

目 次

- 2018~2020年北京市大气PM<sub>2.5</sub>污染特征及改善原因 ..... 刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)  
京津冀城市群冬季二次PM<sub>2.5</sub>的时空分布特征 ..... 姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)  
COVID-19管控前后不同污染阶段PM<sub>2.5</sub>中二次无机离子变化特征 ..... 姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)  
基于在线观测的太原市冬季PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染水平及来源解析 ..... 崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)  
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源 ..... 王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)  
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 庞晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小明, 郭送军 (2461)  
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性 ..... 侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓昊, 范丽雅, 叶代启 (2472)  
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析 ..... 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (2481)  
天津市空气污染的健康影响分析 ..... 华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)  
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析 ..... 杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炳亮 (2502)  
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析 ..... 王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)  
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应 ..... 钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)  
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价 ..... 李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)  
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析 ..... 陆嘉玮, 徐晨烨, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)  
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 蔡飞, 毛潇萱, 潘文惠, 米璇 (2562)  
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险 ..... 张雪, 朱波 (2574)  
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价 ..... 刘海, 赵国红 (2583)  
基于贝叶斯网络的太湖湖叶绿素a影响因素分析 ..... 刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)  
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析 ..... 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)  
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向 ..... 钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)  
镍铁氧化@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制 ..... 张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandyar Shahab (2622)  
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑 ..... 郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)  
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷镉的吸附性能与机制 ..... 何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)  
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制 ..... 欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 邝晓彤 (2661)  
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制 ..... 周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)  
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应 ..... 谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)  
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响 ..... 张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)  
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析 ..... 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)  
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响 ..... 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)  
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响 ..... 刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)  
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 .....  
李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)  
黄土旱塬24a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征 ..... 姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)  
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征 ..... 许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)  
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响 ..... 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)  
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应 ..... 车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 母亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)  
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议 ..... 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)  
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展 ..... 龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)  
河北省土壤化学元素的背景值与基准值 ..... 张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)  
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析 ..... 邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)  
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价 .....  
余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨矣, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)  
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险 ..... 李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)  
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征 ..... 马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峥, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)  
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估 ..... 马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)  
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价 ..... 郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)  
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响 ..... 王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 唯福庆, 李畅 (2889)  
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响 ..... 李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)  
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析 ..... 马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)  
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征 .....  
罗正明, 刘晋仙, 胡砚秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)  
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响 ..... 干皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜晖璘, 王英成 (2928)  
紫云英还田与化肥减量配施对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响 .....  
张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)  
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响 ..... 胡颖槟, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)  
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响 ..... 张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)  
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征 ..... 赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)  
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析 ..... 吴健生, 普雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)  
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验 ..... 房琪, 李绍萍 (2983)  
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例 ..... 陈纪宏, 卞荣星, 张听雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)  
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析 ..... 苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)

# 菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征

赵志瑞<sup>1,2</sup>, 吴海森<sup>1,2</sup>, 马超<sup>1</sup>, 李书缘<sup>1</sup>, 李晴<sup>1</sup>, 袁凯倪<sup>1</sup>, 孟祥源<sup>1</sup>, 刘硕<sup>1\*</sup>, 方晓峰<sup>1\*</sup>

(1. 河北地质大学水资源与环境学院, 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心, 石家庄 050031; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:**为了城市尾水深度脱氮,控制地表水体富营养化,利用分子生物学等方法,分别对脱氮复合菌群和藻菌共生系统的氮代谢性能进行研究。结果表明,氮代谢复合菌群具有较高氨化和反硝化性能。JZ 组对城市尾水中氨氮的去除效果最好,降解率高达 95% 以上,在实验室模拟污水中 JZ 组系统总氮去除效果优于 J 组。高通量测序显示,J 组主要优势菌群及占比分别为:厚壁菌门 44.53%,变形菌门 43.41%,放线菌门 5.37%,类杆菌门 3.04%,绿弯菌门 1.35%; JZ 组丰度主要优势菌群和占比分别为:蓝藻门 33.89%,绿弯菌门 25.34%,变形菌门 19.38%,厚壁菌门 10.02%,酸杆菌门 4.20%;各优势物种在 J 组和 JZ 组比例不同,厚壁菌门分别为 82% 和 18%,变形菌门为 69% 和 31%,蓝藻门为 1% 和 99%,绿弯菌门为 5.1% 和 95%,放线菌门分别为 73% 和 27%。表明 JZ 组在城市尾水中去除氨氮效果较好,J 组氮代谢菌群随着微球藻加入和生长,JZ 组氮代谢菌群构成随之发生变化,以适应优势藻类形成的环境,与微球藻构成新的菌藻氮代谢体系。研究结果为藻菌共代谢体系应用提供了理论和数据基础。

**关键词:**氮代谢; 复合菌群; 菌藻; 共代谢体系; 菌群结构

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2965-09 DOI: 10.13227/j.hjx.202206265

## Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System

ZHAO Zhi-rui<sup>1,2</sup>, WU Hai-miao<sup>1,2</sup>, MA Chao<sup>1</sup>, LI Shu-yuan<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>, YUAN Kai-ni<sup>1</sup>, MENG Xiang-yuan<sup>1</sup>, LIU Shuo<sup>1\*</sup>, FANG Xiao-feng<sup>1\*</sup>

(1. Hebei Province Key Laboratory of Sustained Utilization & Development of Water Recourse, Hebei Province Collaborative Innovation Center for Sustainable Utilization of Water Resources and Optimization of Industrial Structure, Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, School of Water Resources and Environment, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** In order to denitrify the urban tail water deeply and control the eutrophication of surface water, the molecular biology methods were used to study the nitrogen metabolism performance of the denitrification complex flora and the algal-bacteria symbiotic system. The results showed that the nitrogen metabolism complex flora was high ammonification and denitrification performance. The removal effect of ammonia nitrogen of group JZ was very well in urban tailwater, and the degradation rate was as high as 95%. The removal effect of total nitrogen of group JZ was better than that of group J in the experimental water distribution. High-throughput sequencing showed that the main dominant flora and proportion of group J were Firmicutes 44.53%, Proteobacteria 43.41%, Actinobacteria 5.37%, Bacteroidetes 3.04%, and Chloroflexi 1.35%. The main dominant bacterial groups in the group JZ were 33.89% Cyanobacteria, 25.34% Chloroflexi, 19.38% Proteobacteria, 10.02% Firmicutes, and 4.20% Acidobacteria. The dominant species in group J were compared with those in group JZ; the proportions were 82% and 18% in Firmicutes, 69% and 31% in Proteobacteria, 1% and 99% in Cyanobacteria, 5.1% and 95% in Chloroflexi, 73% and 27% in Actinobacteria. It was concluded that the removal effect of ammonia nitrogen of group JZ was high in the urban tailwater. With the addition and growth of Micrococcus in group J, the nitrogen metabolism flora in group JZ changed accordingly, so as to adapt to the environment in which the dominant algae formed. It forms a new nitrogen metabolism system of bacteria and algae with Micrococcus. This research provides a theoretical and data basis for the application of algal-bacterial co-metabolism systems.

**Key words:**nitrogen metabolism; complex flora; bacteria and algae; co-metabolism system; flora structure

我国一次水资源匮乏,尤其北方地区河流补水以城市尾水为主<sup>[1]</sup>。尾水中总氮含量较高,GB 18918-2002 中的一级 A 排放标准,其总氮排放量为  $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中 V 类标准中总氮标准限值为  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,尾水中含氮总量远远高于地表水含氮量<sup>[2]</sup>。目前尾水中 COD 污染加重趋势已经得到初步遏制,氮素已经成为目前尾水中首要污染因子<sup>[3]</sup>,由于尾水含碳量较低,氮代谢微生物进一步脱氮比较困难,过量氮素导致地表水体富营养化严重<sup>[4]</sup>。

微球藻是一类在海陆分布广泛,营养成分丰富,光合利用度高的初级生产者,在生长过程中可以吸

收水中的氮、磷等物质<sup>[5]</sup>。由于光合作用增加了 pH 值,也可以对污水起到消毒作用,减少大肠杆菌和有毒细菌数量,对水生生态系统的稳定起着至关重要的作用<sup>[6]</sup>。利用微球藻去除污染物的方法,近几年才得到国内外的广泛关注,有研究表明,微球藻对生活污水和养殖废水等污废水中的氮和磷等物质具有显著的去除效果<sup>[7,8]</sup>,胡洪营等<sup>[9]</sup>利用微球藻处理

收稿日期: 2022-06-23; 修订日期: 2022-08-10

基金项目: 河北省创新能力提升计划项目(21553601D); 国家自然科学基金项目(U21A2023); 河北省引进国外智力项目(22205018); 河北地质大学科技创新团队项目(KJCXTD-2021-09)

作者简介: 赵志瑞(1975 ~),女,博士(后),教授,主要研究方向为水处理和环境微生物,E-mail:zhirui@163.com

\* 通信作者,E-mail:1511404679@qq.com; fangxiaofeng@gmail.com

城市生活污水二级出水,发现微球藻能有效去除二级出水中的氮磷物质<sup>[10]</sup>.利用微球藻深度处理城市污水厂尾水技术是一种成本付出低、对生态健康有益无害的新技术<sup>[11]</sup>.微球藻具有生长速率较快和耐受力较强等特点,尤其在异养条件下可以实现快速度增长,如微球藻、栅藻和鞘藻等在高效净化含氮废水中应用最为广泛<sup>[12]</sup>.微球藻和细菌之间存在着非常密切的关系,它们可以在不同的生活环境中表现出不同的相互联系<sup>[13,14]</sup>.菌藻协同体系的作用机制是细菌给微球藻提供 CO<sub>2</sub>,微球藻可以为细菌提供 O<sub>2</sub>,两者在生长过程中互相协同,相互促进<sup>[15]</sup>.细菌和蓝藻之间同源性较近,甚至某些异养细菌菌群直接附着在藻细胞表面以获取营养物质<sup>[16]</sup>,基于菌藻之间这种较近的同源关系,生态学家提出了“藻际环境(phycosphere)”的概念,即在此间相互作用的细菌菌群和蓝藻共同构成了水生生态系统中的“菌藻”体系<sup>[17]</sup>.

探讨水体中菌藻体系构成的特征,加强菌藻处理城市尾水的研究,可以缓解地表水体污染和水资源短缺等诸多问题,具有重大的生态意义和社会经济效益,符合可持续发展战略和循环经济原则.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 实验培养基与微生物

氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌液体培养基参照文献[18],微球藻培养基参照文献[19].将实验室在富营养化地表水体原位筛选保存的、功能较好的氨化细菌菌群、硝化细菌菌群和反硝化细菌菌群用接种环分别挑入盛有 100 mL 灭菌的相应的液体培养基中,配成氨化细菌(AX)、硝化细菌(XX)和好氧反硝化细菌(FX)菌液,pH 6.5~7.5,在 35℃,150 r·min<sup>-1</sup>条件下连续培养 72 h,以未接入菌剂的灭菌液体培养基作空白对照实验,分别于反应后的 24、48 和 72 h 时间点取培养液检测其中氨氮、亚硝态氮及硝态氮含量,通过培养液中“三氮”的合成和去除情况进而判断实验室菌剂性能.

将菌活数分别为  $1.27 \times 10^8$ 、 $9.9 \times 10^7$  和  $1.58 \times 10^8$  CFU·mL<sup>-1</sup> 的 AX、XX 和 FX 菌液性能测试后等体积混合配成氮代谢复合菌群;在氮代谢复合菌群培养液内加入等体积对数期微球藻富集培养液:设置两组实验分别为氮代谢复合菌群(J),氮代谢复合菌群和微球藻(JZ),每组设置 3 个重复,光暗比 12 h:12 h,实验过程中平均光照强度为 1 500 lx,34℃恒温连续培养,每组实验设置空白对照(CK).

### 1.1.2 实验用水

在超纯水中通过加入氯化铵和葡萄糖试剂模拟氨氮浓度为 10 mg·L<sup>-1</sup>,COD 为 60 mg·L<sup>-1</sup>的实验室模拟污水(PW);尾水来源于石家庄桥西污水处理厂排水口,其初始水质指标测定结果如表 1 所示,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中一级 A 标准. 为保证实验菌剂对一般城市尾水的处理效果,分别在石家庄桥西污水处理厂尾水中加入氯化铵和葡萄糖,调节尾水中氨氮浓度为 10 mg·L<sup>-1</sup>,COD 浓度为 60 mg·L<sup>-1</sup>,使指标浓度达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中一级 B 标准,作为实验所用尾水(WW).

表 1 城市尾水初始水质指标/mg·L<sup>-1</sup>

水质指标	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TN	COD	DO
初始值	2.2	0.01	0.09	5.2	30.1	7.14

### 1.2 实验方法

氨化细菌性能测定是通过培养液中氨氮生成量来确定的;硝化细菌性能测定是通过培养液中氨氮减少率确定的;反硝化细菌性能测定是通过培养液中硝态氮的减少量确定的. 取实验室保存的微球藻母液 50 mL 于灭菌的 100 mL BG11 培养基中,pH 6.5~7.5,置于 34℃,150 r·min<sup>-1</sup> 条件下在恒温振荡箱中连续培养. 每天定时取样,在紫外分光光度计 680 nm 处测量吸光度值,以吸光度值和天数为条件建立微球藻生长曲线.

氨氮指标的测定方法采用《水质氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535-2009) 标准,亚硝态氮指标的测定方法采用《水质亚硝酸盐氮的测定 分光光度法》(GB 7493-87) 标准,硝态氮指标的测定方法采用《水质硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法(试行)》(HJ/T 346-2007) 标准,总氮指标的测定方法采用《水质总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636-2012) 标准,COD 的测定方法采用快速消解分光光度法<sup>[20,21]</sup>.

采集 J 组和 JZ 组培养液样品低温保存送美吉生物进行高通量测序. 测序细菌测定引物采用 338F/806R<sup>[22]</sup>.

### 1.3 生物信息分析

微生物信息利用 R 语言(version 3.3.1) 和 Circos-0.67-7 分别对物种多样性、群落组成和样本与物种关系在美吉生信云平台(<http://www. isanger. com/>) 对测序有效序列进行分析”,用 Chao1 指数估计样本中所含 OTU 数目的指数,用 Ace 指数

来估计群落中 OTU 数目的指数,用 Simpson 指数来估算样本中微生物多样性的指数,用 Coverage 指数估算各样本文库的覆盖率<sup>[23]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 菌群代谢能力和微球藻生长分析

氨氮、亚硝态氮和硝态氮菌群的氮代谢能力如图 1 所示,微球藻生长特征如图 2 所示.

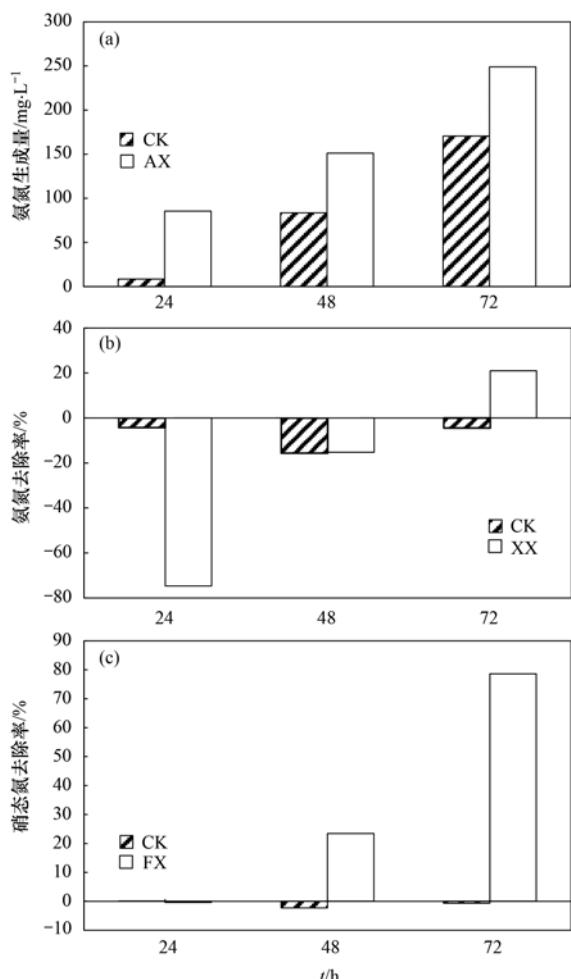


图 1 复合菌群氮代谢性能

Fig. 1 Nitrogen metabolism performance of complex flora

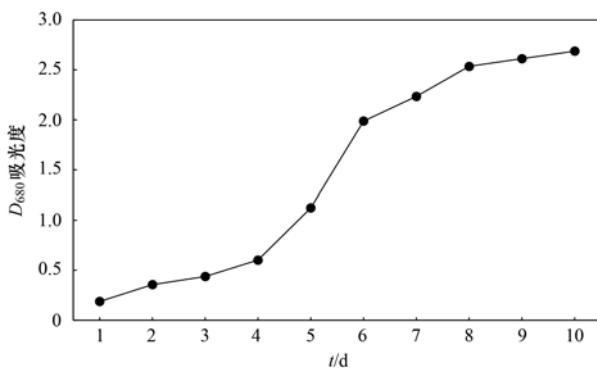


图 2 微球藻生长分析

Fig. 2 Growth analysis of microchlorella

实验空白培养液为 CK, 观察在 CK 加入不同菌群氮代谢性能. 氨化细菌可以将有机态氮转化为氨氮, 通过检测不同时间 AX 中氨氮浓度变化, 判定氨化细菌的氨氮转化能力<sup>[24]</sup>. 开始时 CK 和 AX 氨氮生成量均为  $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 1(a)], 在 24 h, AX 和 CK 中氨氮生成量变化明显, AX 中氨氮的生成量是 CK 的 10 多倍, 随着反应的进行 AX 中氨氮含量不断增加; 在 48 h, AX 比 CK 中氨氮含量高  $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 72 h 时, 二者中氨氮浓度相差  $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 结果表明所选的氨氮复合菌群具有较高的氨化性能.

本研究通过测定硝化细菌培养液(XX)中氨氮的浓度变化检测硝化细菌的硝化性能, 设置空白培养液(CK). 在 24 h 和 48 h 时的测定结果显示, XX 中氨氮的去除率是负值[图 1(b)], 表明培养液中氨氮的含量是增加的, 硝化细菌复合菌群的硝化能力较弱. 72 h 时, XX 中氨氮的含量开始下降, 表明此时的硝化细菌复合菌群开始对 XX 中的氨氮进行转化, 氨氮去除效果为 21%. 结果表明所选的硝化细菌复合菌群相较于氨化细菌复合菌群需要略长的时间才能发挥硝化作用去除培养液中的氨氮.

有氧反硝化细菌在有氧条件下可以将硝态氮转化为氮气及氮氧化物, 本研究通过分别测定反硝化细菌培养液(FX), 空白培养液(CK)判断复合反硝化菌群氮代谢性能. 24 h 时, FX 中硝态氮的含量没有发生明显变化[图 1(c)], 反硝化细菌复合菌群还未开始正常作用. 48 h 时, FX 中硝态氮含量呈快速下降趋势, 此时反硝化复合菌群对培养液中硝态氮的降解率达到 79%. 此后, 反硝化菌群的降解速度相对缓慢, 在 72 h 时其降解硝态氮的能力不到 80%. 结果表明反硝化细菌复合菌群在第 24 ~ 48 h 期间反硝化性能较强, 然后开始变得缓慢. 以上结果表明氮代谢复合菌群具有较高氨化和反硝化性能. 测量微球藻的生长曲线有助于了解微球藻的生长特征, 不同藻类细胞中含有的叶绿素含量不同, 最大吸收峰也不同<sup>[25]</sup>. 接种微球藻培养基在前 4 d 生长速度较为缓慢, 在 4 ~ 8 d 培养过程中, 微球藻的生长速度较快, 达到微球藻对数生长期(图 2); 在第 8 d 后生长曲线  $D$  值增长幅度逐渐平缓, 生长速度减慢. 结果表明, 微球藻在第 4 d 开始进入对数生长期.

### 2.2 氮代谢复合菌群和菌藻在模拟污水中氮代谢分析

#### 2.2.1 氮代谢性能分析

氮代谢复合菌群和菌藻以 2% 投加量加入模拟污水中, 氮代谢性能分析结果如图 3 所示.

由图 3(a) 可知, CK 组的氨氮含量不断增加, J

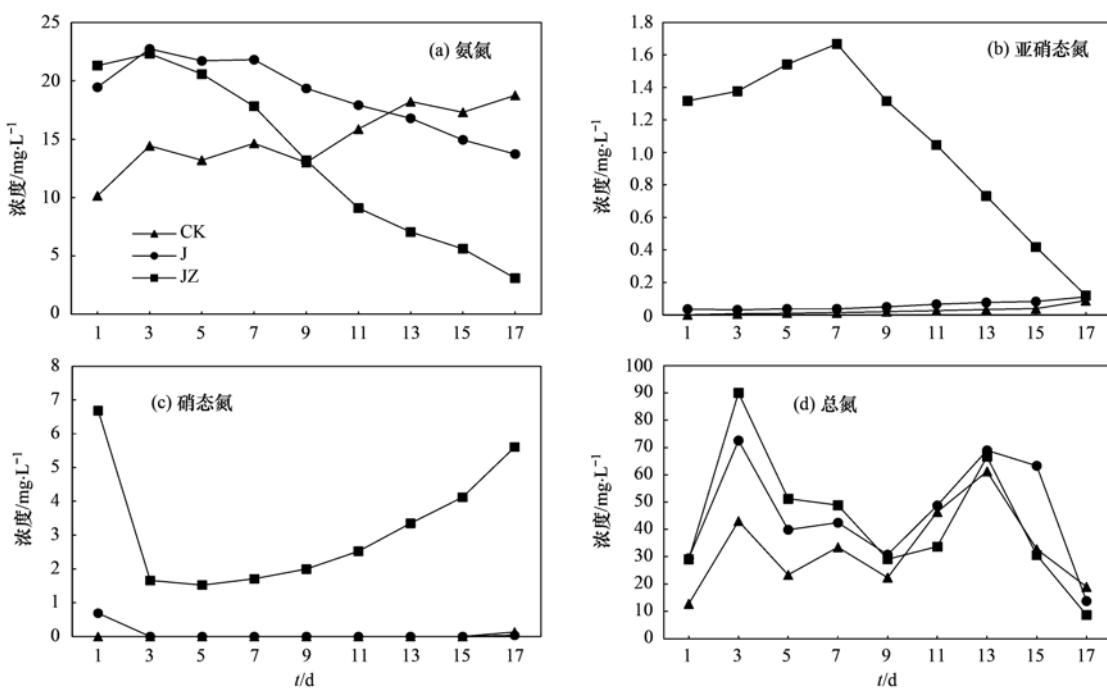


图3 模拟污水中氮代谢分析  
Fig. 3 Analysis of nitrogen metabolism in artificial sewage

组和JZ组在PW中氨氮含量从第3 d开始均持续减少,J组比JZ降解速率缓慢,随着反应进行两组水样中氨氮的含量变化较明显。结果显示,在17d时J组对PW中氨氮降解率为29.4%,降解效果比较低;JZ组中菌藻共代谢系统可去PW中85.5%的氨氮,具有较好的脱氮效果。图3(a)结果表明,在PW中JZ组是J组氮去除能力的2.9倍。

由图3(b)可知,JZ组与J组和CK在模拟污水中亚硝态氮含量在整个反应阶段的含量相差均较大。在JZ组中,亚硝态氮含量在不同阶段有着明显的变化,在第1~7 d过程中,其含量不断上升,原因是亚硝态氮是硝化过程的中间产物,当亚硝化细菌亚硝化速率大于硝化细菌硝化速率时,亚硝态氮发生累积,水中亚硝态氮含量会出现升高现象。在第7 d后,菌藻共代谢系统形成良好的氮共代谢体系,水样中的亚硝态氮达到良好的去除效果。结果表明[图3(b)],JZ氮共代谢系统达到良好的氮代谢性能需要一段时间稳定系统,系统中各微生物也需要一段时间构成共代谢群落才能发挥氮代谢作用,第17 d时,JZ组对PW中亚硝态氮去除率达到99.3%,表明JZ系统具有较高亚硝态氮去除能力。

由图3(c)可知,JZ组中硝态氮含量在反应的第1~3 d呈快速下降的趋势,之后的反应阶段PW中硝态氮含量表现不断增加,且增加速率不断加快。主要由于JZ组中反硝化菌群氮代谢性能相对氨化和亚硝化细菌较弱,不能将硝态氮及时降解转化,导致硝态氮出现累积现象。

由图3(d)可知,JZ、J和CK组在PW中总氮含量在反应整个阶段的升降趋势较为相似。在反应第1~3 d时3组水样中的总氮含量同时出现上升现象,主要是培养基中有机氮的分解未被及时转化。第3~9 d过程中总氮出现波动下降的趋势,随后又在第9~13 d期间3组水样中总氮含量出现第二次同时上升的现象;在第13 d之后4组中总氮含量又继续出现持续下降的现象,J组总氮含量减少了53.2%,JZ组总氮含量减少了70%。3组PW中总氮含量同时出现波动的原因主要是受到培养基成分中含氮物质的影响,部分含氮物质参与氮循环反应,且在该过程中的分解和转化影响了水样中总氮含量。

## 2.2.2 COD 降解效果分析

氮代谢复合菌群和微球藻 COD 的去除效果分析如图4所示。

由图4可知,CK组的COD去除效果不明显,

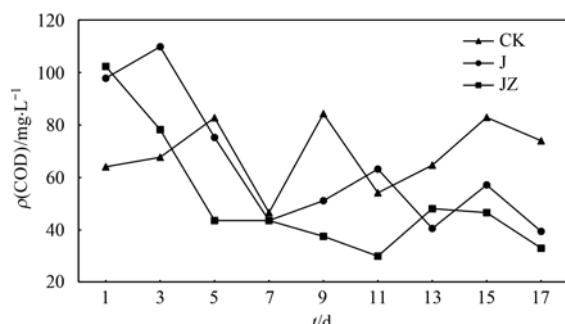


图4 模拟污水中 COD 的去除效果  
Fig. 4 Removal effect of COD in artificial sewage

J组和JZ组在PW中的初始COD含量相差不大,两组氮代谢系统在整个反应过程中对水中COD的降解趋势也较为接近,反应期间COD的含量变化趋势缓慢,对COD的降解效果区别相差不大,J组和JZ组COD去除率分别为59.6%和67.6%,表明2组系统对水中的COD具有一定的

去除效果。

## 2.3 氮代谢复合菌群和微球藻在城市尾水中协同性能分析

### 2.3.1 氮代谢性能分析

氮代谢复合菌群和菌藻以2%投加量加入城市尾水中,氮代谢性能分析结果如图5所示。

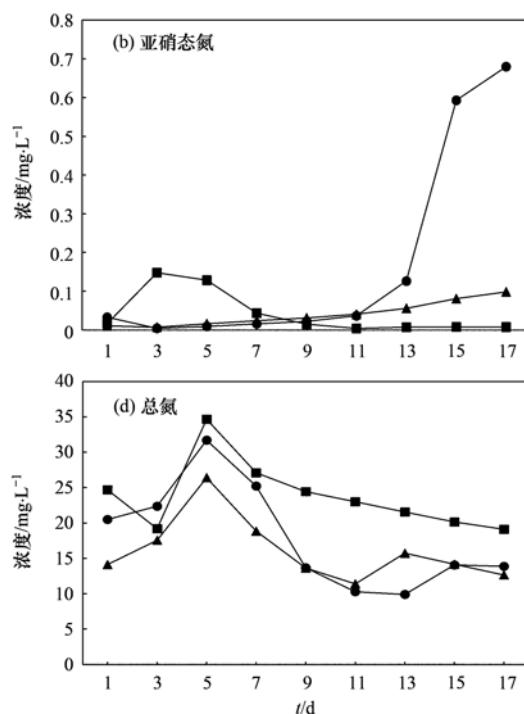
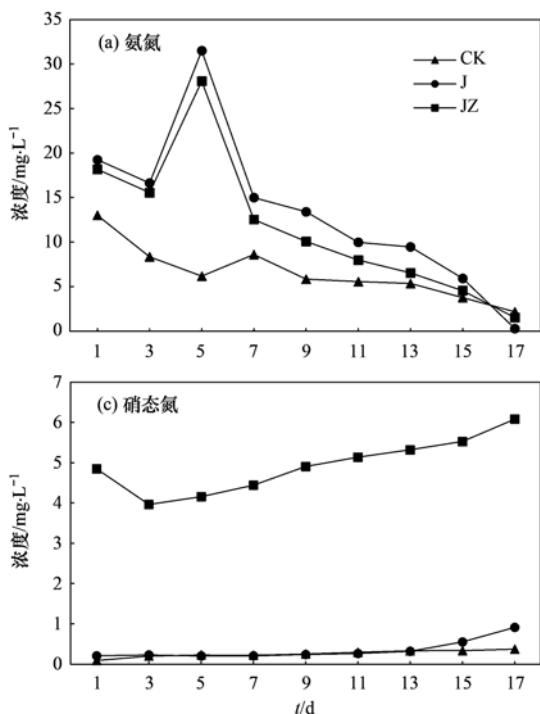


图5 城市尾水中氮代谢分析  
Fig. 5 Analysis of nitrogen metabolism in urban tail water

通过图5(a)可以看出,J组和JZ组对氨氮去除趋势比较相似,前3 d阶段的氨氮含量开始降低,第5~7 d两组实验中氨氮浓度出现短暂上升,之后的反应阶段呈平缓下滑趋势,氨氮逐渐降解,第17 d时,J组中尾水的氨氮降解达到99%,JZ组菌群对尾水中氨氮的去除也达到了95%,JZ组中的微球藻的加入提高了氨氮去除率。J组前11 d亚硝态氮含量一直保持较低水平[图5(b)],第11 d后亚硝态氮浓度不断升高,主要由于亚硝态氮是氮代谢反应中的中间产物,在反应过程中,当溶解氧的供应不足,亚硝态氮含量会出现累积现象。JZ组水样中的亚硝态氮含量在反应的第1~3 d期间发生含量短暂升高现象,此后其在水样中含量逐渐下降,第17 d时,亚硝态氮去除率达到53.7%,JZ组中硝态氮含量在反应的整个过程中较高,在第3 d后硝态氮含量一直保持持续升高的趋势[图5(c)]。在反应第3 d之后J组水样中硝态氮变化不明显,在反应后期硝态氮含量有略微上升趋势。JZ组系统中总氮的含量在开始阶段不太稳定,第5 d后开始缓慢稳定地下降[图5(d)],J组中总氮的含量在反应的第13 d

之后变化幅度较小趋于平衡,由图5比较看出,J组系统总氮去除效果优于JZ组。

### 2.3.2 COD降解效果分析

J组和JZ组系统中氮代谢菌群对COD含量影响较小,JZ组对水样中的去除率为22.8%(图6)。

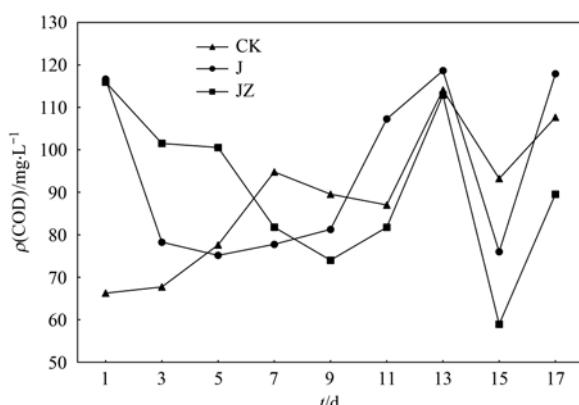


图6 城市尾水中COD浓度变化分析  
Fig. 6 Analysis of COD concentration change in urban tail water

以上结果表明,微球藻和脱氮菌群共代谢作用下提高了脱氮效果,尤其对系统中氨氮和硝态氮含量去除率较高,表明微球藻促进了氨化和硝化反应

作用。

## 2.4 合成脱氮菌剂和菌藻协同系统群落分析

### 2.4.1 $\alpha$ 多样性分析

表 2 为 J 组和 JZ 组样本的  $\alpha$  多样性指数, Sobs 指数表示实际观察到的 OTU 数目的指标, 2 个样本的 OTU 数目分别为 221 和 253, Coverage 指数为各样品文库的覆盖率, 其数值越高, 样本中序列没有被

测出的概率就越低, 2 个样本的覆盖率为 99.9% 以上, 表明测序结果可以表达样本的真实情况。JZ 组物种丰富度高于 J 组, J 组物种多样性略高于 JZ 组。测序结果反映的样本多样性和 2 种复合氮代谢体系的构建成分多样性表达一致, 表明构建的氮代谢体系在反应过程中的成分在种类和数目上的顺序没有发生改变, 所选菌株之间的拮抗作用概率较小。

表 2  $\alpha$  多样性指数

Table 2 The  $\alpha$  diversity index

组别	Ace 指数	Chao1 指数	Coverage 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Sobs 指数
J	232.340 695	228.916 667	0.999 513	3.079 056	0.144 118	221
JZ	265.411 216	265.650 000	0.999 476	3.054 135	0.123 779	253

### 2.4.2 物种组成分析

J 组和 JZ 组物种组成如图 7 所示, 2 个样本共有的 OTU 数目为 161 个, J 组和 JZ 组独有的 OTU 数目分别为 60 和 92, 表明 JZ 组体系中由于微球藻的加入, 其微生物系统组成和 J 组发生了明显的变化。在 J 组和 JZ 组中共有 OTU 分别占到所有 OTU 丰度的 72.9% 和 63.6%。

### 2.4.3 群落组成分析

群落组成分析是使用统计学的分析方法, 观测样本在不同分类水平上的群落结构。分析检测结果如图 8 所示。在门水平上, 对 J 组和 JZ 组群落组成进行比较, 2 组中优势微生物种类和比例存在较大差异, J 组丰度主要的优势菌群和占比分别为: 厚壁菌门 (Firmicutes) 44.53%、变形菌门 (Proteobacteria) 43.41%、放线菌门 (Actinobacteriata) 5.37%、类杆菌门 (Bacteroidota) 3.04% 和绿弯菌门 (Chloroflexi) 1.35%; JZ 组主要的优势菌群和占比分别为: 蓝藻门 (Cyanobacteria) 33.89%、绿弯菌门 (Chloroflexi) 25.34%、变形菌门 (Proteobacteria) 19.38%、厚壁菌门 (Firmicutes) 10.02% 和酸杆菌门 (Acidobacteria) 4.20%。

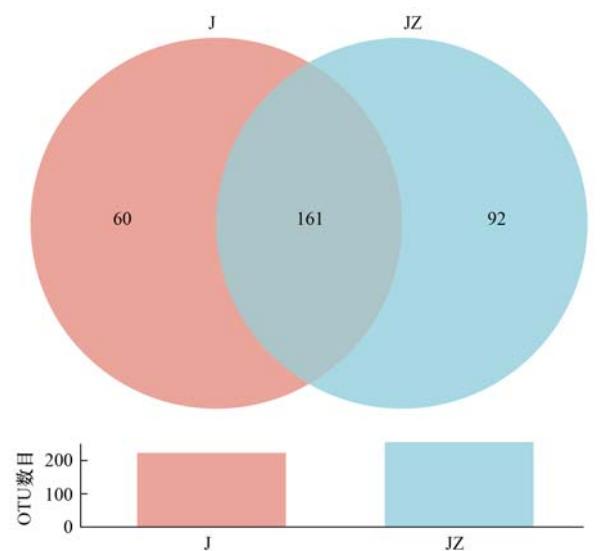


图 7 物种多样性分析

Fig. 7 Diversity analysis of species

在属水平上, 不同合成菌剂中的优势微生物种类和比例不太相同, 如图 9 所示。

J 组和 JZ 组在属水平上, J 组主要优势菌及占比分别为: 微小杆菌属 (*Exiguobacterium*) 35.34%、*Bauldia* 9.69%、钩杆菌属 (*Ancyllobacter*) 7.69% 和芽

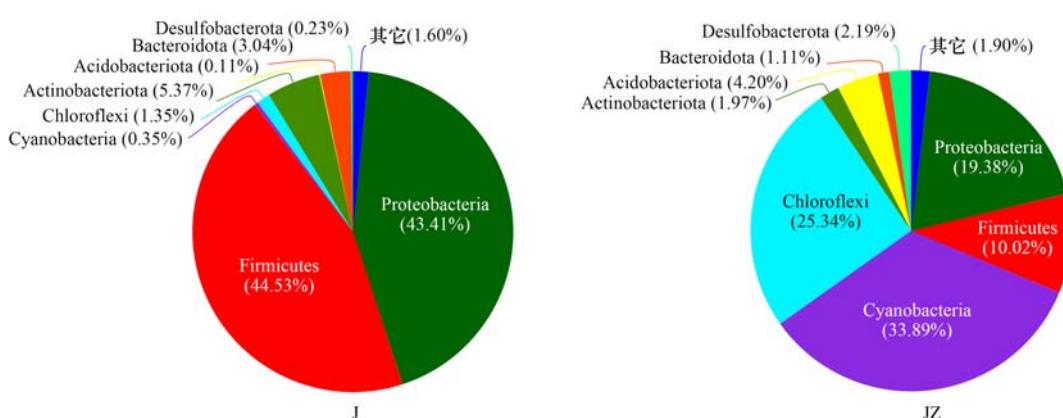


图 8 样品门水平分析

Fig. 8 Phylum level analysis in different samples

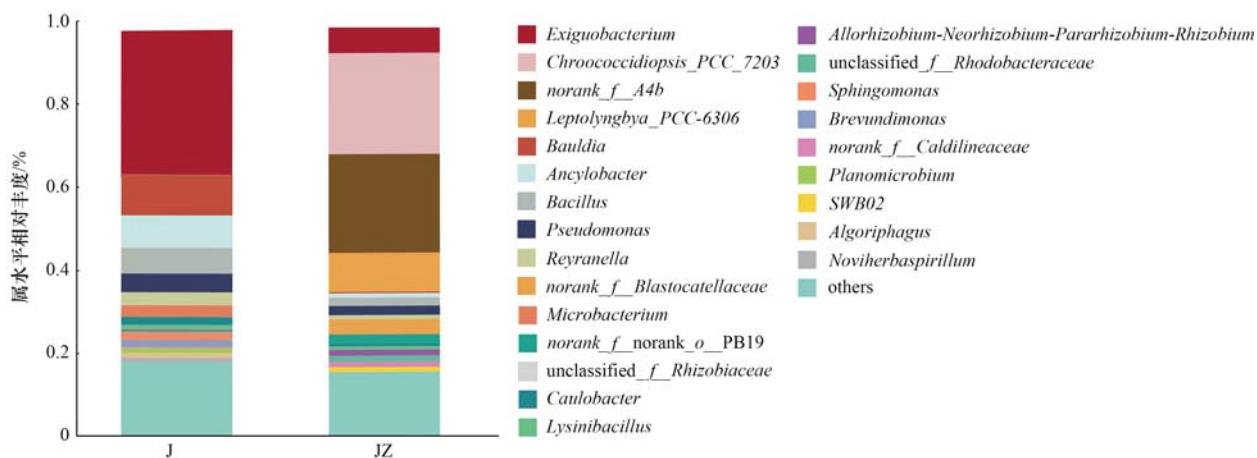


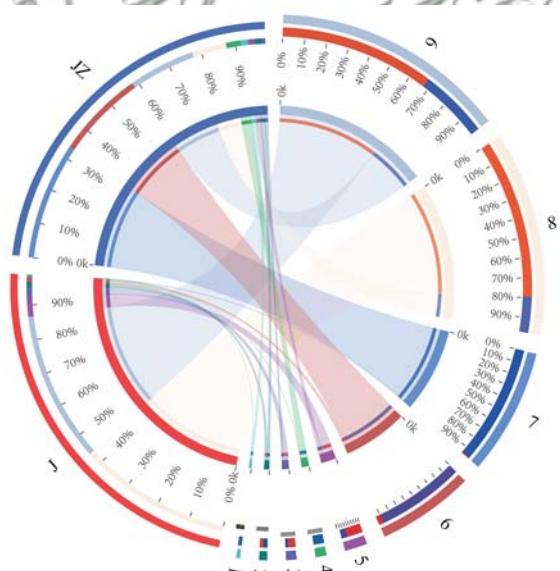
图9 样品属水平分析

Fig. 9 Genus level analysis in different samples

孢杆菌属 (*Bacillus*) 6.21%；JZ 组中主要优势菌和占比分别为：*Chroococcidiopsis\_PCC\_7203* 占 24.38.34%，*norank\_f\_A4b* 占 23.65%，*Leptolyngbya\_PCC-6306* 占 9.41%，微小杆菌属 (*Exiguobacterium*) 7.09%。

#### 2.4.4 样本和物种关系分析

各优势物种在不同样本中分布比如图 10 所示。



1. Desulfobacterota, 2. others, 3. Bacteroidota, 4. Acidobacteriota,  
5. Actinobacteriota, 6. Chloroflexi, 7. Cyanobacteria,  
8. Firmicutes, 9. Proteobacteria

图10 优势菌占比

Fig. 10 Proportion of dominant bacteria

在 J 组和 JZ 组中优势菌所占比例发生了明显不同。在 J 组和 JZ 组中优势菌和占比分别为：厚壁菌门 (Firmicutes) 82% 和 18%、变形菌门 (Proteobacteria) 69% 和 31%、蓝藻门 (Cyanobacteria) 1% 和 99%、绿弯菌门 (Chloroflexi) 5.1% 和 95%、放线菌门 (Actinobacteriota) 73% 和

27% (图 10)。

#### 3 讨论

从图 1 可知，在 J 组和 JZ 组系统中，JZ 组对人工模拟污水中氨氮的去除效果达到最佳，可降解水样中 85.5% 的氨氮。由于在反应系统里，微球藻发生光合作用产生 O<sub>2</sub> 为好氧型微生物提供溶解氧，使得其正常发挥去除氨氮的性能，好氧微生物也会为微球藻提供 CO<sub>2</sub> 保证了微球藻光合作用的持续反应<sup>[26]</sup>。从图 3(b) 可知，JZ 氮共代谢系统需要一定时间构成共代谢群落才能发挥作用，JZ 组系统对人工配水中的亚硝态氮去除效果最佳，可以达到 99% 以上，反应结束时水样中几乎不含亚硝态氮指标，但反应中存在阶段性亚硝态氮含量较高现象。表明微球藻和氮代谢菌群协同作用下可有效去除水中亚硝态氮含量<sup>[27]</sup>。从图 3(d) 可知，J 组总氮降解效果较好，JZ 组总氮降解效果高于 J 组，表明微球藻的加入降低了氮代谢系统总氮的去除率，原因主要是尾水中碳氮比较低导致 TN 处理效果发生变化，同时水中的一些氮在生物体上累积，后来又释放出来，导致水中总氮的含量出现短期上升。刘乐然<sup>[28]</sup>利用藻菌共生系统去除低 C/N 城市污水二级出水中的 TN，有研究表明 C/N 过低而使 TN 有小幅度升高现象。从图 5 可知，微球藻和氮代谢菌群协同作用对氨氮去除率达到较好效果，JZ 组中菌剂对实验尾水中氨氮的去除率达到 95%，氮代谢菌群中加入微球藻，可提高水中亚硝态氮的去除效果，表明微球藻在氮循环反应氨化和硝化反应阶段发挥一定促进作用，主要由于藻类的光合作用以及氮代谢菌群中硝化细菌的硝化作用可以对水中含氮化合物进行快速吸收，可以实现对氨氮的去除。

从图 7 和图 8 可知，JZ 组体系中由于微球藻的

加入,不同细菌 OTU 间的相对丰度和优势菌占比在门水平上发生了明显的变化,在 JZ 组中蓝藻门成为主要优势菌,占比达到 33.89%,其次是同样具有可进行光合作用的绿弯菌门,占比也从 J 组占比的 1.35% 提高到 25.34%,厚壁菌门和变形菌门占比明显小于 J 组,分别从 J 组占比为 44.53% 和 43.41% 最优势 2 种菌群,变为占比分别 10.02% 和 19.38% 的第 3 和第 4 菌群,表明 J 组氮代谢菌群中的细菌 OTU 相对丰度的变化和微球藻的加入存在关联,高丰度的微球藻影响了氮代谢菌群中群落结构发生改变,菌藻之间以互利共生或者竞争抑制的方式紧密联系在一起<sup>[29]</sup>。随着微球藻加入和生长氮代谢菌群构成随之发生变化,以适应优势藻类的转变,和微球藻构成新的菌藻氮代谢体系。有研究者得出相似结果,随着水体中蓝藻藻细胞数量的增加,藻细胞对周围细菌菌群的抑制作用也随之增强,当藻细胞数量达到生长高峰期时,藻细胞的抑制作用达到最强,同时细菌菌群对于蓝藻的抑制作用也会做出不同程度的响应,菌藻之间的相互抑制作用呈现出复杂的动态变化过程<sup>[30]</sup>。本研究可以用于人工湿地深度处理城市尾水,为保护地表水环境提供数据支持。

#### 4 结论

(1) 藻菌共代谢体系处理人工模拟污水和城市尾水,以 2% 的量投加氮代谢复合菌群和菌藻,可以获得更好的总氮去除效果,该系统对氨氮的去除效果尤其显著。

(2) 在 pH 6.5 ~ 7.5, 温度 34 ~ 35℃ 条件下,菌组氮代谢菌群中随着微球藻加入和生长,菌藻组氮代谢菌群构成随之发生变化,以适应优势藻类形成的环境,和微球藻构成新的菌藻氮代谢体系。

(3) 在尾水深度处理过程中,菌藻体系中菌藻之间存在相互抑制作用,蓝藻会成为优势菌群,氮代谢菌群系统中部分优势菌群会在蓝藻门细菌影响下失去优势菌功能。

#### 参考文献:

- [1] 汪全龙. 生态浮床与生物膜耦合处理城市尾水工艺研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
- [2] Xu Q, Wan Y L, Wu Q X, et al. An efficient hydrodynamic-biokinetic model for the optimization of operational strategy applied in a full-scale oxidation ditch by CFD integrated with ASM2 [J]. Water Research, 2021, **193**, doi: 10.1016/J.WATRES.2021.116888.
- [3] 王森, 李亚峰, 雷坤, 等. 不同氮污染特征河流 N<sub>2</sub>O 浓度、释放通量与排放系数 [J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5400-5409.
- Wang M, Li Y F, Lei K, et al. Concentration, flux, and emission factor of N<sub>2</sub>O in rivers with different nitrogen pollution features [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5400-5409.
- [4] 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 等. 基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估 [J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4555-4563.
- Feng A P, Wang X L, Xu Y, et al. Assessment of potential risk of diffuse pollution in haihe river basin based using DPeRS model [J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4555-4563.
- [5] 苗小丽. 微藻的分离筛选及色素和多糖提取条件研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- [6] Park J, Jin H F, Lim B R, et al. Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green alga *Scenedesmus* sp. [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(22): 8649-8657.
- [7] 韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 等. 基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 [J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3347-3353.
- Han S F, Jin W B, Tu R J, et al. Selection of microalgae for biofuel using municipal wastewater as a resource [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3347-3353.
- [8] 马航, 李之鹏, 柳峰, 等. 微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 [J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1865-1870.
- Ma H, Li Z P, Liu F, et al. Pollutant removal performance and membrane fouling characteristics in marine aquaculture wastewater treatment by a microalgae membrane Reactor [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1865-1870.
- [9] 胡洪营, 李鑫, 杨佳. 基于微藻细胞培养的水质深度净化与高价值生物质生产耦合技术 [J]. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 1122-1127.
- Hu H Y, Li X, Yang J. Coupling of wastewater deep purification and high quality biomass production based on microalgae cultivation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(3): 1122-1127.
- [10] Ye J F, Liang J Y, Wang L, et al. The mechanism of enhanced wastewater nitrogen removal by photo-sequencing batch reactors based on comprehensive analysis of system dynamics within a cycle [J]. Bioresource Technology, 2018, **260**: 256-263.
- [11] Kaushik M S, Srivastava M, Singh A, et al. NtcA transcriptional factor: a global nitrogen regulator and connecting link between nitrogen metabolism and other crucial metabolisms [A]. In: Singh S S (Ed.). Plants and Microbes in an Ever-Changing Environment [M]. New York: Nova Science Pub Inc, 2017.
- [12] 张晓青, 司晓光, 成玉, 等. 三种微藻对城市二级出水脱氮除磷作用的研究 [J]. 生态科学, 2021, **40**(6): 140-145.
- Zhang X Q, Si X G, Cheng Y, et al. Study on the effects of nitrogen and phosphorus removal from municipal secondary effluent by three microalgae [J]. Ecological Science, 2021, **40**(6): 140-145.
- [13] 王荣昌, 程霞, 曾旭. 污水处理中菌藻共生系统去除污染物机理及其应用进展 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(1): 13-22.
- Wang R C, Cheng X, Zeng X. Mechanisms and applications of bacterial-algal symbiotic systems for pollutant removal from wastewater [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(1): 13-22.
- [14] Amin S A, Parker M S, Armbrust E V. Interactions between diatoms and bacteria [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2012, **76**(3): 667-684.
- [15] Amin S A, Green D H, Hart M C, et al. Photolysis of iron-siderophore chelates promotes bacterial-algal mutualism [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(40): 17071-17076.

- [16] Ramanan R, Kim B H, Cho D H, et al. Algae-bacteria interactions: evolution, ecology and emerging applications [J]. *Biotechnology Advances*, 2016, **34**(1): 14-29.
- [17] Whitton B A, Potts M. The ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space [M]. Netherlands: Springer, 2002.
- [18] 张灿灿, 庞会从, 高太忠, 等. 河北平原潮土中微生物对氮降解特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4830-4840.
- Zhang C C, Pang H C, Gao T Z, et al. Characteristics of microbial nitrogen degradation in fluvo-aquic soil of Hebei plain [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4830-4840.
- [19] 娄宏伟, 雷鑫, 陈元彩. 生物脱氮的研究进展 [J]. *工业水处理*, 2019, **39**(5): 1-4.
- Lou H W, Lei X, Chen Y C. Research progress in biological nitrogen removal [J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, **39**(5): 1-4.
- [20] Cui P, Liao H P, Bai Y D, et al. Hyperthermophilic composting reduces nitrogen loss via inhibiting ammonifiers and enhancing nitrogenous humic substance formation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **692**: 98-106.
- [21] 赵志瑞, 刘硕, 李铎, 等. 脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 304-312.
- Zhao Z R, Liu S, Li D, et al. Characteristics of nitrogen metabolism by denitrifying bacterial agents in low dissolved oxygen black odor water [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 304-312.
- [22] Xu N, Tan G C, Wang H Y, et al. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, **74**: 1-8.
- [23] 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 等. 补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3272-3280.
- Zhao Z R, Wu H Q, Bi Y F, et al. Effects of water supply quality and social activity on the microbial community in Baiyangdian wetland [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3272-3280.
- [24] Layer M, Villores M G, Hernandez A, et al. limited simultaneous nitrification-denitrification ( SND ) in aerobic granular sludge systems treating municipal wastewater: mechanisms and practical implications [J]. *Water Research X*, 2020, **7**, doi: 10.1016/j.wroa.2020.100048.
- [25] 仪超. 以生活污水为底物的产油微藻筛选与培养条件优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [26] Ji X Y, Li H M, Zhang J B, et al. The collaborative effect of *Chlorella vulgaris-Bacillus licheniformis* consortia on the treatment of municipal water [J]. *Journal of hazardous materials*, 2019, **365**: 483-493.
- [27] 孙珮铭, 邱萌萌, 吴玉斌, 等. 小球藻与硝化细菌对食品厂污水中氨氮和总氮的去除研究 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2021, **40**(1): 43-49.
- Sun P M, Qiu M M, Wu Y B, et al. Studies on removal of ammonia nitrogen and total nitrogen from food factory sewage by chlorella and nitrifying bacteria [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology ( Natural Science )*, 2021, **40**(1): 43-49.
- [28] 刘乐然. 藻菌共生系统深度处理二级出水的条件优化研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- [29] Bell W H, Sakshaug E. Bacterial utilization of algal extracellular products. 2. A kinetic study of natural populations [J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, **25**(6): 1021-1033.
- [30] Häder D P. The molecular biology of cyanobacteria. edited by donald a. bryant [J]. *Plant Ecology*, 1997, **133**(2): 236-238.

### CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM <sub>2.5</sub> in Beijing from 2018 to 2020 .....	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, et al. (2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter .....	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, et al. (2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control .....	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, et al. (2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM <sub>2.5</sub> in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment .....	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, et al. (2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau .....	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, et al. (2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer .....	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, et al. (2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City .....	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, et al. (2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island .....	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, et al. (2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin .....	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, et al. (2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020 .....	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, et al. (2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020 .....	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, et al. (2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season .....	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, et al. (2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia .....	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, et al. (2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes .....	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, et al. (2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, et al. (2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Xue, ZHU Bo (2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County .....	LIU Hai, ZHAO Guo-hong (2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network .....	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, et al. (2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province .....	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LU Lin, et al. (2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment .....	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei (2613)
Removal of Cr(Ⅵ) via a Nickel Ferrite@Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism .....	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, et al. (2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst .....	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, et al. (2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms .....	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, et al. (2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite .....	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, et al. (2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water .....	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, et al. (2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition .....	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei (2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China .....	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, et al. (2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China .....	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, et al. (2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains .....	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, et al. (2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland .....	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, et al. (2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay .....	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, et al. (2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China .....	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, et al. (2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau .....	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, et al. (2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation .....	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, et al. (2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases .....	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, et al. (2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China .....	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin (2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector .....	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, et al. (2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province .....	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, et al. (2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production .....	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, et al. (2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale .....	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, et al. (2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area .....	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, et al. (2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China .....	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, et al. (2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province .....	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, et al. (2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi .....	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, et al. (2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings .....	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, et al. (2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice .....	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, et al. (2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong .....	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, et al. (2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai .....	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, et al. (2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community .....	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, et al. (2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields .....	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, et al. (2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities .....	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, et al. (2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community .....	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, et al. (2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System .....	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, et al. (2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale .....	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, et al. (2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data .....	FANG Qi, LI Shao-ping (2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China .....	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, et al. (2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019 .....	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, et al. (3003)