospirillum* (0.35% ~ 0.91%) 和 *Achromobacter* (0.01% ~ 0.26%); 其他为相对低丰度菌,包括 *Dechloromonas*、*Ferrimonas*、*Pasteurella*、*Janthinobacterium*、*Campylobacter*、*Moraxella*、*Cutibacterium*、*Photobacterium*、*Escherichia* 和 *Sulfuritalea*.



Z-score 表示一种数据的标准化,也叫 Z 分数,是一个分数与平均数的差再除以标准差的过程

图 7 白洋淀好氧反硝化菌的主坐标分析和随机森林分析

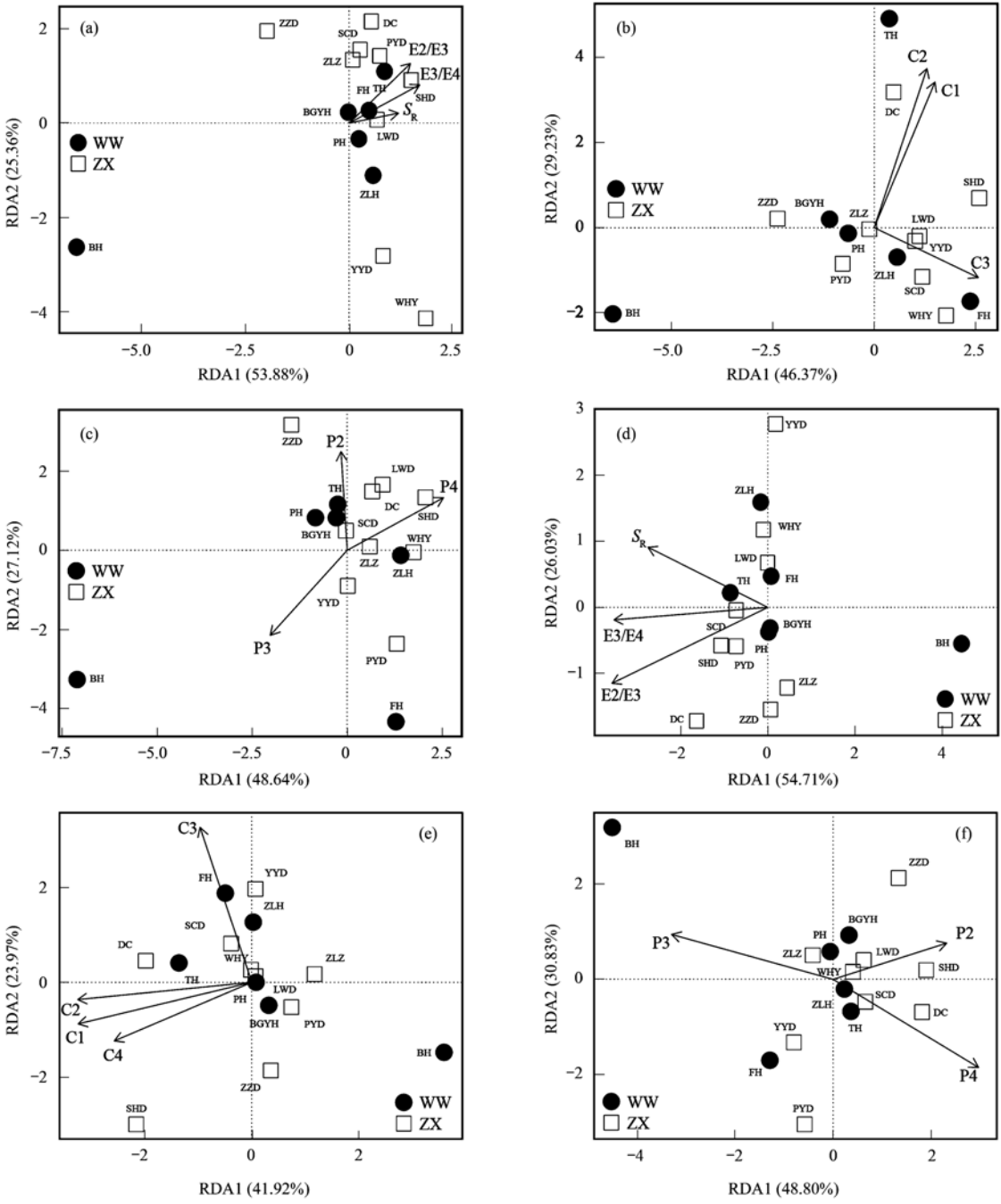
Fig. 7 PCoA and random forest analysis of aerobic denitrification bacteria in Baiyangdian Lake

与此同时,本文通过 RDA 分析研究该时期水体好氧反硝化菌与溶解性有机物的关系(图 8). 基于紫外可见光谱的 RDA 分析结果显示, RDA1 和 RDA2 共同解释了总体变化的 79.24%, E2/E3、E3/E4 和 S_R 主要影响其分布[图 8(a)]; 基于随机森林筛选出的指示物种群落的 RDA 结果显示[图 8(d)], RDA1 和 RDA2 共同解释了总体变化的 80.74%, E2/E3、E3/E4 和 S_R 主要影响其分布,河口区与 E2/E3、E3/E4 和 S_R 呈现反向变化,表明分子量大的腐殖化较强的有机物与入淀河口好氧反硝化菌群落分布关系密切. 基于平行因子解析的结果进行 RDA 分析,对于整体好氧反硝化菌群落来说[图 8(b)], RDA1 和 RDA2 共同解释了总体变化的 75.6%,组分 C3 是其主要影响因子,与 RDA1 的相关性系数达到 0.64; 对于随机森林筛选出的指示物种群落而言[图 8(e)], RDA1 和 RDA2 共同解释了总体变化的 65.89%,组分 C1、C2 和 C4 是其主要影

响因子,与 RDA1 的相关性系数达到 -0.81、-0.81 和 -0.64. 基于荧光区域积分解析的结果进行 RDA 分析,对于整体好氧反硝化菌群落来说[图 8(c)], RDA1 和 RDA2 共同解释了总体变化的 75.76%,组分 P3 和 P4 是其主要影响因子,与 RDA1 的相关性系数达到 -0.51 和 0.63; 对于随机森林筛选出的指示物种群落而言[图 8(f)], RDA1 和 RDA2 共同解释了总体变化的 79.63%,组分 P2、P3 和 P4 是其主要影响因子,与 RDA1 的相关性系数达到 0.58、-0.82 和 0.74. 综合平行因子分析和荧光区域积分分析的结果,类腐殖质物质主要影响整体好氧反硝化菌群落分布,而类蛋白质物质主要影响指示物种群落的分布.

2.4 微生物网络分析

OTU 分类水平的微生物网络如图 9 所示,其中节点大小与网络节点度成正比,节点间连线的宽度与相关系数 $|r|$ 成正比;节点间的连线颜色表示节



(a) ~ (c) 基于整体好氧反硝化菌群落和紫外可见光谱/平行因子分析/荧光区域积分的 RDA,
(d) ~ (f) 基于指示物种群落和紫外可见光谱/平行因子分析/荧光区域积分的 RDA

图 8 白洋淀好氧反硝化菌与环境因子的冗余分析

Fig. 8 RDA of aerobic denitrification bacteria and environmental factors in Baiyangdian Lake

点间的相关关系,红色表示正相关,绿色表示负相关.微生物网络分析共得到 252 个节点1 323个相关关系,有1 293个正向相关关系, 30 个负向相关关系(图 9). 本研究得到的经验网络平均度为 20.69,网络直径为 6.03,平均路径长度为 2.98,模块性为 0.36; 随机网络的相关参数:网络平均度为 11.47 ± 0.07 、网络直径为 4.2 ± 0.42 、平均路径长度为 2.6 ± 0.01 、模块性为 0.27 ± 0.01 . 与同等节点数据以及相关关系数据的随机网络相比,本研究的经验网络具有明显的模块结构. 本研究的微生物网络共得

到 35 个模块,本文将其划分成 9 个模块,其中模块 9 为占比较小模块的汇总,具体比例情况见图 9 (a). 有关节点的物种分类如图 9 (b) 所示,该网络分为 5 个模块,其中 Unclassified_bacteria 比例达到 63.10%、 β -Proteobacteria 比例达到 23.91%、 γ -Proteobacteria 比例达到 6.35%、 α -Proteobacteria 比例达到 5.95%、 ε -Proteobacteria 比例达到 0.79%. 结合模块分析,模块 1 和模块 3 中主要为未分类菌,模块 2 主要为 β -Proteobacteria.

基于网络中节点的分类标准^[43],本文共得到

菌群分布的主要是类蛋白物质,与前文关于随机森林分析筛选的指示物种的影响因素相一致.因此,为了得到适应于实际水体环境的好氧反硝化菌,在将来的耐低温高效好氧反硝化菌株驯化过程中需要加入人类蛋白物质的碳源进行富集驯化.

3 结论

(1)冬季输水期水体溶解性有机物的相对浓度在白洋淀河口区和内部区间呈现显著差异,水体溶解性有机物呈现出较强自生源、低腐殖化特征,河口区相对于内部区呈现出高分子量和强腐殖化特征.

(2)基于平行因子法解析出3种类蛋白组分和1种类腐殖质组分,其中类蛋白类物质占主体,达到35.64%~96.38%;荧光区域积分组分显示类蛋白类物质(P1、P2和P4)也占主体,达到68.22%~94.85%;两种解析方法得到的类蛋白物质分布都是内部区要高于河口区,并且两种方法划分的组分呈现出显著相关,得到的物质组成结果相一致.

(3)水体好氧反硝化菌主要为未分类菌和变形菌,主要包括 *Cupriavidus*、*Thauera*、*Shewanella*、*Pseudomonas* 以及 *Aeromonas*;类腐殖质物质主要影响白洋淀整体好氧反硝化菌群分布,而类蛋白物质主要影响好氧反硝化菌指示物种群落和关键节点群落的分布.

参考文献:

- [1] Huang T L, Zhou S L, Zhang H H, *et al.* Nitrogen removal characteristics of a newly isolated indigenous aerobic denitrifier from oligotrophic drinking water reservoir, *Zoogloea* sp. N299 [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, **16**(5): 10038-10060.
- [2] Chen J L, Xu J, Zhang S N, *et al.* Nitrogen removal characteristics of a novel heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacteria, *Alcaligenes faecalis* strain WT14 [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **282**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.111961.
- [3] Chen S N, Li S L, Huang T L, *et al.* Nitrate reduction by *Paracoccus thiophilus* strain LSL 251 under aerobic condition: Performance and intracellular central carbon flux pathways [J]. Bioresource Technology, 2020, **308**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123301.
- [4] Deng M, Zhao X L, Senbati Y, *et al.* Nitrogen removal by heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium *Pseudomonas* sp. DM02: removal performance, mechanism and immobilized application for real aquaculture wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2021, **322**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124555.
- [5] Liang D H, Hu Y Y, Liang D M, *et al.* Bioaugmentation of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) with *Achromobacter* J19 for enhanced sulfamethoxazole (SMX) degradation in aquaculture wastewater [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **207**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111258.
- [6] Zhang M Y, Pan L Q, Liu L P, *et al.* Phosphorus and nitrogen removal by a novel phosphate-accumulating organism, *Arthrobacter* sp. HHEP5 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification: safety assessment, removal characterization, mechanism exploration and wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2020, **312**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123633.
- [7] Sun C Y, Zhang Y, Qu Z P, *et al.* Simultaneous cobalt (III)-histidine reduction and aerobic denitrification by *Paracoccus versutus* LYM [J]. Bioresource Technology, 2020, **310**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123404.
- [8] Xie F X, Thiri M, Wang H. Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by a novel isolated *Pseudomonas mendocina* X49 [J]. Bioresource Technology, 2021, **319**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124198.
- [9] Wang Q K, He J Z. Complete nitrogen removal via simultaneous nitrification and denitrification by a novel phosphate accumulating *Thauera* sp. strain SND5 [J]. Water Research, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116300.
- [10] Hu X F, Su J F, Ali A, *et al.* Heterotrophic nitrification and biomineralization potential of *Pseudomonas* sp. HXF1 for the simultaneous removal of ammonia nitrogen and fluoride from groundwater [J]. Bioresource Technology, 2021, **323**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124608.
- [11] Li B T, Jing F Y, Wu D S, *et al.* Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus by a novel aerobic denitrifying phosphorus-accumulating bacterium, *Pseudomonas stutzeri* ADP-19 [J]. Bioresource Technology, 2021, **321**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124445.
- [12] Yang M, Lu D W, Qin B D, *et al.* Highly efficient nitrogen removal of a coldness-resistant and low nutrient needed bacterium, *Janthinobacterium* sp. M-11 [J]. Bioresource Technology, 2018, **256**: 366-373.
- [13] Liang D H, Hu Y Y. Application of a heavy metal-resistant *Achromobacter* sp. for the simultaneous immobilization of cadmium and degradation of sulfamethoxazole from wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **402**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124032.
- [14] Yang J X, Feng L, Pi S S, *et al.* A critical review of aerobic denitrification: Insights into the intracellular electron transfer [J]. Science of the Total Environment, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139080.
- [15] Ji B, Yang K, Zhu L, *et al.* Aerobic denitrification: a review of important advances of the last 30 years [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2015, **20**(4): 643-651.
- [16] Gao H, Schreiber F, Collins G, *et al.* Aerobic denitrification in permeable Wadden Sea sediments [J]. The ISME Journal, 2010, **4**(3): 417-426.
- [17] Marchant H K, Ahmerkamp S, Lavik G, *et al.* Denitrifying community in coastal sediments performs aerobic and anaerobic respiration simultaneously [J]. The ISME Journal, 2017, **11**(8): 1799-1812.
- [18] Guo L Y, Chen Q K, Fang F, *et al.* Application potential of a newly isolated indigenous aerobic denitrifier for nitrate and ammonium removal of eutrophic lake water [J]. Bioresource Technology, 2013, **142**: 45-51.
- [19] Tang Y Q, Li M, Xu D N, *et al.* Application potential of aerobic denitrifiers coupled with a biostimulant for nitrogen removal from urban river sediment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(6): 5980-5993.
- [20] Zhou S L, Huang T L, Zhang H H, *et al.* Nitrogen removal

- characteristics of enhanced in situ indigenous aerobic denitrification bacteria for micro-polluted reservoir source water [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **201**: 195-207.
- [21] Zhou S L, Huang T L, Ngo H H, *et al.* Nitrogen removal characteristics of indigenous aerobic denitrifiers and changes in the microbial community of a reservoir enclosure system via *in situ* oxygen enhancement using water lifting and aeration technology [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 63-73.
- [22] Wen G, Wang T, Li K, *et al.* Aerobic denitrification performance of strain *Acinetobacter johnsonii* WGX-9 using different natural organic matter as carbon source: Effect of molecular weight [J]. *Water Research*, 2019, **164**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114956.
- [23] 王彤, 文刚, 黄廷林, 等. 水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5027-5036.
- Wang T, Wen G, Huang T L, *et al.* Characteristics of organic matter in sediments during the thermal stratification of a reservoir and effects on an aerobic denitrifier[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5027-5036.
- [24] 周石磊, 孙悦, 岳胥丞, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2177-2187.
- Zhou S L, Sun Y, Yue G C, *et al.* Spatial distribution characteristics and driving factors of aerobic denitrification bacterial community structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area during the winter freezing period[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2177-2187.
- [25] Zhou S L, Sun Y, Li Z X, *et al.* Characteristics and driving factors of the aerobic denitrifying microbial community in Baiyangdian Lake, Xiong'an New Area [J]. *Microorganisms*, 2020, **8**(5), doi: 10.3390/microorganisms8050714.
- [26] 杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- Du Y H, Liu C, Chen K N, *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- [27] Wang H L, Han J Q, Deng N, *et al.* Effects of the natural restoration time of abandoned farmland in a semiarid region on the soil denitrification rates and abundance and community structure of denitrifying bacteria [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, **103**(4): 1939-1951.
- [28] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 基于 UV-vis 和 EEMs 解析白洋淀冬季冰封期间隙水 DOM 的光谱特征及来源[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(2): 604-614.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spectral characteristics and sources of DOM in sediment interstitial water from Baiyangdian Lake in Xiong'an new area during the winter freezing period based on UV-Vis and EEMs[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 604-614.
- [29] 周石磊, 孙悦, 苑世超, 等. 岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2635-2645.
- Zhou S L, Sun Y, Yuan S C, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of chromophoric dissolved organic matter in sediment interstitial water from Gangan Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2635-2645.
- [30] Song K S, Shang Y X, Wen Z D, *et al.* Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis [J]. *Water Research*, 2019, **150**: 403-417.
- [31] Li P H, Hur J. Utilization of UV-Vis spectroscopy and related data analyses for dissolved organic matter (DOM) studies: A review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2017, **47**(3): 131-154.
- [32] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [33] Lavonen E E, Kothawala D N, Tranvik L J, *et al.* Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production [J]. *Water Research*, 2015, **85**: 286-294.
- [34] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.
- [35] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [36] Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Microbial aerobic denitrification dominates nitrogen losses from reservoir ecosystem in the spring of Zhoucun reservoir [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 998-1010.
- [37] Zhang Y L, Liu M L, Qin B Q, *et al.* Photochemical degradation of chromophoric-dissolved organic matter exposed to simulated UV-B and natural solar radiation [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **627**(1): 159-168.
- [38] Lawaetz A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water [J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 936-940.
- [39] Rogers M B, Firek B, Shi M, *et al.* Disruption of the microbiota across multiple body sites in critically ill children [J]. *Microbiome*, 2016, **4**(1), doi: 10.1186/s40168-016-0211-0.
- [40] Huhe, Chen X J, Hou F J, *et al.* Bacterial and fungal community structures in Loess Plateau grasslands with different grazing intensities [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fmicb.2017.00606.
- [41] Jiao S, Chen W M, Wang J L, *et al.* Soil microbiomes with distinct assemblies through vertical soil profiles drive the cycling of multiple nutrients in reforested ecosystems [J]. *Microbiome*, 2018, **6**(1), doi: 10.1186/s40168-018-0526-0.
- [42] Li Y, Wu H N, Shen Y, *et al.* Statistical determination of crucial taxa indicative of pollution gradients in sediments of Lake Taihu, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 753-762.
- [43] Zhou J Z, Deng Y, Luo F, *et al.* Phylogenetic molecular ecological network of soil microbial communities in response to elevated CO₂ [J]. *mBio*, 2011, **2**(4), doi: 10.1128/mBio.00122-11.
- [44] Kernan M R, Helliwell R C. Partitioning the variation within the acid neutralizing capacity of surface waters in Scotland in relation to land cover, soil and atmospheric depositional factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **265**(1-3): 39-49.
- [45] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 213-223.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spatial distribution, spectral characteristics, and sources analysis of dissolved organic matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District during the winter freezing period [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 213-223.

- [46] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2003, **82**(3-4): 239-254.
- [47] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [48] 卢松, 江韬, 张进忠, 等. 两个水库型湖泊中溶解性有机质三维荧光特征差异[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 516-523.
Lu S, Jiang T, Zhang J Z, *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristic differences of dissolved organic matter (DOM) from two typical reservoirs[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 516-523.
- [49] Sun Z Y, Lv Y K, Liu Y X, *et al.* Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a novel metal resistant bacterium *Cupriavidus* sp. S1 [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **220**: 142-150.
- [50] Su J F, Wang Z, Huang T L, *et al.* Simultaneous removal of nitrate, phosphorous and cadmium using a novel multifunctional biomaterial immobilized aerobic strain *Proteobacteria Cupriavidus* H29[J]. *Bioresource Technology*, 2020, **307**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123196.
- [51] Bai Y H, Su J F, Wen Q, *et al.* Characterization and mechanism of Mn(II)-based mixotrophic denitrifying bacterium (*Cupriavidus* sp. HY129) in remediation of nitrate (NO_3^- -N) and manganese (Mn(II)) contaminated groundwater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **408**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124414.
- [52] Yasin N H-M, Sanchez-Torres V, Maeda T. Enhanced reduction of waste activated sludge at a low temperature by locally isolated strains *Pseudomonas* sp. VNT and *Aeromonas* sp. VNT [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **174**: 134-141.
- [53] Chen M X, Wang W C, Feng Y, *et al.* Impact resistance of different factors on ammonia removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium *Aeromonas* sp. HN-02[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **167**: 456-461.
- [54] Yang N, Zhan G Q, Li D P, *et al.* Complete nitrogen removal and electricity production in *Thauera*-dominated air-cathode single chambered microbial fuel cell[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **356**: 506-515.
- [55] Yang N, Zhan G Q, Wu T T, *et al.* Effect of air-exposed biocathode on the performance of a *Thauera*-dominated membraneless single-chamber microbial fuel cell (SCMFC)[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **66**: 216-224.
- [56] Caro-Quintero A, Auchtung J, Deng J, *et al.* Genome sequencing of five *Shewanella baltica* strains recovered from the oxic-anoxic interface of the Baltic Sea [J]. *Journal of Bacteriology*, 2012, **194**(5), doi: 10.1128/JB.06468-11.
- [57] Jiang M, Zheng X, Liu H, *et al.* *Shewanella oneidensis* MR-1 improving denitrification performance via influencing electron competition and distribution [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2020, **10**, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100381.
- [58] Chen Q, Ni J R. Ammonium removal by *Agrobacterium* sp. LAD9 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2012, **113**(5): 619-623.
- [59] Huang W Y, She Z L, Gao M C, *et al.* Effect of anaerobic/aerobic duration on nitrogen removal and microbial community in a simultaneous partial nitrification and denitrification system under low salinity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 859-870.
- [60] Wang T, Dang Q F, Liu C S, *et al.* Heterotrophic nitrogen removal by a newly-isolated alkalitolerant microorganism, *Serratia marcescens* W5 [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **211**: 618-627.
- [61] Liang D H, Hu Y Y, Cheng J H, *et al.* Simultaneous sulfamethoxazole biodegradation and nitrogen conversion in low C/N ratio pharmaceutical wastewater by *Achromobacter* sp. JL9 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135586.
- [62] Sánchez C, Minamisawa K. Redundant roles of *Bradyrhizobium oligotrophicum* Cu-type (NirK) and *cd1*-type (NirS) nitrite reductase genes under denitrifying conditions [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2018, **365**(5), doi: 10.1093/femsle/fny015.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)