

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献 赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)

基于卫星和地面监测的河西走廊 O₃ 浓度时空分布及潜在源区分析 李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)

海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)

华东地区对流层 O₃ 和前体物 HCHO 及 NO₂ 的时空特征 王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)

2006 ~ 2020 年广东省大气甲醛排放演变特征 明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)

淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力 黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)

西安市城市降尘和土壤尘 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中碳组分特征 沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)

长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应 高爽, 遆超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)

黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系 裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)

古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)

华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价 陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)

湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险 张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)

太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析 王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)

白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献 李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)

白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)

雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应 李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)

鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析 于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)

不同臭臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群 张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)

反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响 李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)

密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响 辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茵, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 宋舒兴, 张俊亚 (4985)

城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制 赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)

高效异养硝化-好氧反硝化菌 *Glutamicibacter* sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制 魏渤惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)

大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制 岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)

不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响 贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)

淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估 张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)

黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估 耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)

固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估 马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖影云, 海金涛, 王欢 (5055)

鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征 赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)

聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响 陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)

聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响 郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)

聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响 赵肖琼, 张恒慧, 赵润柱, 张新梅 (5092)

离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算 张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 徐莉萍, 李永涛 (5102)

土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响 徐文彬, 饶良懿 (5114)

有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析 刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)

平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响 张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)

稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素 罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)

周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响 鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)

华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子 赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)

高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响 聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)

基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性 唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)

不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响 周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)

纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响 王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如茵, 孟庆尧 (5204)

不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性 刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)

CuFeO₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性 刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)

基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应 陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)

基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估 郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)

基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估 赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)

重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)

安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析 贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)

湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估 杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)

不同含量外源镉在土壤中的变化特征 周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)

CO₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析 张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)

综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例 陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)

《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)

城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制

赵志瑞¹, 马超^{1,2}, 颜嘉晨³, 李书缘^{1,2}, 李晴¹, 胡紫如¹, 呼庆^{2,4}, 刘硕^{1*}, 万敬敏^{1*}

(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, 石家庄 050031; 2. 中国科学院雄安创新研究院, 雄安 071899; 3. 广州大学大湾区环境研究院, 珠江三角洲水质安全与保护教育部重点实验室, 广州 510006; 4. 澳大利亚联邦科学与工业组织, 肯辛顿 6151)

摘要: 为了对城市尾水深度脱氮, 提高地表水体质量, 分别利用微藻(Z)、芽孢杆菌(Y)和微藻芽孢杆菌(ZY)对城市尾水进行脱氮处理与氮代谢菌群特征研究, 结果表明, Z和ZY对城市尾水中氨氮的去除效果较好, 2组降解率都达到了95%以上。Z对亚硝态氮去除效果最好, 芽孢杆菌与微藻的共同作用在氮循环反应中亚硝态氮转化为硝态氮过程发挥出了较为强大的稳定效果。芽孢杆菌可以有效去除硝态氮, 并可以提高微藻对硝态氮的去除效率。ZY菌对城市尾水中硝态氮的去除效果最好, 其降解率高达99%以上, 几乎完全去除城市尾水中的硝态氮。在Z中样本数占比较高的菌群分别为 *Chroococcidiopsis_PCC_7203* (24.38%)、*uncultured_bacterium-g_norank_f_A4b* (23.65%)、*Exiguobacteriu* (7.09%)、*Leptolyngbya_PCC-6306* (9.41%) 和 *Bacillus* (1.99%)。在ZY中样本数占比较高的菌群分别为 *Brevibacillus* (22.94%)、*Clostridium* (8.78%) 和 *Bacillus* (4.88%), *Chroococcidiopsis_PCC_7203* 样本数占比仅为7.84%, 远远低于Z样本数所占比例。微藻可以很好去除系统中氨氮, 芽孢杆菌与微藻联用具有较好的氨氮和硝态氮去除效果, 芽孢杆菌具有抑制微藻过度增长作用, 防止水体富营养化和黑臭发生。研究可为城市尾水深度处理, 防止地表水体富营养化提供数据支持。

关键词: 城市尾水; 脱氮; 芽孢杆菌; 微藻; 抑藻

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4996-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202208269

Action Mechanism of *Bacillus* on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater

ZHAO Zhi-ru¹, MA Chao^{1,2}, YAN Jia-chen³, LI Shu-yuan^{1,2}, LI Qing¹, HU Zi-ru¹, HU Qing^{2,4}, LIU Shuo^{1*}, WAN Jing-min^{1*}

(1. Hebei Province Key Laboratory of Sustainable Use and Development of Water Resources, College of Water Resources and Environment, Hebei Geo University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Xiong'an Innovation Institute, Chinese Academy of Sciences, Xiong'an 071899, China; 3. Key Laboratory for Water Quality and Conservation of the Pearl River Delta, Ministry of Education, Institute of Environmental Research at Greater Bay Area, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 4. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Kensington 6151, Australia)

Abstract: To improve deep denitrification of black and odorous water and improve the quality of surface water, we studied the characteristics of nitrogen metabolism and denitrification of urban tailwater by microalgae (Z), *Bacillus* (Y), and *Bacillus* microalgae (ZY). The results showed that there was a good removal effect of ammonia nitrogen of group Z and group ZY in urban tailwater. The degradation rate of both groups reached 95%. The best effect on the removal of nitrite nitrogen was of group Z in urban tailwater. The combined action of *Bacillus* and Micrococcus played a relatively strong and stable effect on the conversion of nitrite nitrogen to nitrate nitrogen in the nitrogen cycle reaction. *Bacillus* could effectively remove nitrate nitrogen and improve the removal efficiency of nitrate nitrogen by microalgae. Best removal effect of nitrate nitrogen was observed in group ZY in urban tailwater, with a degradation rate as high as 99%, in which the nitrate nitrogen was removed almost completely. The *Bacteria* with high proportions in Z were *Chroococcidiopsis_PCC_7203* (24.38%), *uncultured_bacterium-g_norank_f_A4b* (23.65%), *Exiguobacteriu* (7.09%), *Leptolyngbya_PCC-6306* (9.41%), and *Bacillus* (1.99%). The *bacteria* with high proportions in ZY were *Brevibacillus* (22.94%), *Clostridium* (8.78%), and *Bacillus* (4.88%), and the proportion of *Chroococcidiopsis_PCC_7203* was only 7.84% in ZY, which was considerably lower than that in Z samples. The conclusions were as follows: microalgae could effectively remove ammonia nitrogen in the system. *Bacillus* and microalgae had very good removal effect of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen. During the nitrogen removal of black and odorous water by algae, the *Bacillus* inhibited the excessive growth of microalgae and prevented eutrophication and black odor in water. This study can provide data support for the deep treatment of urban tail water and prevention of surface water eutrophication.

Key words: urban tailwater; denitrification; *Bacillus*; microalgae; algae suppression

我国的北方干旱少雨, 多数地表河流补水主要以城市尾水为主^[1]。尾水中氮类指标的含量较高, 常会引起地表水体富营养化甚至黑臭现象^[2]。微藻是光合利用度高的初级生产者, 可以利用空气中的CO₂为碳源进行光合作用, 在生长过程中吸收污水中的氮磷等物质来合成自身所需物质^[3]。微藻处理废水技术被认为是经济实用, 有发展潜力的城市尾水深度处理技术^[4]。Shi等^[5]研究发现小球藻(*Chlorella vulgaris*)去除污水中无机N的效率达

86%。有研究利用微藻在光生物反应器中进行尾水处理, 培养14 d后发现, 硝酸盐的去除率最高可达79.63%^[6], 微藻具有对氨氮(NH₄⁺)、亚硝态氮

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2022-11-14

基金项目: 中央引导地方科技发展项目(236Z4202G); 河北省引进国外智力项目(22205018); 国家自然科学基金项目(U21A2023); 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: zhiruzh@163.com

* 通信作者, E-mail: 1511404679@qq.com; wan-jm1980@163.com

(NO_2^-) 和硝态氮 (NO_3^-) 还有总氮 (TN) 的去除功能^[7]. 但是藻类过量繁殖, 并形成聚集体, 漂浮在水面, 降低水体透明度, 使深层水生植物光合作用受到限制, 导致水中溶解氧来源减少^[8].

常用的物理除藻方法有直接打捞、过滤除藻、气浮除藻和超声除藻等, 这类方法见效快, 除藻过程中不易产生二次污染, 可此类方法工作量大, 成本高, 仅适用于藻浓度较高的小片水域作为应急手段^[9]. 化学控藻通过向水中投加矿物质或化学药品来沉淀、抑制或杀死藻细胞, 这些化学方法简便易行, 效果显著^[10], 但容易产生二次污染. 生物控藻是通过合理调节水生食物链, 利用竞争、捕食关系和生物间的相互作用来降低水华生物密度, 从而防止水华的发生或消除水华^[11]. 微生物是一切食物链的组成成分, 在水华水体中与有害藻类的存亡密切相关. 有些微生物既能够分解有机物, 为藻类的生长提供物质基础, 又可以抑制藻类的生长, 溶解和杀死藻细胞^[12]. 芽孢杆菌是能形成芽孢的杆菌, 在多种介质中有能有效抵抗或消除某些有害因子的功能^[13]. 芽孢杆菌还具有一定的生物修复功能, 可以减少水质中的含氮污染物, 有效改善环境与水质^[14]. 枯草芽孢杆菌是一种分布广泛非致病性的革兰氏阳性细菌, 其在水体中可抑制某些有害病原菌的生长与繁殖, 还具有还原硝酸盐等功能, 可作为微生物调节剂^[15]. 芽孢杆菌在水华蓝藻治理上存在巨大潜力, 已经引起广大研究者的关注, 张睿^[16] 研究发现枯草芽孢杆菌对铜绿微囊藻有很

强的抑制作用, 同时能够吸附水体中的重金属等污染物, 净化水质. 芽孢杆菌用于控藻的优越性首先体现“生物安全”, 芽孢杆菌是一种非致命性的益生菌, 并在水产养殖和植物病害防治方面已取得许多成功案例, 其次能够分泌抗菌物质, 短芽孢杆菌能够产生短杆菌肽和几丁质酶等活性物质, 从而拮抗多种细菌和真菌^[17].

在藻菌共生体系中, 微藻可以产生细菌吸收利用的有机质, 然而微藻和细菌之间的关系非常复杂. 本研究通过分析芽孢杆菌和微藻系统微生物菌群特征, 以期为城市尾水及富营养化水体深度脱氮提供数据支持.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验菌株

微藻培养液、芽孢杆菌为实验筛选保存. 芽孢杆菌培养液 (菌活数) $2.21 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, 微藻培养至对数期备用.

1.1.2 实验用水

本文模拟城市尾水进行实验, 模拟尾水指标参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中一级标准的 B 标准配置, 水质指标如表 1 所示. 6 月在某城镇污水处理厂排放口取回 3 t 尾水, 在室外非封闭水桶中放置 2 个月, 尾水出现富营养化现象, 为城市尾水实验用水, 水质指标如表 2 所示.

表 1 模拟尾水水质指标/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Water quality index of simulated tail water/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

水质指标	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	TN	COD	DO	pH(无量纲)
初始值	10.2	0.002	0	12.8	64.2	7.25	6.8

表 2 城市尾水水质指标/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Water quality index of black and odorous water/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

水质指标	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	TN	COD	DO	pH(无量纲)
初始值	13.1	0.01	0.09	14.2	66.3	6.25	6.1

1.2 实验方法

本实验设置微藻组(Z)、芽孢杆菌组(Y)和添加微藻培养液和芽孢杆菌藻芽组(ZY). 水样中 NH_4^+ 指标的测定方法采用《水质 NH_4^+ 的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535-2009) 标准, 实验选用 20 mm 比色皿, 其测定检出限为 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 测定范围为 $0.10 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 本实验纳氏试剂的配制选择的是碘化汞-碘化钾-氢氧化钠溶液^[18]. 水样中 NO_2^- 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, 实验选用 10 mm 比色皿, 最低检出限 $0.003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最高可测定浓度可以高达 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[19]. 水样中 NO_3^- 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, 利用硝酸根离子在 220 nm 波长处的吸收而定量测定硝酸盐氮, 在 275 nm 处做另一次测量, 以校正硝酸盐氮值, 方法最低检出质量浓度为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 测定下限为 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 测定上限为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[20]. 水样中 TN 指标的测定方法采用《水质 TN

的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636-2012)标准,采用紫外分光光度法于波长 220 nm 和 275 nm 处,分别测定吸光度 A_{220} 和 A_{275} ,按公式(1)计算校正吸光度 A ,TN(以 N 计)浓度与校正吸光度 A 成正比^[21].本方法的检出限为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,测定范围为 $0.20 \sim 7.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

$$A = A_{220} - 2A_{275} \quad (1)$$

将微藻培养液与芽孢杆菌培养液等比例以 2%

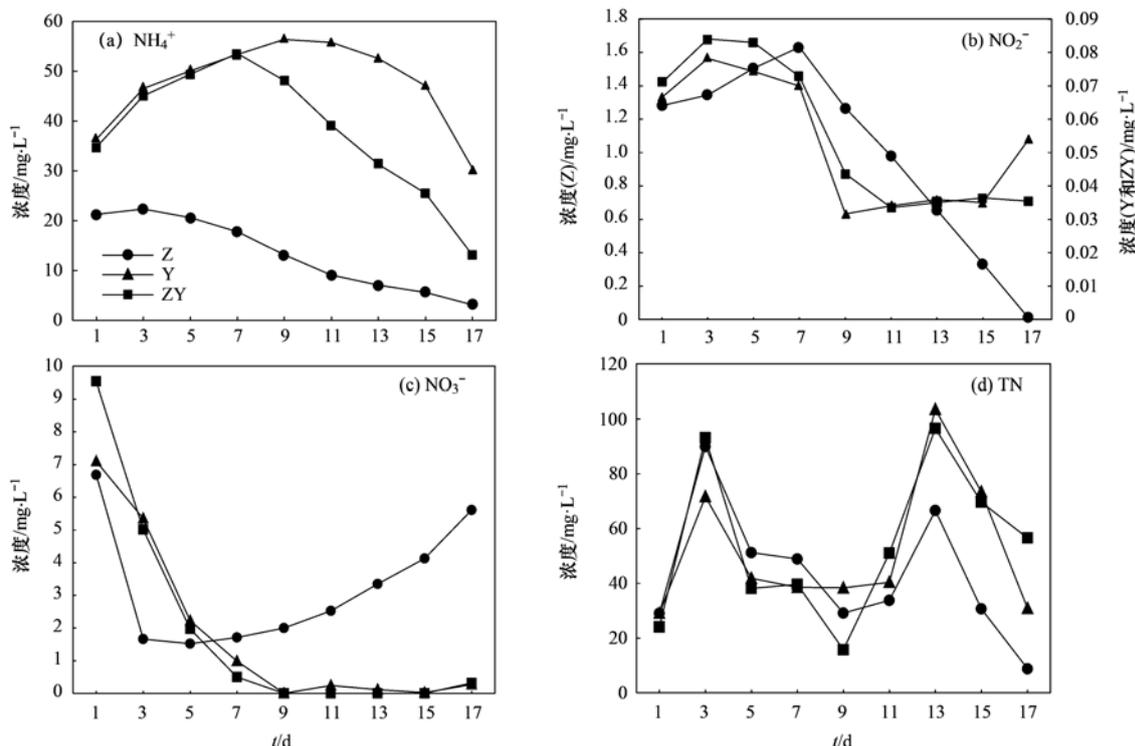


图 1 模拟尾水中氮代谢分析

Fig. 1 Analysis of nitrogen metabolism in simulated tail water

在模拟尾水中,Z中 NH_4^+ 浓度在实验期间持续下降,Y和ZY在模拟尾水中 NH_4^+ 浓度在反应初期升高较快,第7 d开始,ZY中 NH_4^+ 浓度开始下降明显, NH_4^+ 去除率达到 62.3%,第11 d开始Y中 NH_4^+ 浓度开始下降,第17 d时浓度降低较快[图1(a)].由图1(b)可明显看出,Z开始几天 NO_2^- 浓度出现上升随后快速下降去除率达到 99.2%,Y中 NO_2^- 浓度变化较小,去除率仅为 18.9%,ZY和Y变化趋势相同, NO_2^- 去除率为 50.1%[图1(b)].Z中 NO_3^- 浓度开始3 d呈现下降趋势,然后浓度迅速增加,Y和ZY中 NO_3^- 浓度第1~9 d快速降低,后期浓度变化不明显,2组样品中 NO_3^- 降解率均在 96%以上,去除效果较好[图1(c)].图1(d)显示,除Z中TN浓度下降明显外,Y和ZY中TN的去除效果不明显.

2.2 城市尾水中氮代谢分析

Z、Y和ZY在城市尾水中氮的代谢特征如图2

投加量加入实验城市尾水中,由于培养基中含有部分氮素,实验过程中会导致氮素值高于未添加培养液的进水.

2 结果与分析

2.1 模拟尾水中氮代谢分析

Z、Y和ZY在模拟尾水中氮代谢特征如图1所示.

所示.

Y和ZY在反应的前7 d阶段两组中 NH_4^+ 浓度几乎保持一致,3组在前5 d的 NH_4^+ 浓度持续升高,第5 d后浓度快速下降[图2(a)],主要是反应系统中硝化反应或反硝化反应环节缓慢且培养液中含氮底物的分解,使 NH_4^+ 浓度短暂升高,Z、Y和ZY最终降解率分别为 91.6%、71.3%和 97.1%.表明微藻和芽孢杆菌同时加入提高了城市尾水中 NH_4^+ 去除率.由图2(b)可以看出,除Z中 NO_2^- 浓度逐渐降低外,Y和ZY中 NO_2^- 浓度出现上升趋势,表明Y和ZY中芽孢杆菌在 NO_2^- 转化为 NO_3^- 过程中具有一定的抑制作用,使系统中 NO_2^- 浓度出现增加现象.在图2(c)中,Z中 NO_3^- 浓度不断增加,Y和ZY中 NO_3^- 浓度在第1 d迅速降低,在3 d之后,Y和ZY系统中 NO_3^- 浓度较低,变化趋势不明显,Y和ZY最终去除率分别为 80.3%和 99%,降解效果较好.表明芽孢杆菌可以有效去除 NO_3^- ,并可以提高

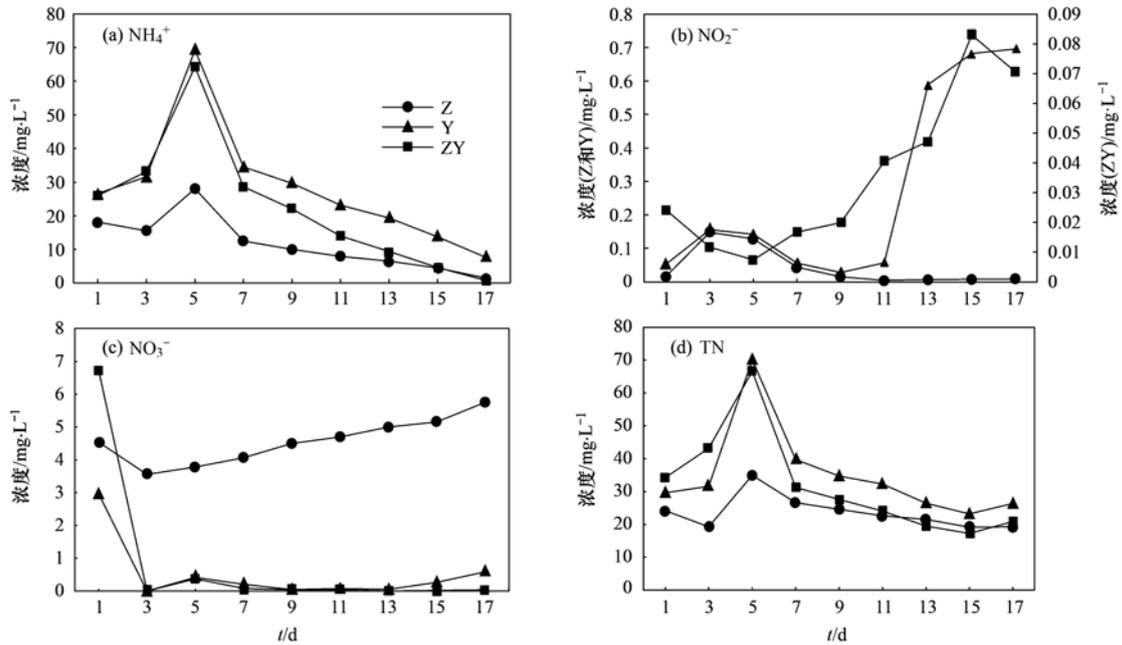


图2 城市尾水中氮代谢分析

Fig. 2 Analysis of nitrogen metabolism in urban tailwater

微藻对 NO_3^- 的去除效率. 图 2(d) 中 Y 和 ZY 在反应的第 3 ~ 7 d TN 浓度显著增加, 原因是开始阶段加入的培养液中含氮有机物分解较快, 同时系统中菌株内部关系没有完全协调. 第 17 d 时, ZY 中 TN 的去除率不到 40%, 系统显示一定的降解效果, 但降解效果一般. Z 中 TN 浓度在反应前期不太稳定, 在反应的第 7 d 之后才开始缓慢稳定地下降, 但反应结束时系统中的 TN 去除率只在 20% 左右, Y 中 TN 去除率较低, ZY 中 TN 去除率高于 Z 和 Y, 表明系统中同时添加微藻和芽孢杆菌可以提供系统中 TN 去除效率.

2.3 菌株高通量测序分析

2.3.1 物种组成分析

稀释曲线 (rarefaction curve) 主要利用各样本在

不同测序深度时的微生物 α 多样性指数构建曲线, 以此反映各样本在不同测序数量时的微生物多样性, 当曲线趋向平坦时, 说明测序数据量合理^[22], 由图 3 (a) 可以看出测序 reads 数合理. OTU (operational taxonomic units) 是在系统发生学中, 为了便于进行分析, 通过聚类, 将序列按照彼此的相似性分归为许多小组, 一个小组就是一个 OTU. 可根据不同的相似度水平, 对所有序列进行 OTU 划分, 通常对 97% 相似水平下的 OTU 进行生物信息统计分析^[16]. Venn 图可用于统计多组或多个样本中所共有和独有的物种 (如 OTU) 数目, 可以比较直观地表现环境样本的物种 (如 OTU) 组成相似性及重叠情况. 通常情况下, 分析时选用相似水平为 97% 的 OTU 样本^[23]. 图 3(b) 中 2 组共有 OTU 数目为 216,

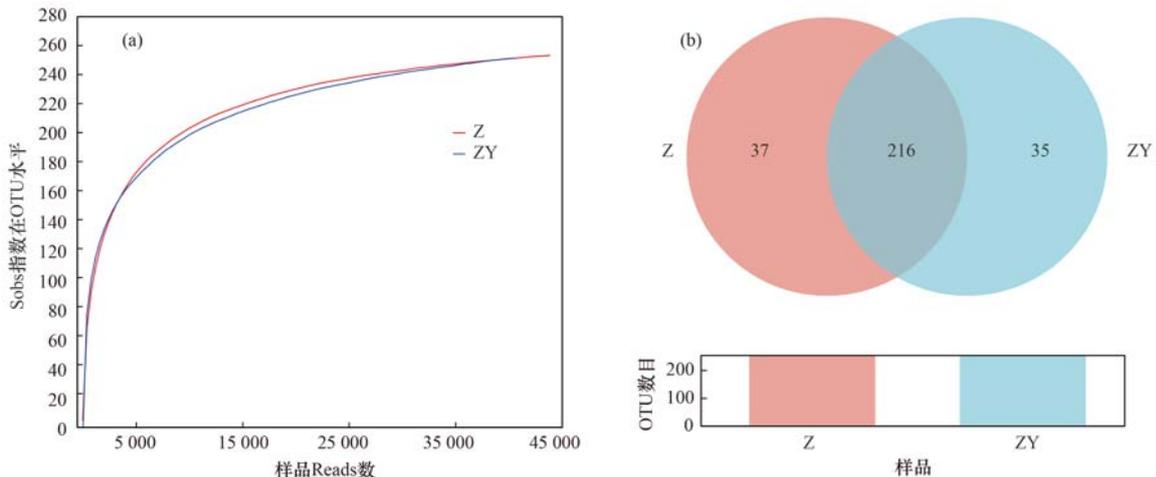


图3 不同样本中细菌 OTU 的稀释曲线和分布

Fig. 3 Rarefaction curves and distribution of bacteria OTU in different samples

Z 和 ZY 中独有的 OTU 数目分别占 14.6% 和 13.9%，结果表明 Z 和 ZY 系统中 OTU 总数与各 OTU 所占比例变化不明显。

2.3.2 属水平群落组成分析

群落组成分析是使用统计学分析方法,检测样本在不同分类水平上的群落组成,2 组属水平群落组成结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,2 组样品物种组成发生了变化,Z 中拟色球蓝细菌 (*Chroococidiopsis*)、*norank_f_A4b*、微小杆菌 (*Exiguobacterium*) 和瘦鞘丝藻属 (*Leptolyngbya*) 所占比例在 ZY 中明显减少,ZY 中短芽孢杆菌 (*Brevibacillus*)、梭状芽孢杆菌 (*Clostridium*) 和芽孢杆菌 (*Bacillus*) 成为样本数占比较高的菌群。图 4 中显示 *Chroococidiopsis* 和 *norank_f_A4b* 这 2 个菌群相似度较高,在 ZY 中减少数量较大,占比分别减少为原来的 29.6% 和 15.6%。*Exiguobacterium* 和 *Leptolyngbya* 处于同一进化分支,表明亲缘关系更加接近,在 ZY 中群落数量减少明显,占比分别为原来的 59.7% 和 16.3%。ZY 中 *Brevibacillus* 和 *Clostridium* 聚类在一起,共同属于芽

孢杆菌属,数量比 Z 中增加明显,分别增加了 1 160 倍和 4 436 倍。同时 ZY 中菌群结构也发生了明显变化,在 Z 中的占比较少的菌群在 ZY 中出现增加趋势,如 *Paracoccus*、*Limnobacter*、*Mycobacterium* 和 *Kapabacteriales* 等。以上结果表明芽孢杆菌的加入明显改变了 Z 中菌群结构,抑制了微藻的生长。

由图 5 看出,在 Z 中样本数占比较高的菌群分别为 *Chroococidiopsis_PCC_7203* (24.38%)、*bacterium-g_norank_f_A4b* (23.65%)、*Exiguobacterium* (7.09%)、*Leptolyngbya_PCC-6306* (9.41%) 和 *Bacillus* (1.99%)。在 ZY 中样本数占比较高的菌群分别为 *Brevibacillus* (22.94%)、*Clostridium_sensu_stricto13* (8.78%) 和 *Bacillus* (4.88%), *Chroococidiopsis_PCC_7203* 样本数占比仅为 7.84%, 远远低于 Z 中样本数占比, *Leptolyngbya* 在 ZY 中样本数占比远远降低。

2.3.3 COG 功能分类统计

同源蛋白簇 (cluster of orthologous groups of protein, COG), 该数据库是对细菌、藻类和真核生物的 21 个完整基因组的编码蛋白根据系统进化关

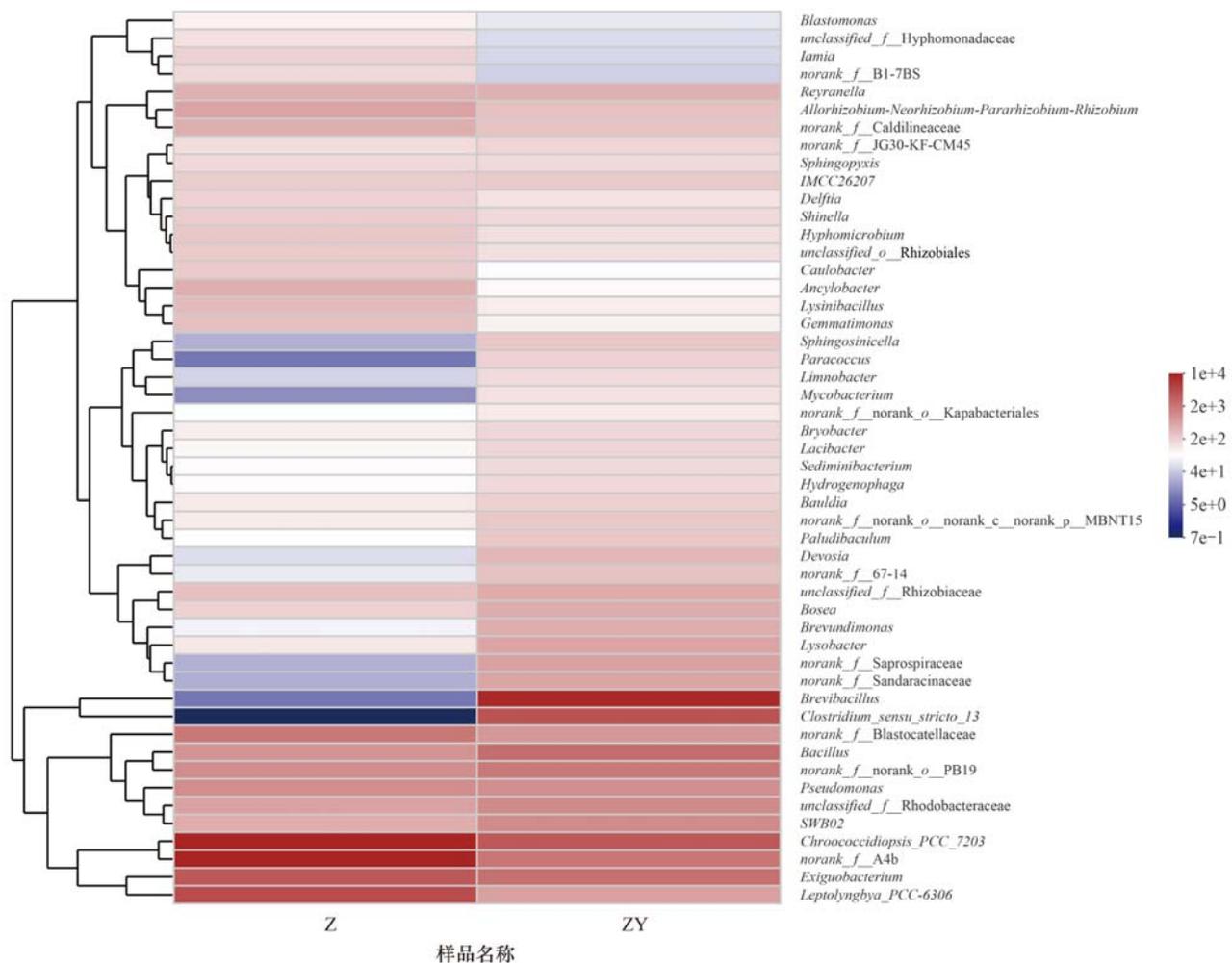
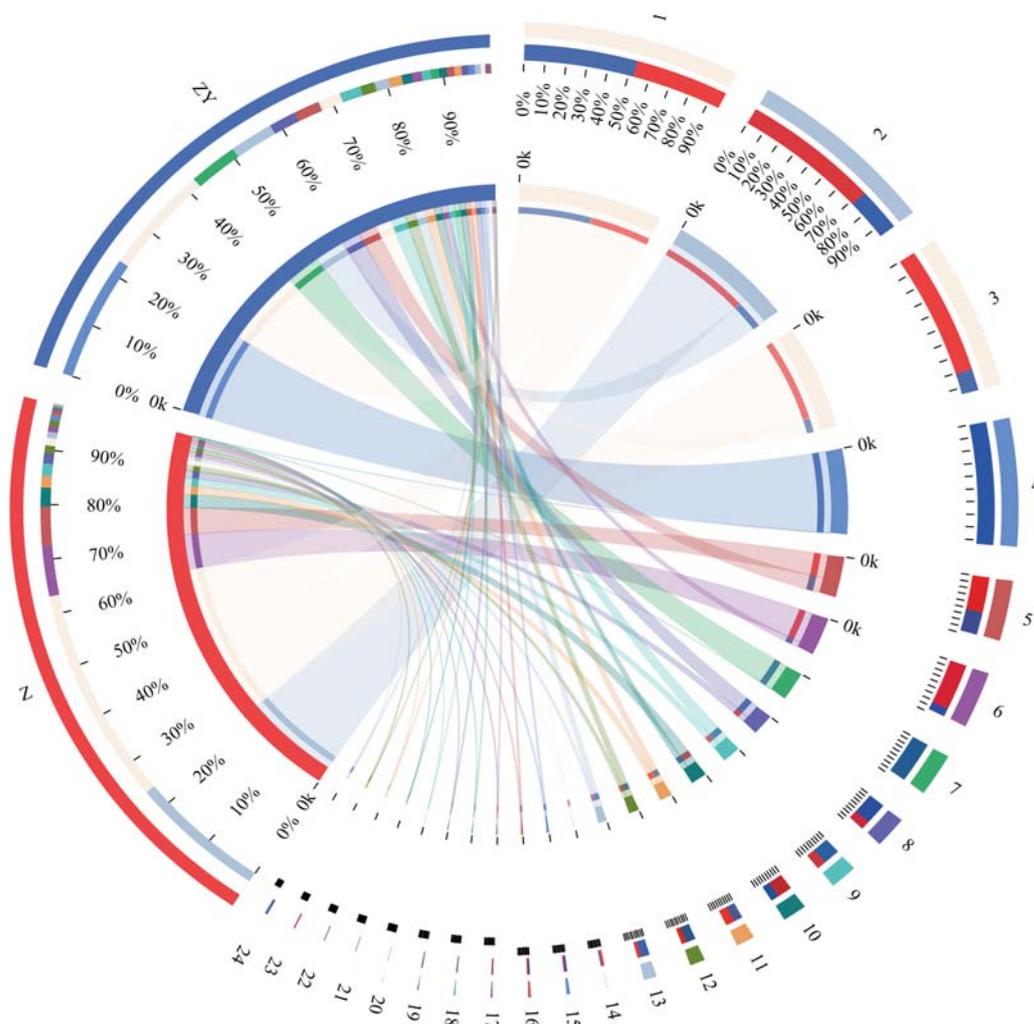


图 4 属水平群落组成

Fig. 4 Community composition at the genus level



1. others, 2. *Chroococcidiopsis_PCC_7203*, 3. *Bacterium-g_norank_f_A4b*, 4. *Brevibacillus*, 5. *Exiguobacterium*, 6. *Leptolyngbya_PCC-6306*, 7. *Clostridium_sensu_stricto13*, 8. *Bacillus_PB19*, 9. *norank_f_Blastocatellaceae*, 10. *Pseudomonas*, 11. *unclassified_f_Rhodobacteraceae*, 12. *SWB02*, 13. *Allorhizobium-Neorhizobium*, 14. *Pararhizobium-Rhizobium*, 15. *Reyranelia*, 16. *unclassified_f_Rhizobiaceae*, 17. *norank_f_Caldilineaceae*, 18. *Lysobacter*, 19. *Bosea*, 20. *norank_f_Saprosiraceae*, 21. *norank_f_Sandaracinaceae*, 22. *Brevundimonas*, 23. *Ancylobacter*, 24. *Devosia*

图5 属水平优势菌比例

Fig. 5 Proportions of dominant bacteria at the genus level

系分类构建而成,蛋白所占的量反映对应环境下代谢特征^[24].Z和ZY中COG功能预测如图6所示.

图6(a)显示了不同功能蛋白在2组样品中的组成比例,从图6(b)可以看出,Z中芽孢杆菌的加入,在ZY中表现出编码蛋白数目发生了变化,其中转录蛋白(transcription,K)和脂质运输和代谢蛋白(lipid transport and metabolism,I)数目下调明显;能源生产和转化(energy production and conversion,C)、辅酶转运和代谢(Coenzyme transport and metabolism,H)、翻译、核糖体结构和生物转化(translation,ribosomal structure and biogenesis,J)、复制、重组和修复(replication,recombination and repair,L)、细胞壁/膜/包膜生物发生(replication,recombination and repair,M)、位置修饰、蛋白质周

转、伴侣(posttranslational modification,protein turnover,chaperones,O)、无机离子转运和代谢(inorganic ion transport and metabolism,P)、一般功能预测(general function prediction only,R)、功能未知(function unknown,S)及信号转导机制(signal transduction mechanisms,T)这些功能蛋白数目上调明显.结果表明在Z中K和I的功能优于ZY,其中C、H、J、L、M、O、P、R、S和T功能优于Z.图6(c)和6(d)显示,2组样品中的前5个最优势功能蛋白的顺序不同,Z和ZY分别为S、R、T、氨基酸运输代谢功能(amino acid transport and metabolism,E)和M蛋白与S、E、R、T和C蛋白,说明芽孢杆菌的加入对菌群代谢差生了影响.以上结果表明,在ZY中E成为较优势功能蛋白,芽孢杆菌影响了菌

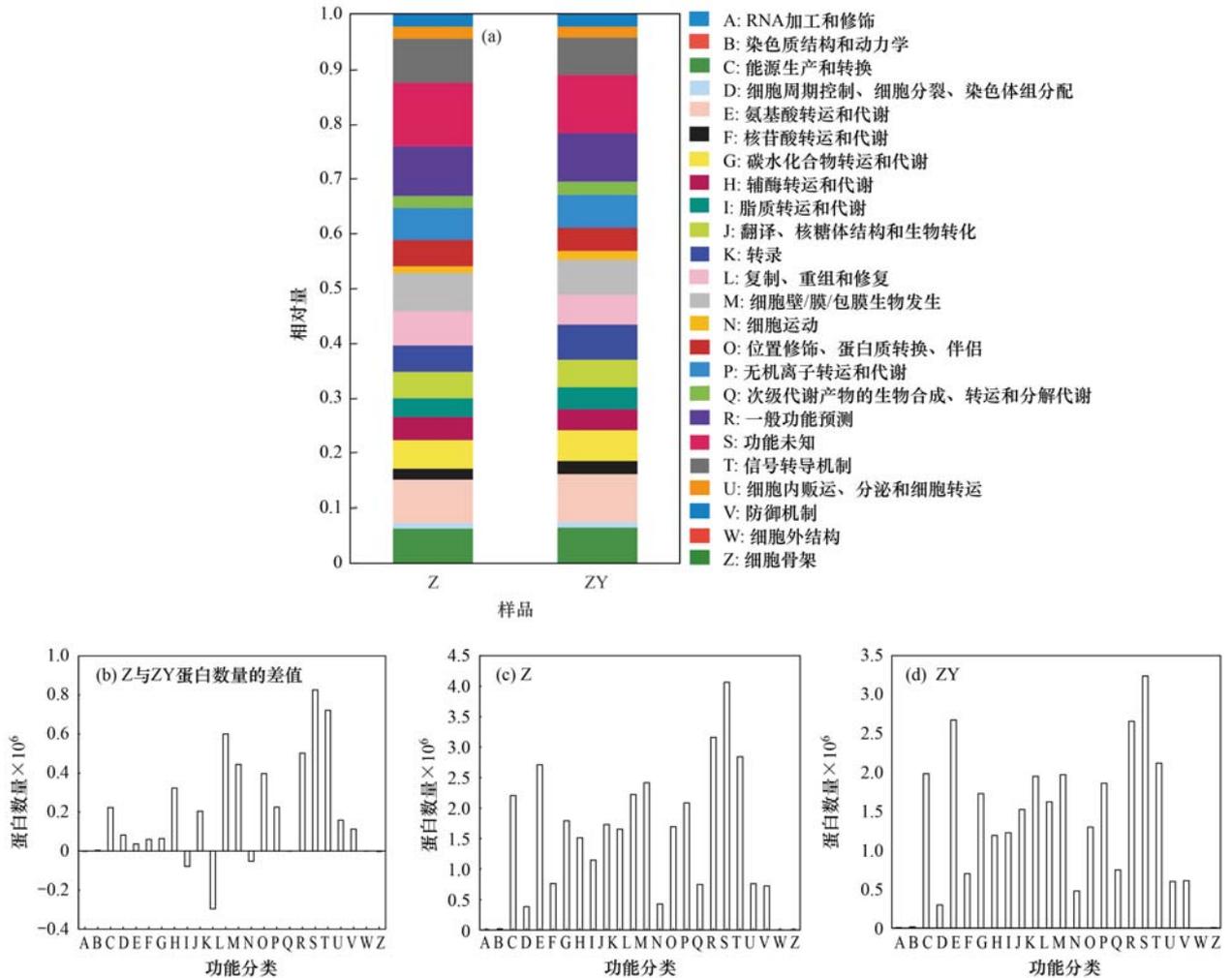


图6 样品中编码蛋白种类分布和数目变化

Fig. 6 Distribution and number of encoded proteins in the samples

群的代谢功能。

2.3.4 样品菌群差异性分析

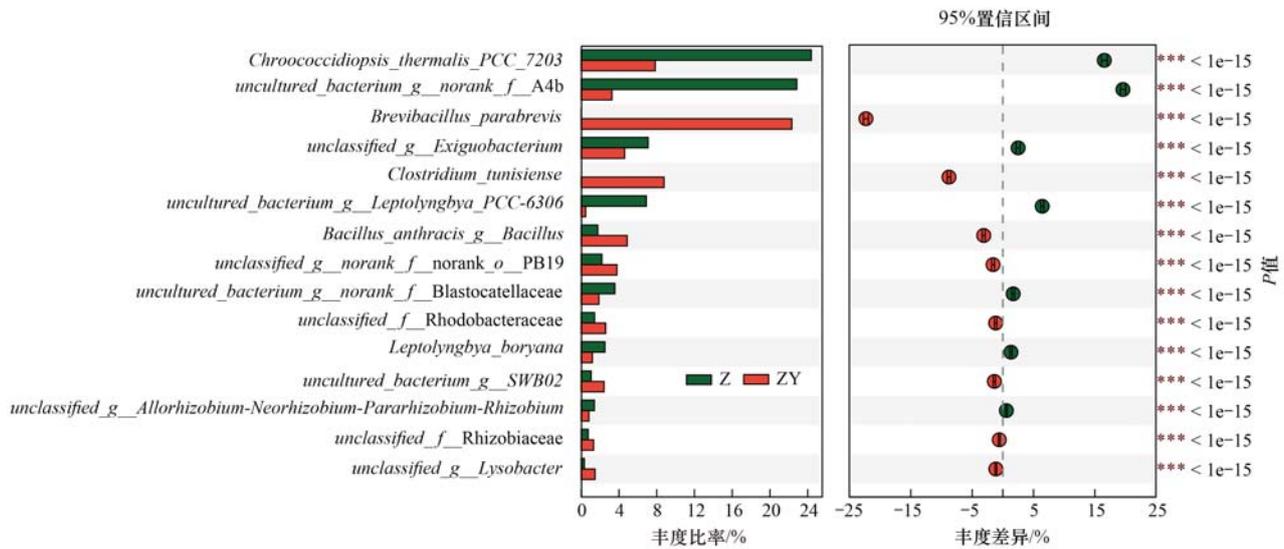
利用卡方检验^[25] (chi-square exact test) 分析 2 组样品中菌群结构在属水平的差异显著性,结果如图 7 所示。

图 7 中结果进一步表明,芽孢杆菌加入,显著降低了 Z 中拟色球蓝细菌 (*Chroococidiopsis*)、*uncultured_bacterium_g_norank_f_A4b* 和瘦鞘丝藻属 (*Leptolyngbya*) 这 3 个属的数量;显著增加了短芽孢杆菌 (*Brevibacillus*)、梭状芽孢杆菌 (*Clostridium*) 和芽孢杆菌 (*Bacillus*)。 *norank_f_norank_o-PB19*、*unclassified_f_Rhodobacteraceae* 和 *SWB02* 在 ZY 中也是显著增加的菌群,芽孢杆菌可以明显影响产藻菌的结构组成和种群数量。

3 讨论

图 1(a) 的 Y 和 ZY 在模拟尾水中 NH_4^+ 浓度在反应初期升高较快,实验反应开始一周内呈持续且快速升高的趋势,主要是系统中部分含氮底物被氨

化细菌等分解为铵根离子,在一定时间内没被及时转化造成一定量的累积。图 1(b) 的 ZY 中 NO_2^- 浓度在反应前期只有较小的变化浮动,可降解约 50% 的 NO_2^- , 反应中没有出现 NO_2^- 浓度极不稳定的现象,表明系统中微生物在参与氮循环过程中可能需要的溶解氧较少。由图 1(c) 可知,Z 中 NO_3^- 浓度在反应的第 1~3 d 期间呈快速下降的趋势,之后的反应阶段模拟污水中其含量出现持续上升的现象,主要是系统中由于藻类的光合作用产生氧气。当系统中溶解氧出现升高时, NO_2^- 易转化为 NO_3^- ^[26],而且系统不能形成缺氧环境,影响了反硝化细菌的活性及反硝化能力,使其不能及时将中间产物 NO_3^- 转化为氮气,造成了中间产物 NO_3^- 长时间出现累积现象。图 2 (a) 的 Z 和 ZY 对城市尾水中 NH_4^+ 去除效果较好,2 组都达到了 95% 以上,Z 中 NH_4^+ 降解率高达 99% 以上,几乎完全去除尾水中的 NH_4^+ , Li 等^[27] 分别在经过灭菌处理的城市污水原水和原水里培养小球藻,14 d 的批次培养后小球藻对原水中 NH_4^+ 去除率最高可达 93.9%, 结果表明微藻去除



Y轴表示某一分类水平下的物种名,物种对应的每个柱子表示该物种在各样本相对丰度,不同颜色表示不同样本;中间区域为所设置的置信区间内,圆点对应的数值表示物种在两样本中相对丰度的差值,圆点颜色显示为物种丰度占比较大的样本颜色,圆点上的T型区间为差值的上下限值,***表示 $P \leq 0.001$

图7 属水平差异性检验

Fig. 7 Difference test at the genus level

NH_4^+ 效率较高. 由图 2 (b) 可知, Z 中 NO_2^- 去除效果最好, 芽孢杆菌与微藻的共同作用在氮循环反应 NO_2^- 转化为 NO_3^- 过程中发挥出较强的稳定效果, 可能具有平衡反应系统中溶解氧供应需求的功能. 图 2 (c) 的 ZY 中 NO_3^- 去除效果最好, 其降解率高达 99% 以上, 几乎完全去除城市尾水中的 NO_3^- , 微藻与芽孢杆菌的共同作用可提高脱氮菌去除水中的 NO_3^- 的降解率及稳定性, Sydney 等^[6] 利用微藻对城市污水二级出水进行处理也得出了 79.63% 的硝酸盐去除率. 微藻的同化过程在将无机氮转化为其有机形式中发挥关键作用, 有研究发现藻类优先利用 NH_4^+ 而不是 NO_3^- , 并且直到 NH_4^+ 几乎完全消耗完才开始消耗 NO_3^- , 因此系统中 NH_4^+ 去除效率较高^[28]. 也有研究发现, NO_3^- 在氧化水生环境中具有较好的稳定性, 但硝酸盐的存在可以诱导硝酸还原酶的活性也是微藻的必需氮源^[29], 因此 ZY 系统对 NO_3^- 具有较好的去除效果.

由图 4 可知, ZY 中短芽孢杆菌、梭状芽孢杆菌和芽孢杆菌成为样本数占比较高的菌群, 芽孢杆菌的加入抑制了藻类的生长, 使藻细胞逐渐减少. 有研究发现细菌与藻之间的相互作用是影响藻类生长的关键性因素, 水华发生时, 藻细胞数目迅速增加, 抑藻细菌能够优先利用藻类分泌的有机物, 数量不断增加, 并占细菌群落中的绝大多数, 抑藻细菌杀死藻细胞, 释放有机物刺激周围群落中抑藻细菌的生长^[30]. 随着抑藻细菌在时间以及空间上的持续作

用, 藻细胞数目不断减少, 最终消亡, 伴随着抑藻细菌能够优先利用的有机物含量的不断下降, 抑藻细菌不断减少, 回到最初水平^[31]. 原因是部分芽孢杆菌可以通过释放胞外物质对微藻产生一定的抑制作用^[32]. 图 6 显示在 ZY 中, 芽孢杆菌影响了菌群的代谢功能, 氨基酸运输代谢功能蛋白数量增加, 表明系统中氨基酸浓度增加. 有些芽孢杆菌能够分泌胞外物质, 对宿主藻类起抑制或杀灭作用, 有研究认为水华和赤潮的突然消亡可能与溶藻细菌的感染有关^[33]. Ahn 等^[34] 研究结果显示, 枯草芽孢杆菌所分泌枯草菌环肽在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度下, 可在 2 d 内去除 85% 的微藻; Mu 等^[35] 筛选出的 1 株芽孢杆菌, 可通过分泌具有耐热性的胞外物质促使微藻裂解, 达到抑藻目的, Zhao 等^[36] 研究也得出部分氨基酸对藻类生长具有抑制作用. 因此在城市尾水富营养化修复过程中, 可以施加芽孢杆菌菌剂, 通过直接和间接作用抑制藻类的生长, 防止水体富营养化现象发生.

4 结论

(1) 系统中同时添加微藻与芽孢杆菌, 可更大幅度地降解水中 NO_3^- 和 TN.

(2) 微藻脱氮系统中芽孢杆菌的加入, 改变了系统微生物群落结构及代谢功能.

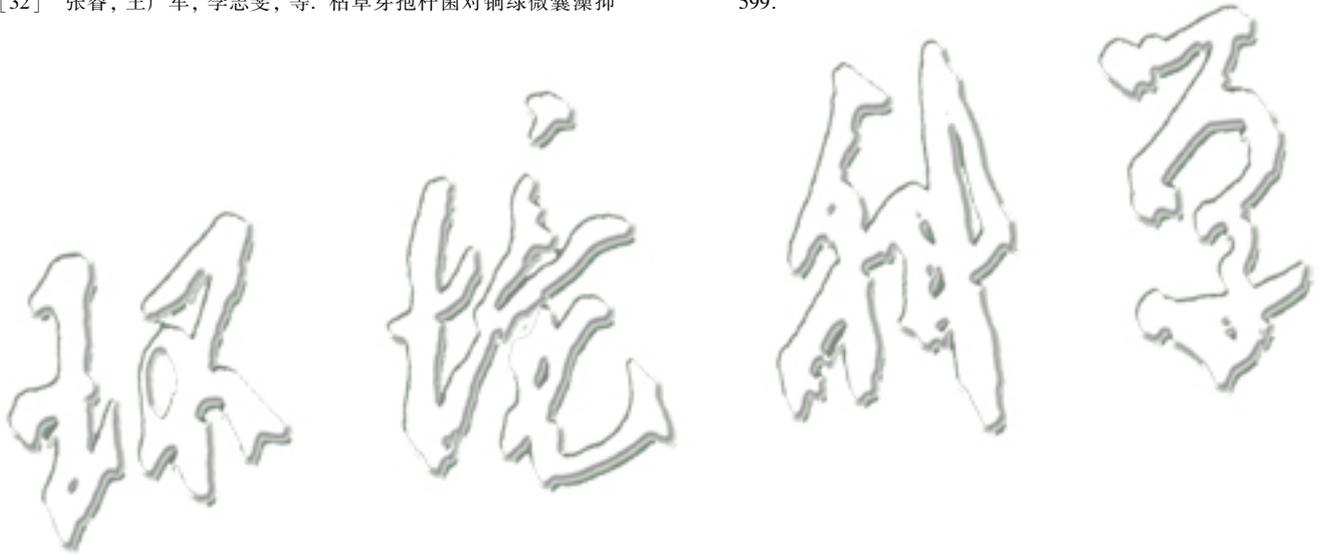
(3) 短芽孢杆菌、梭状芽孢杆菌和芽孢杆菌对拟色球蓝细菌和瘦鞘丝藻具有一定的抑制作用.

参考文献:

[1] 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 等. 尾水排放对受纳水体底栖生

- 物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5826-5835.
- Wang Y T, Fan C Y, Zhu J X, *et al.* Impacts of wastewater effluent discharge on bacteria community and water-soluble organic matter in benthic biofilm in receiving river [J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5826-5835.
- [2] 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 等. 低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5509-5517.
- Liao X K, Yan H L, Wang Z Y, *et al.* Advanced treatment of tail water using pilot-scale horizontal and vertical subsurface flow constructed wetlands in low-temperature seasons [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5509-5517.
- [3] 李胜男, 陈豪宇, 彭华, 等. 丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因子[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2679-2687.
- Li S N, Chen H Y, Peng H, *et al.* Temporal and spatial variation patterns of picophytoplankton and their correlations with environmental factors during the wet season in east lake Dongting [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2679-2687.
- [4] Olgúín E J. Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a biorefinery [J]. Biotechnology Advances, 2012, **30**(5): 1031-1046.
- [5] Shi J, Podola B, Melkonian M. Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using microalgae immobilized on twin layers: an experimental study[J]. Journal of Applied Phycology, 2007, **19**(5): 417-423.
- [6] Sydney E B, Da Silva T E, Tokarski A, *et al.* Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage [J]. Applied Energy, 2011, **88**(10): 3291-3294.
- [7] 杨坤, 李静, 卢文轩. 不同初始氮浓度对小球藻生长及氮吸收的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(12): 40-46.
- Yang K, Li J, Lu W X. Effects of different initial nitrogen concentrations on growth and nitrogen absorption of *Chlorella vulgaris* [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(12): 40-46.
- [8] Chen J J, Lee Y R, Huang Y C, *et al.* Isolation of microalgae with potential for integrated biomass production and nutrient removal from wastewater[J]. Desalination and Water Treatment, 2018, **127**: 151-157.
- [9] Lu Y P, Wang J, Yu Y, *et al.* Inhibition of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze on *Microcystis aeruginosa* and isolation of the inhibition factors [J]. Biotechnology Letters, 2013, **35**(7): 1029-1034.
- [10] Shi W Q, Bi L, Pan G. Effect of algal flocculation on dissolved organic matters using cationic starch modified soils[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **45**: 177-184.
- [11] Dumack K, Müller M E H, Bonkowski M. Description of *Lecythium terrestris* sp. nov. (chlamydophryidae, cercozoa), a soil dwelling protist feeding on fungi and algae [J]. Protist, 2016, **167**(2): 93-105.
- [12] Liu J Y, Yang C Y, Chi Y X, *et al.* Algicidal characterization and mechanism of *Bacillus licheniformis* Sp34 against *Microcystis aeruginosa* in Dianchi Lake[J]. Journal of Basic Microbiology, 2019, **59**(11): 1112-1124.
- [13] 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 等. 模拟及实际根系分泌物对芫污土壤微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 1077-1088.
- Han B Y, Zhang W, Hu F Y, *et al.* Influence of artificial root exudates and actual root exudates on the microbial community in pyrene-contaminated soil[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 1077-1088.
- [14] 邸琰茗, 王广焯, 黄兴如, 等. 再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 743-751.
- Di Y M, Wang G X, Huang X R, *et al.* Effect of reclaimed water on bacterial community composition and function in urban river sediment[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 743-751.
- [15] 闫杨, 刘月静, 陈芳. 枯草芽孢杆菌的应用现状概述[J]. 生物学教学, 2019, **44**(2): 2-3.
- [16] 张睿. 枯草芽孢杆菌对铜绿微囊藻抑制效果的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [17] Song Z, Liu Q X, Guo H, *et al.* Tostadin, a novel antibacterial peptide from an antagonistic microorganism *Brevibacillus brevis* XDH[J]. Bioresource Technology, 2012, **111**: 504-506.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 梁洪儒, 吴艳玲. 水中硝酸盐氮两种检测方法的比对分析[J]. 山东水利, 2021, (6): 71-73.
- Liang H R, Wu Y L. Comparative analysis of two detection methods of nitrate nitrogen in water [J]. Shandong Water Resources, 2021, (6): 71-73.
- [21] 景胜元. 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定水质中总氮实验空白的分析与研究[J]. 山西化工, 2021, **41**(4): 131-133, 155.
- Jing S Y. Analysis and study on the blank of total nitrogen determination in water by UV spectrophotometry with alkaline potassium persulfate digestion [J]. Shanxi Chemical Industry, 2021, **41**(4): 131-133, 155.
- [22] Ye J, Joseph S D, Ji M K, *et al.* Chemolithotrophic processes in the bacterial communities on the surface of mineral-enriched biochars[J]. The ISME Journal, 2017, **11**(5): 1087-1101.
- [23] Ji P, Rhoads W J, Edwards M A, *et al.* Impact of water heater temperature setting and water use frequency on the building plumbing microbiome [J]. The ISME Journal, 2017, **11**(6): 1318-1330.
- [24] Wong K, Shaw T I, Oladeinde A, *et al.* Rapid microbiome changes in freshly deposited cow feces under field conditions[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, **7**, doi: 10.3389/fmicb.2016.00500.
- [25] Zheng J, Xiao X H, Zhang Q, *et al.* Correlation of placental microbiota with fetal macrosomia and clinical characteristics in mothers and newborns [J]. Oncotarget, 2017, **8**(47): 82314-82325.
- [26] Seuntjens D, Han M F, Kerckhof F M, *et al.* Pinpointing wastewater and process parameters controlling the AOB to NOB activity ratio in sewage treatment plants [J]. Water Research, 2018, **138**: 37-46.
- [27] Li Y C, Chen Y F, Chen P, *et al.* Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel

- production[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(8): 5138-5144.
- [28] He T X, Xie D T, Li Z L, *et al.* Ammonium stimulates nitrate reduction during simultaneous nitrification and denitrification process by *Arthrobacter arilaitensis* Y-10 [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **239**: 66-73.
- [29] Barsanti L, Gualtieri P. *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology* (2nd ed.) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [30] Doucette G J, McGovern E R, Babinchak J A. Algicidal bacteria active against *gymnodinium breve* (dinophyceae). i. bacterial isolation and characterization of killing activity[J]. *Journal of Phycology*, 1999, **35**(6): 1447-1454.
- [31] 瞿建宏, 刘韶斌. 水体中芽孢杆菌和微囊藻的生长及其资源竞争[J]. 湛江海洋大学学报, 2002, **22**(3): 13-18.
Qu J H, Liu S B. The growth of *Bacillus* sp. and *Microcystis aeruginosa* and their competition for resources [J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2002, **22**(3): 13-18.
- [32] 张睿, 王广军, 李志斐, 等. 枯草芽孢杆菌对铜绿微囊藻抑制效果的研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1814-1821.
- Zhang R, Wang G J, Li Z F, *et al.* Inhibition of *Microcystis aeruginosa* by *Bacillus subtilis* [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1814-1821.
- [33] Lee S J, Kim Y, Kim H G, *et al.* Algalytic activity of α -mannosidase on harmful marine microalgae [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2000, **12**(2): 191-193.
- [34] Ahn C Y, Joung S H, Jeon J W, *et al.* Selective control of cyanobacteria by surfactin-containing culture broth of *Bacillus subtilis* C1 [J]. *Biotechnology Letters*, 2003, **25**(14): 1137-1142.
- [35] Mu R M, Fan Z Q, Pei H Y, *et al.* Isolation and algae-lysing characteristics of the algicidal bacterium B5 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(11): 1336-1340.
- [36] Zhao L, Chen L N, Yin P H. Algicidal metabolites produced by *Bacillus* sp. strain B1 against *Phaeocystis globosa* [J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2014, **41**(3): 593-599.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qiu, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers; A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ning, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)