



目次

北京市2014~2020年PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>污染影响..... 邵玄逸, 王晓琦, 钟巖盛, 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, 夏崢 (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<sub>2.5</sub>载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险..... 刘桓嘉, 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, 唐逸 (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, 邸彦峰, 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(*Scenedesmus obliquus*)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)

螯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)

间歇梯度曝气下缩短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, 何品晶 (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 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响..... 蒿廉伊, 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<sub>2</sub>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<sub>4</sub><sup>+</sup>-N生物炭对土壤N<sub>2</sub>O-N排放和NH<sub>3</sub>-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年中国全氟辛酸磺酰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)

# 锰砂人工湿地对污染物的强化去除

马权<sup>1</sup>, 王东麟<sup>2,3</sup>, 林慧<sup>2,3</sup>, 柏耀辉<sup>3\*</sup>

(1. 东北师范大学环境学院, 长春 130024; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院生态环境研究中心饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 锰砂由于其具有强氧化和吸附作用已被广泛应用于净水领域中,而在人工湿地中以锰砂为填料的相关研究较少. 根据前期研究推测,在人工湿地的基质中加入锰砂,其能通过氧化吸附强化去除水中的污染物,而还原生成的Mn(II)又能被土壤及根系锰氧化微生物氧化为Mn(III/IV),进而防止Mn(II)在水中的释放. 为验证该推测,本研究探讨了加入锰砂的芦苇人工湿地对污染物的强化去除能力及微生物学机制. 通过比较加入和未加入锰砂(对照组)的人工湿地的运行效果,发现锰砂人工湿地对溶解性有机碳(DOC)、TN和冬季时期NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除具有显著的提升作用. 16S rRNA测序结果表明,锰砂基质能显著提升冬季芦苇根系微生物的丰富度和多样性,但对人工湿地整体的群落结构影响较小,这可能与锰砂湿地强化污染物去除能力有关. 本研究为人工湿地工艺优化提供了一种新思路.

**关键词:** 锰砂; 人工湿地; 芦苇根系物; 生物锰氧化物; 微生物群落多样性

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4304-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.202101289

## Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands

MA Quan<sup>1</sup>, WANG Dong-lin<sup>2,3</sup>, LIN Hui<sup>2,3</sup>, BAI Yao-hui<sup>3\*</sup>

(1. School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Manganese (Mn) sands have been widely used in water purification due to their strong oxidation and adsorption abilities. However, there are few reports on the use of manganese sands as filler material in constructed wetlands. Based on previous studies, we speculated that the addition of manganese sands in constructed wetlands would enhance the removal of pollutants from the source water, and the resulting Mn(II) could then be oxidized by the rhizosphere and soil microorganisms in the wetlands. To test this hypothesis, this study explored the enhanced removal of pollutants in wetlands constructed with manganese sands as substrates and *Phragmites* as plants, and also examined the role of *Phragmites* rhizosphere microorganisms in water purification. By comparing the treatment effects between the wetlands constructed with and without manganese sands (control), we found that the wetland containing manganese sands exhibited significantly improved removal of dissolved organic carbon and total nitrogen, as well as removal of ammonia nitrogen during periods of lower temperature. The 16S rRNA sequencing showed that the addition of manganese sands could increase the richness and diversity of *Phragmites* rhizosphere microorganisms, but had limited impacts on the microbial community structure, which might be an important factor for enhancing the water treatment performance of constructed wetlands. This study provides a new method for the technological optimization of constructed wetlands.

**Key words:** manganese sands; constructed wetland; *Phragmites* rhizosphere; biogenic Mn oxides; microbial community diversity

锰(Mn)是地壳中含量仅次于铁的过渡金属元素并广泛分布于自然环境中,它不仅是生物活动所必需的微量元素,还是一种活泼的矿物相,广泛地参与了氧化还原反应,在元素地球化学循环中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>. 而它的氧化物——锰氧化物,由于具有较强的吸附和氧化能力而被应用于水处理领域<sup>[2,3]</sup>. 有研究发现,生物介导的锰氧化物——生物锰氧化物具有更高的比表面积,在吸附性能上远高于化学合成的锰氧化物,在生物锰氧化物的形成过程中,微生物可以通过分泌与锰氧化相关的酶或特异性的代谢途径,将溶解态的Mn(II)氧化为不溶性的Mn(III/IV)氧化物<sup>[4,5]</sup>.

人工湿地是一种经人为设计、建造、运营和管理的污水处理系统,广泛应用于城镇生活污水、农村废

水、养殖废水和工业废水的处理,具有成本低、能耗低、运行管理方便及环保等特点<sup>[6-10]</sup>. 通过基质的吸附、微生物的同化和异化作用以及植物的吸收三者的协同效应,不仅能够有效去除COD、TN、TP和SS等常规污染物<sup>[11]</sup>,还能去除一些新型有机污染物,如有机磷农药<sup>[12]</sup>和药物及个人护理品<sup>[13]</sup>. 湿地中广泛分布着锰氧化微生物,而在湿地植物根系附近会形成铁锰氧化物胶膜<sup>[14]</sup>. 有研究发现,锰氧化物在模拟人工湿地中氧化污染物后会生成Mn(II),再经过微生物的作用形成生物锰氧化物, Mn(II)

收稿日期: 2021-01-31; 修订日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778603)

作者简介: 马权(1995~),男,硕士,主要研究方向为人工湿地和环境微生物, E-mail: 769452282@qq.com

\* 通信作者, E-mail: yhbai@rcees.ac.cn

与生物锰氧化物之间的循环可增强污染物的去除<sup>[15]</sup>。

基于以往发现<sup>[15]</sup>及前期实验室研究<sup>[16]</sup>, 笔者推测在实际人工湿地中加入锰砂基质, 利用锰氧化物自身的氧化吸附性质强化去除污染物, 同时锰氧化物还原生成的Mn(II)又能被土壤及根系锰氧化物微生物氧化为Mn(III/IV), 既能防止Mn(II)在水中的释放, 又能生成生物锰氧化物进一步去除污染物。而芦苇根系的泌氧功能促进根系微生物的生长, 间接强化了锰氧化的过程。为验证该推测, 本文通过向实际人工湿地中加入锰砂, 研究锰砂填料人工湿地对农村生活污水的强化处理效果, 分析植物根系微生物群落结构以探讨锰砂填料人工湿地对污染物的强化去除机制。本研究将强化锰氧化过程引入到湿地水处理技术中, 以期人工湿地处理技术改进

提供一种新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 中试研究的建立

中试人工湿地位于石家庄市晋州市龙头村(38°03'19.6"N, 115°03'22.3"E), 该地为暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 14.9℃, 年平均降水量为 455.8 mm。中试研究采用 2 块长 12 m, 宽 12 m, 深度为 1.5 m 的人工湿地。湿地内部由下到上分别填充铁矿渣、沙子、陶粒和火山石。一块为添加 100 kg 锰砂的人工湿地(锰砂约含 40% MnO<sub>2</sub>)。而另一块为不填锰砂的人工湿地(对照)。水流方向由上到下, 布水层位于陶粒和火山石覆盖层之间。湿地上方种植芦苇, 芦苇来自于当地苗圃市场, 种植密度约为 50 棵·m<sup>-2</sup>(图 1)。

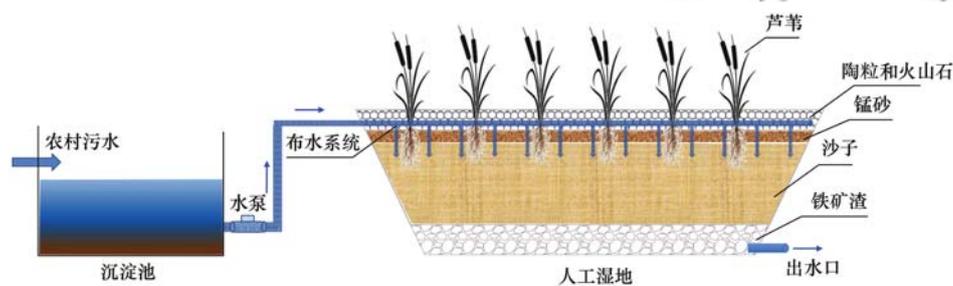


图 1 锰砂人工湿地工艺示意

Fig. 1 Schematic diagram of the constructed wetlands

### 1.2 方案与样品采集

人工湿地于 2019 年 5 月开始运行, 进水为龙头村生活污水, 由水泵将生活污水从沉淀池泵入布水系统, 采用间歇进水的方式, 平均每块人工湿地的处理负荷为 15 t·d<sup>-1</sup>。待人工湿地达到稳定后开始实验(2019 年 12 月)。在不同月份分别对进水和出水进行取样, 使用便携式多参数水质仪(MYRON L Company, 美国)原位测定 pH 和水温(*T*), 采用溶解氧仪(哈希 HQ30d, 美国)原位测定溶解氧(DO)浓度, 在实验室进行 COD、DOC、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的测定。

按照等距采样法, 将每块人工湿地设置 3 个取样点, 对取样点距地面 10~20 cm 处的芦苇根系土和非根系土进行取样, 将样品密封并冷冻保存(-80℃), 用于测定根系土和非根系土中微生物群落结构。

使用抖落法区分根系土与非根系土, 即挖掘出大体完整的芦苇根系, 将松散的土壤抖落并丢弃, 仍然附在根系上的土壤被称为根系土, 距离植物根系 5 cm 以外的未附着在根系上的土壤被称为非根系土。采集时避免不同样品之间的交叉污染。

### 1.3 理化指标测定

水质指标的测定参照文献[17], COD 采用重铬酸钾法测定, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用紫外分光光度法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解法测定, TP 采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定, DOC 使用总有机碳分析仪(Shimadzu TOC-VCPH, 日本)测定。

### 1.4 DNA 提取及 16S rRNA 数据分析

使用土壤 DNA 提取试剂盒(PowerSoil DNA Kit, QIAGEN, 德国)对土壤样品进行总 DNA 的提取。样品送至广东美格基因科技有限公司, 通过引物 515F(5'-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对 16S rRNA 基因的 V4 区进行扩增, 基于 NovaSeqPE250 测序平台, 对样品进行双末端测序。原始 reads 经过去杂、去引物、去接头, 以及过滤低质量的 reads, 得到 clean data。使用 QIIME2<sup>[18]</sup>的 pipeline 处理过滤后的 16S rRNA 扩增子序列的 clean data, 通过合并双端数据、识别及过滤嵌合子、去噪和冗余, 生成扩增子序列变异(amplicon sequence variants, ASVs)。共获得了 1 206 144 个 ASV, 每个样本的

ASV 数量范围为 50 256 ~ 62 682. 对所有样品进行不放回的重抽样标准化,使 ASV 表中每个样本的 ASV 总数均为 50 265. 利用 QIIME2 分析包括 Shannon、Chao1 和 Pielou 指数在内的  $\alpha$  多样性指数,使用 Bray-Curtis 距离矩阵分析  $\beta$  多样性,并使用 R 中的 vegan 程序包 (v2. 5. 2) [19] 对距离矩阵进行 PCoA 分析,用于表示群落样本的结构分布特征.

### 1.5 数据统计与分析

采用配对样本 Wilcoxon 符号秩检验对锰砂和对照湿地的水质及微生物相对丰度进行差异性分析. 采用皮尔森检验法 (检验水平为  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$ ) 探讨温度与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率的相关性. 采用 ANOSIM 相似性分析,检验 2 块人工湿地中生物群落结构是否具有显著差异.

## 2 结果与讨论

### 2.1 人工湿地对污染物的去除效果

采样期间锰砂及对照人工湿地中水温、pH 及 DO 的变化见图 2. 随着季节变化,湿地进水水温 ( $3.5 \sim 26.9^\circ\text{C}$ ) 及理化性质变化明显. DO 从 1 月最高  $14.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  降低至  $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (7 月),而进水 pH 逐渐下降,且经过湿地处理后,pH 均显著升高. 锰砂人工湿地相应对照未发现水温、pH 及 DO 有明显差异.

对比锰砂及对照人工湿地的水处理效果 (图 3),发现随着季节变化,尽管进水浓度发生明显变化,2 块湿地 (锰砂及对照) 对 COD 和 TP 的去除率趋于平稳且两者无显著差异 ( $P > 0.05$ , Wilcoxon 符号秩检验). DOC 的去除率在 20% ~ 80% 之间波动,且锰砂人工湿地的去除率显著高于对照人工湿地 ( $P = 0.028$ ). TN 的去除率随月份呈波动上升的趋势,锰砂人工湿地对其的去除率显著高于对照湿地 ( $P = 0.008$ ). 2 块湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率在 12 月至次年 1 月 (冬季) 较低,8 ~ 9 月 (夏秋季) 趋于稳定,且锰砂人工湿地对其的去除率在冬季显著高于对照湿地 ( $P = 0.047$ ),而在夏秋季无显著差异. 此外,本实验结果发现湿地处理后出水的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度相比于进水有明显上升,通过分析  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  减少量与  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  增加量的相关性 (一元回归),发现约 22% 的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ .

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率与水温的皮尔森分析显示两者具有显著正相关 ( $P < 0.01$ ),这表明温度升高可导致湿地微生物硝化作用的显著上升. 锰砂湿地相比于对照湿地在冬季去除或转化  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  作用较为明显,而在夏秋季无明显差异 (冬季:  $P = 0.047$ ; 夏秋

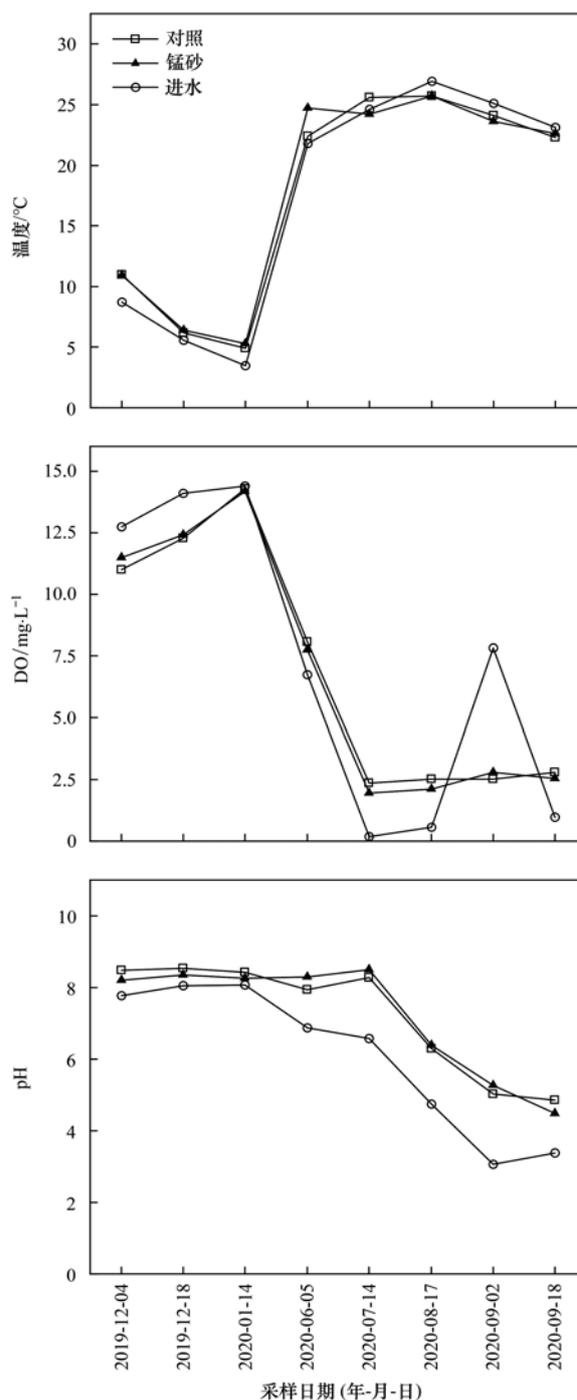
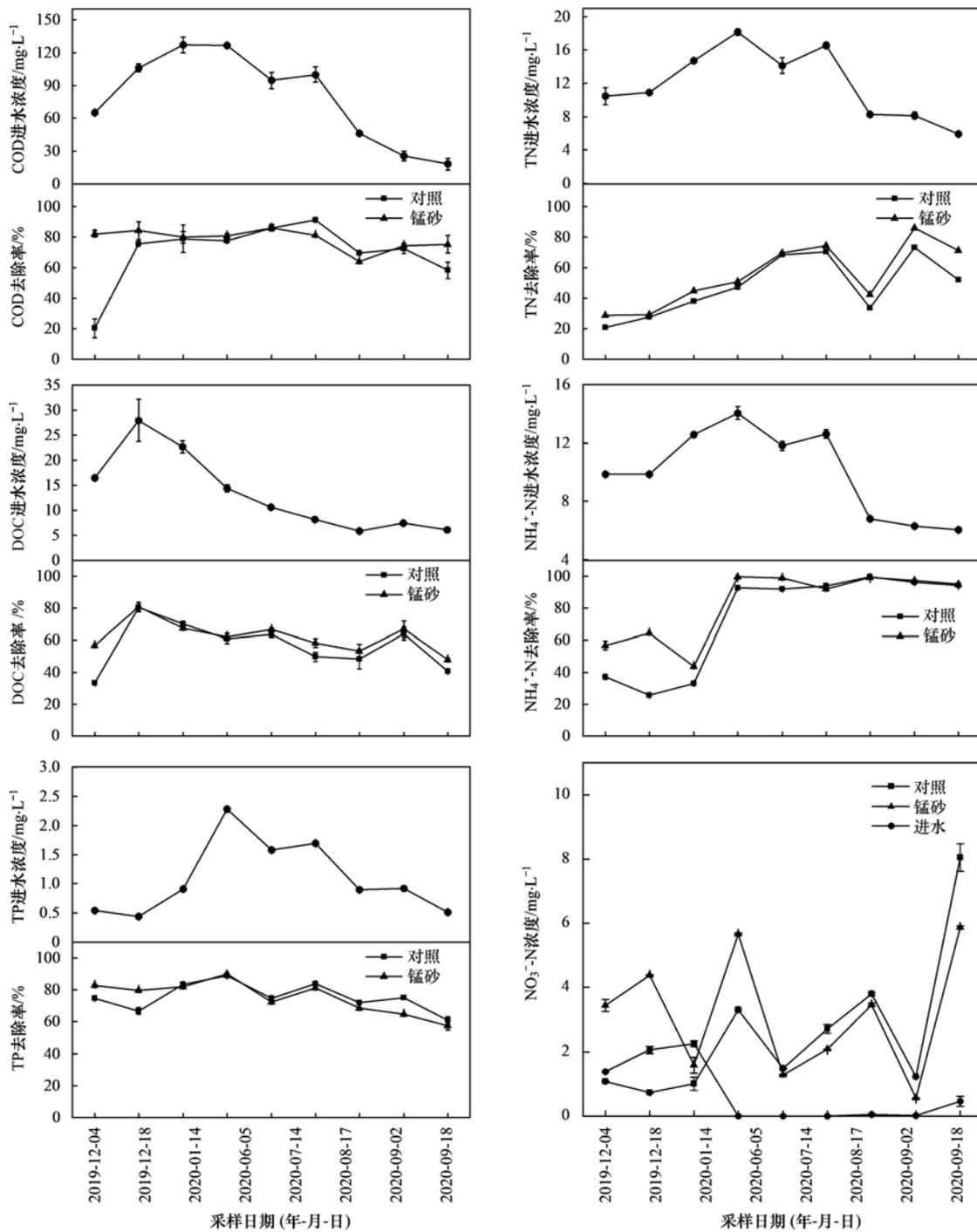


图 2 采样期间水温、pH 及 DO 变化分析

Fig. 2 Variation of water temperature, pH, and DO during the sampling period

季:  $P = 0.25$ ),这可能是由于冬季微生物作用弱,而锰砂湿地中的锰氧化物可作为电子中介,催化氧化  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,促进了  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的转化 [20]. 转化途径为  $\text{MnO}_x + \text{NH}_4^+ + \text{H}^+ \longrightarrow \text{NO}_3^- + \text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$  或  $\text{MnO}_x + \text{NH}_4^+ + \text{H}^+ \longrightarrow \text{N}_2 + \text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$ . 而夏秋季 2 块湿地都以微生物转化去除为主,去除率均在 92% ~ 99%,导致差异并不明显.

人工湿地上下潜流型的结构以及芦苇根系的泌氧功能,为进水补充溶解氧提供了条件,并且在出水



图中误差线为 2 次测量值的平均偏差

图 3 锰砂及对照人工湿地对污染物的去除

Fig. 3 Pollutant removal in the constructed wetlands with and without manganese oxides

中未检测到锰离子析出,因此笔者推测在人工湿地上层好氧层及植物根系附近发生了锰氧化反应.然而本研究中锰砂与对照人工湿地的 COD、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 的去除率差异相对较小,可能是由进水浓度较低或湿地锰氧化物加入量较少导致.此外,有研究表明,含铁基质的人工湿地对 TN 和 TP 具有较高的去除率<sup>[21]</sup>,而本实验中的人工湿地底部支撑层均为铁矿渣,这可能是导致锰砂与对照人工湿地污染物去除率差异较小的原因.

## 2.2 微生物群落结构分析

为进一步分析锰砂及对照人工湿地对污染物的微生物去除的机制,对 12 月至次年 1 月以及 8~9 月的根系土及非根系土(共 24 个样品)进行了细菌 16S rRNA 测序与分析.

### 2.2.1 微生物群落多样性分析

16S rRNA 测序分析共获得 1 206 144 个 ASV,对其  $\alpha$  多样性分析可以看出(表 1),锰砂人工湿地中细菌群落的丰富度和多样性指数均显著高于对照湿

地 ( $P < 0.05$ , Wilcoxon 检验), 这种差异在冬季的根系土中更为明显. 这表明锰砂的加入能显著提高冬季时湿地根系中微生物群落的丰富度和多样性. 可能是由于加入的锰砂具有疏松多孔的结构特征, 而微生物作用下生成的生物锰氧化物具有更小的粒径和更高的比表面积<sup>[5]</sup>, 便于微生物附着和聚集. 而夏秋季锰

砂与对照湿地的差异较小可能是由于夏秋季温度高, 便于微生物生长造成两者差异较小, 这与氨氮去除率变化规律相符合. 此外, 芦苇根系中微生物群落的丰富度和多样性均高于非根系土 ( $P < 0.05$ , Wilcoxon 检验), 这可能是由于植物根系会分泌有机物和氧气, 促进了芦苇根系附近的微生物的生长.

表 1 人工湿地中微生物群落的多样性指数<sup>1)</sup>

Table 1 Diversity indices of microbial communities in the constructed wetlands

时间	分组	项目	ASV	Shannon 指数	Chao1 指数	Pielou 指数
12 月至次年 1 月	锰砂	根系土	1 260	8. 887	1 261. 38	0. 863
		非根系土	888	7. 663	889. 18	0. 785
	对照	根系土	895	7. 673	895. 13	0. 786
		非根系土	854	6. 927	854. 28	0. 713
8 ~ 9 月	锰砂	根系土	1 128	8. 360	1 130. 27	0. 827
		非根系土	1 063	8. 310	1 063. 00	0. 827
	对照	根系土	1 066	8. 290	1 068. 00	0. 824
		非根系土	1 004	8. 197	1 006. 65	0. 823

1) 数据为 3 次采样数据的平均值

### 2.2.2 微生物群落差异性分析

主坐标分析结果表明 [图 4(a)], 季节变化是导致微生物群落结构差异的关键因子. 通过 ANOSIM 计算发现锰砂的加入对冬季人工湿地微生物群落结构无明显影响 ( $R = -0.086$ ,  $P = 0.683$ ), 对夏秋季的微生物群落结构也影响较小 ( $R = 0.014$ ,  $P = 0.392$ ).

对微生物群落在门水平上的组成进行了分析 [图 4(b)], 结果表明, 锰砂和对照湿地中变形菌门 (Proteobacteria) 为相对丰度最高的菌门, 占 50.9% ~ 88.16%, 其次是拟杆菌门 (Bacteroidetes)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 和放线菌门 (Actinobacteria). 这些菌门广泛存在于自然界中, 已有研究报道发现这些菌门对污染物的去除具有重要作用<sup>[22-25]</sup>. 通过比较分析, 锰砂与对照湿地在群落组成上无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 表明锰砂的加入对微生物群落结构在门水平上影响较小.

在属水平中选取了丰度前 20 的菌属 (除去 2 个未能注释的菌属), 样本中丰度前 18 位菌属的热图如图 4(c) 所示, 可以看出, 因季节变化导致的群落结构差异较为明显. 对氮转化相关菌属的相对丰度进行差异性分析, 结果显示, *Flavobacterium*、*Dechloromonas* 和 *Zoogloea* 等菌属在低温时期的相对丰度显著高于 8 ~ 9 月 ( $P < 0.05$ ), 而 *Nitrospira* 和 *Thermomonas* 菌属在 8 ~ 9 月的相对丰度显著高于低温时期 ( $P < 0.05$ ). *Flavobacterium* 菌属具有较强的硝化能力, 并且可在低温中进行新陈代谢, 与 TN 的去除有关<sup>[26,27]</sup>. *Zoogloea* 菌属是一种兼性菌, 既可以分解有机物, 还参与了反硝化作用, 对硝酸盐还原

为氮气和固氮有积极作用<sup>[28]</sup>. *Nitrospira* 菌属是典型的氨氧化菌, 可将亚硝酸盐氧化为硝酸盐. *Dechloromonas*、*Thermomonas* 和 *Rhodobacter* 是属于反硝化菌, 都与 TN 的去除有关. 由此可以看出, *Flavobacterium*、*Dechloromonas* 和 *Zoogloea* 等菌属能够适应低温的环境, 促进总氮的去除. 而 *Nitrospira* 和 *Thermomonas* 菌属对温度较为敏感<sup>[29]</sup>, 是 8 ~ 9 月氨氮转化和总氮去除的主要菌属. 此外, *Thiobacillus*、*Dechloromonas* 和 *Thermomonas* 等菌属在根系土中的丰度显著高于非根系土 ( $P < 0.05$ ), 说明植物根系分泌的有机物和泌氧功能会促进这些根系细菌的生长繁殖, 进一步促进了有机物和 TN 的去除.

此外, 在优势菌属中包含与铁锰氧化还原相关的菌属. *Pseudomonas*、*Arthrobacter*、*Acinetobacter* 和 *Flavobacterium* 均被报道具有氧化 Mn(II) 的能力<sup>[1,30,31]</sup>. 而 *Crenothrix* 和 *Acidovorax* 为异养铁氧化菌<sup>[32]</sup>. *Geobacter* 为金属还原菌, 可利用多种有机物质作为电子供体, 将高价态的 Fe(III) 和 Mn(IV) 还原为 Fe(II) 和 Mn(II) 并从中获得能量<sup>[33]</sup>. 对以上菌属进行差异性分析, 结果表明, 季节变化对其相对丰度的影响较为显著, 仅有 *Geobacter* 在低温时期的相对丰度显著高于 8 ~ 9 月 ( $P = 0.02$ ), 其余菌属在低温时期的相对丰度均显著低于 8 ~ 9 月 ( $P < 0.05$ ). 此外, *Acidovorax* 和 *Geobacter* 在根系土中的相对丰度显著高于非根系 ( $P < 0.05$ ), 这可能是由于植物根系分泌的有机物为其提供了生长所必需的碳源和电子供体. 然而, 锰砂和对照人工湿地之间的优势菌的丰度均无显著的差别 ( $P > 0.05$ ), 这表明

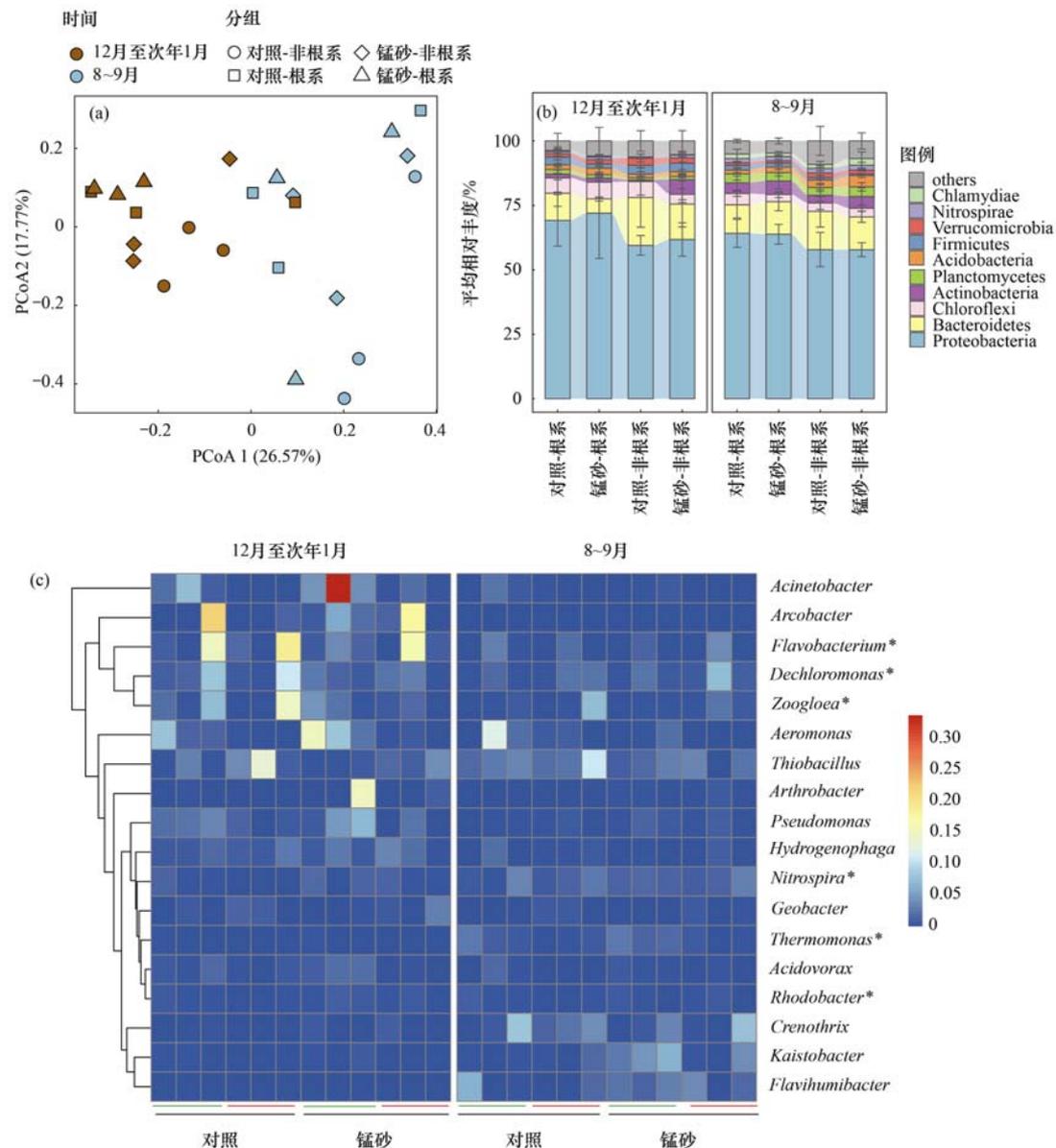


图4 锰砂及对照湿地中微生物群落的 PCoA 分析及其在门和属水平上的组成

Fig. 4 PCoA analysis, and composition at phylum level and genus level of microbial communities in the constructed wetlands

填加锰砂对该人工湿地微生物群落结构影响较小,这在以往研究中也有过报道<sup>[34]</sup>。

综上所述,填加锰砂会提升人工湿地系统中微生物的丰度和多样性,但对微生物群落的主要结构特别是丰度较高的细菌影响不大。

### 3 结论

(1)水质数据分析表明,填加锰砂可显著提升人工湿地对 DOC、TN 的去除以及冬季时期氨氮的转化,但对 COD 和 TP 的去除率无显著影响。

(2)16S rRNA 数据分析显示,锰砂可显著提高冬季时人工湿地中芦苇根系微生物的丰富度和多样性,但对微生物群落结构影响较小,这可能与锰砂湿地强化污染物去除能力有关。

(3)锰砂人工湿地对  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除中,除相关

微生物的作用,可能还存在锰砂直接催化转化  $\text{NH}_4^+$ -N 的反应。

#### 参考文献:

- [1] Tebo B M, Bargar J R, Clement B G, *et al.* Biogenic manganese oxides: properties and mechanisms of formation [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2004, **32**: 287-328.
- [2] Schlosser D, Höfer C. Laccase-catalyzed oxidation of  $\text{Mn}^{2+}$  in the presence of natural  $\text{Mn}^{3+}$  chelators as a novel source of extracellular  $\text{H}_2\text{O}_2$  production and its impact on manganese peroxidase [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(7): 3514-3521.
- [3] Bruins J H, Petrusevski B, Slokar Y M, *et al.* Manganese removal from groundwater; characterization of filter media coating [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, **55**(7): 1851-1863.
- [4] Katsyiannis I A, Zouboulis A I, Jekel M. Kinetics of bacterial As(III) oxidation and subsequent As(V) removal by sorption onto biogenic manganese oxides during groundwater treatment [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, **43**

- (2): 486-493.
- [ 5 ] Nelson Y M, Lion L W, Shuler M L, *et al.* Effect of oxide formation mechanisms on lead adsorption by biogenic manganese (hydr) oxides, iron (hydr) oxides, and their mixtures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36** (3): 421-425.
- [ 6 ] Carvalho P N, Arias C A, Brix H. Constructed wetlands for water treatment: new developments [J]. *Water*, 2017, **9** (6), doi: 10.3390/w9060397.
- [ 7 ] Badejo A A, Omole D O, Ndambuki J M, *et al.* Municipal wastewater treatment using sequential activated sludge reactor and vegetated submerged bed constructed wetland planted with *Vetiveria zizanioides* [J]. *Ecological Engineering*, 2017, **99**: 525-529.
- [ 8 ] Lu S B, Zhang X L, Wang J H, *et al.* Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **127**: 325-330.
- [ 9 ] Huang X, Zheng J L, Liu C X, *et al.* Removal of antibiotics and resistance genes from swine wastewater using vertical flow constructed wetlands: effect of hydraulic flow direction and substrate type [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **308**: 692-699.
- [ 10 ] Mojiri A, Lou Z Y, Tajuddin R M, *et al.* Co-treatment of landfill leachate and municipal wastewater using the ZELIAC/zeolite constructed wetland system [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **166**: 124-130.
- [ 11 ] Ilyas H, Masih I. The performance of the intensified constructed wetlands for organic matter and nitrogen removal: a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **198**: 372-383.
- [ 12 ] Liu T, Xu S R, Lu S Y, *et al.* A review on removal of organophosphorus pesticides in constructed wetland: Performance, mechanism and influencing factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 2247-2268.
- [ 13 ] Delgado N, Bermeo L, Hoyos D A, *et al.* Occurrence and removal of pharmaceutical and personal care products using subsurface horizontal flow constructed wetlands [J]. *Water Research*, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116448.
- [ 14 ] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜 [J]. *生态学报*, 2005, **25** (2): 358-363.
- [ 15 ] Xie H J, Yang Y X, Liu J H, *et al.* Enhanced triclosan and nutrient removal performance in vertical up-flow constructed wetlands with manganese oxides [J]. *Water Research*, 2018, **143**: 457-466.
- [ 16 ] Bai Y H, Yang T T, Liang J S, *et al.* The role of biogenic Fe-Mn oxides formed in situ for arsenic oxidation and adsorption in aquatic ecosystems [J]. *Water Research*, 2016, **98**: 119-127.
- [ 17 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [ 18 ] Bolyen E, Rideout J R, Dillon M R, *et al.* Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2 [J]. *Nature Biotechnology*, 2019, **37** (8): 852-857.
- [ 19 ] Dixon P. VEGAN, a package of R functions for community ecology [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2003, **14** (6): 927-930.
- [ 20 ] 师菊莲, 史昕欣, 黄廷林. 锰氧化物催化氨氮氧化的电子转移路径研究 [J]. *水处理技术*, 2020, **46** (8): 64-68, 73.
- [ 21 ] Liang Y, Wei D Y, Hu J S, *et al.* Glyphosate and nutrients removal from simulated agricultural runoff in a pilot pyrrhotite constructed wetland [J]. *Water Research*, 2020, **168**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115154.
- [ 22 ] Zhang T, Shao M F, Ye L. 454 Pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants [J]. *The ISME Journal*, 2012, **6** (6): 1137-1147.
- [ 23 ] Bauer M, Kube M, Teeling H, *et al.* Whole genome analysis of the marine *Bacteroidetes* '*Gramella forsetii*' reveals adaptations to degradation of polymeric organic matter [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8** (12): 2201-2213.
- [ 24 ] Daniel L M C, Pozzi E, Foresti E, *et al.* Removal of ammonium via simultaneous nitrification-denitrification nitrite-shortcut in a single packed-bed batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (3): 1100-1107.
- [ 25 ] Ansola G, Arroyo P, De Miera L E S. Characterisation of the soil bacterial community structure and composition of natural and constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **473-474**: 63-71.
- [ 26 ] 苏金凤, 吕祥, 马传敏, 等. 一株异养硝化细菌的分离培养及鉴定 [J]. *生物化工*, 2020, **6** (4): 79-82.
- [ 27 ] 李廷梅, 于鲁冀, 刘攀龙, 等. 波流式生态滤床氨氮去除效果及其微生物群落结构分析 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37** (10): 3664-3671.
- [ 28 ] Shao Y Q, Chung B S, Lee S S, *et al.* *Zoogloea caeni* sp. nov., a floc-forming bacterium isolated from activated sludge [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2009, **59** (3): 526-530.
- [ 29 ] Alawi M, Off S, Kaya M, *et al.* Temperature influences the population structure of nitrite-oxidizing bacteria in activated sludge [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, **1** (3): 184-190.
- [ 30 ] An Q, Jin L, Deng S M, *et al.* Removal of Mn(II) by a nitrifying bacterium *Acinetobacter* sp. AL-6: Efficiency and mechanisms [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-12764-6.
- [ 31 ] Carmichael M J, Carmichael S K, Santelli C M, *et al.* Mn(II)-oxidizing bacteria are abundant and environmentally relevant members of ferromanganese deposits in caves of the upper Tennessee River basin [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2013, **30** (9): 779-800.
- [ 32 ] Ilbert M, Bonnefoy V. Insight into the evolution of the iron oxidation pathways [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 2013, **1827** (2): 161-175.
- [ 33 ] Coates J D, Bhupathiraju V K, Achenbach L A, *et al.* *Geobacter hydrogenophilus*, *Geobacter chapellei* and *Geobacter grificiae*, three new, strictly anaerobic, dissimilatory Fe(III)-reducers [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2001, **51** (2): 581-588.
- [ 34 ] 刘俊花. 锰矿物对人工湿地中三氯生及常规污染物强化去除的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.

## CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing, from 2014 to 2020 .....	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> -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 (Nereididae) 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 <sub>2</sub> 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 <sub>4</sub> <sup>+</sup> -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)