

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

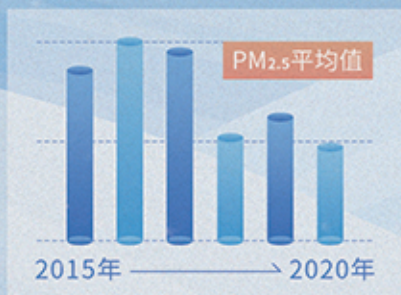
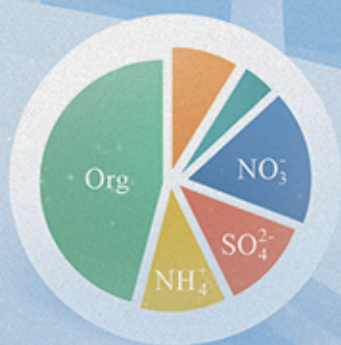
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析：以北运河为例

袁训超¹, 王敏¹, 郭逍宇¹, 吴东丽^{2*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 浮游微生物作为分解者在城市水生生态系统发挥重要作用, 但外界环境变化显著影响其在污染物降解和转化过程的作用。以高度人工化的北运河为研究区域, 利用 16S rRNA 高通量测序结果分析了浮游微生物群落结构的季节变化, 以揭示以再生水为主要补给水源的城市河道浮游微生物多样性季节变化机制及其与环境因子的响应关系。结果表明, 浮游微生物群落多样性和群落结构组成存在显著的季节变化。季节性降雨和再生水补给物理扰动过程引起的水体扩散能力增强是夏季 α 多样性显著高于春季的直接原因, 同时减弱了夏季浮游微生物群落多样性空间分化程度。季节性径流和温度是影响高度人工化城市河道水文水质季节变化的主要原因, 由于季节性径流和温度变化引起的 NO_2^- -N 和 TP 变化是河道浮游微生物多样性变化的主要原因。春季季节性断流导致的北运河水体还原性状态, 使得春季水体中富集的细菌大都为厌氧菌, 如与溶解性有机物降解有关的拟杆菌门 (Bacteroidetes) 和与反硝化过程有关的纤细菌门 (Gracilibacteria) 等。而夏季季节性径流和频繁降雨以及河道闸坝、闸门开闭频率增高引起的水体复氧能力增强, 一方面显著缓解河道营养物质污染, 另一方面使得夏季水体中富集的细菌大多为好氧菌或兼性厌氧菌, 如具有嗜高温特性的蓝藻 (Cyanobacteria) 和绿弯菌门 (Chloroflexi) 等自养微生物, 以及在污染物降解转化过程中有重要作用的酸杆菌门 (Acidobacteria) 和芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes) 等。研究结果对以再生水为补给水源的城市河道污染治理和生态修复有实际指导意义。

关键词: 再生水; 城市河道; 微生物多样性; 季节变化; 环境解释

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4097-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112023

Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River

YUAN Xun-chao¹, WANG Min¹, GUO Xiao-yu¹, WU Dong-li^{2*}

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Planktonic microorganisms play an important role in urban aquatic ecosystems; however, environmental changes significantly affect their role in the degradation and transformation of pollutants. The highly artificial North Canal River was chosen as the research area in this study. Seasonal changes in planktonic microbial community structure were studied using 16S rRNA high-throughput sequencing. The seasonal change mechanism of planktonic microbial diversity in urban rivers supplied with reclaimed water and its response relationship with environmental parameters were examined. The results showed that there were significant seasonal changes in the diversity and structure of the planktonic microbial community. The α diversity in summer was significantly higher than that in spring, owing to the enhancement of water diffusion capacity caused by seasonal rainfall and physical disturbance of the reclaimed water supply. The β diversity of the planktonic microbial community in summer was weakened compared to that in spring, also owing to the enhancement of water diffusion capacity. Seasonal runoff and temperature were the main driving factors of the seasonal variation in hydrology and water quality in the highly artificial urban river. The changes in NO_2^- -N and TP caused by seasonal runoff and temperature change were the main reason for planktonic microbial diversity changes in the river. The reductive environment of the river was caused by static and discontinuous flow in the spring. Anaerobic bacteria such as Bacteroidetes related to the degradation of dissolved organic matter and Gracilibacteria related to the denitrification process were dominant in the river. Seasonal runoff and frequent rainfall in summer, as well as the increase in the opening and closing frequency of river sluice gates, enhanced the reoxygenation capacity of the river. This significantly alleviated nutrient pollution in the North River Canal. Additionally, aerobic bacteria and facultative anaerobic bacteria were dominant species in the river during spring. Cyanobacteria with high temperature characteristics, Chloroflexi and other autotrophic microorganisms, as well as Acidobacteria and Gemmatimonadetes played an important role in the degradation and transformation of pollutants. The results of this study have practical significance for urban river pollution control and ecological restoration with reclaimed water as the recharge water source.

Key words: reclaimed water; urban river; microbial diversity; seasonal changes; environmental interpretation

城市河道中的浮游微生物作为分解者, 参与水生生态系统的物质循环、迁移和转化, 对城市河道中污染物的降解和氮、磷等营养元素的迁移转化过程有不可或缺的作用^[1], 是水生生态系统的重要组成部分^[2,3]。然而浮游微生物群落对外界环境变化较为敏感, 其群落结构容易发生变化^[4], 进而影响群落的类型和功能。季节变化是影响浮游微生物群

落多样性变化的关键环境驱动因子之一。秦宇等^[5]基于 MiSeq 高通量测序对三峡库区水体微生物群落

收稿日期: 2021-12-02; 修订日期: 2022-01-08

基金项目: 北京市自然科学基金-北京市教委联合重点项目 (KZ20190028042)

作者简介: 袁训超 (1999 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境微生物, E-mail: 757712689@qq.com

* 通信作者, E-mail: wudongli666@126.com

结构的季节特征的研究表明,变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和蓝藻(Cyanobacteria)等优势门丰度呈现明显的季节特征,温度是季节变化驱动下的最主要的环境因子.李洁等^[6]对永定河山峡段和城市段微生物群落结构时空演替的分析表明,季节因素对微生物多样性的影响大于空间因素.与山峡段样本的微生物群落组成具有明显的季节性分布特征相比较,受人类活动剧烈干扰的城市段样本未表现出明显的季节性分布.刘睿^[7]基于 T-RFLP 和高通量测序技术分析了陕西段渭河浮游细菌群落季节变化特征,结果表明渭河水体浮游细菌群落季节性差异同样比空间差异更加显著.其中,气温和流量等水文气象条件是季节变化的直接因素.气温通过影响细菌的生长速度和 OTU 丰度来改变浮游微生物群落的组成和结构,流量通过影响河水补给来源和细菌的运动能力,进而改变群落中物种丰度^[8,9].以 TP、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 等为代表的环境变量是季节变化的间接因素^[10],以 TP 和 NO₃⁻-N 为特征的非点源污染物受季节性降雨引起的地表径流改变间接影响水化学指标的浓度,且季节变化对河流细菌群落的影响大于水化学指标的影响^[11].

城市河道不仅具有防洪、蓄水和调节局部气候等生态功能,还具有纳污、水运和灌溉等经济功能和景观娱乐等人文价值^[12].高度人工化的城市河道与自然河道不同:一方面,城市河道水源大部分来自污水处理厂相对稳定的出水,水质水量季节变化小,水温较高,以上特点对浮游微生物群落空间变异和季节变异的影响尚不明晰;另一方面,城市河道衬砌和底砌改变了河道地表水与地下水包气带之间的水循环过程,这种有别于自然河道的生境特征和水质同质化结果是否可能导致河道浮游微生物群落季节变化规律不同于自然河道亟待研究.基于此,本研究拟采用 16S rRNA 高通量测序探究北运河 10 个样点 4 月和 9 月微生物群落组成、结构和差异,通过典范对应分析和主成分分析,来探究不同季节浮游微生物群落结构与环境因子之间的关系,以及造成浮游微生物季节差异的主要环境因子,以期揭示高度人工化的城市河道浮游微生物群落季节变化机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北运河是我国著名京杭大运河的起始端,发源于北京市境内燕山南麓(昌平区关沟),自(西)北向(东)南流入河北省,于天津市汇入海河,全长 238

km,流域总面积 6 166 km².北运河(含温榆河)干流在北京市境内主河道始于昌平区沙河闸,长 89.4 km,流域面积为 4 293 km².北运河流域属温带大陆性季风气候,年际、年内间降雨量及径流量不均衡,年降水量主要集中在汛期 6~9 月,占全年降水量的 82.4%,汛期平均径流量为 2.96×10^9 m³,非汛期平均径流量为 2.76×10^9 m³^[13].流域内居住着北京市 70% 的人口;经济总量占全市的 80% 以上,不但承担北京市防洪排涝和纳污的任务,也发挥了城市生态景观、休闲娱乐的功能.北运河沿线工、农业废水及生活污水的二级出水排放口众多,是北京市四大排污河之一,承载着北京 90% 的排水任务.北运河流域气候特征和闸门开闭频率变化导致河流时间尺度上存在环境梯度.

1.2 采样点布设及样品采集

2019 年 4 月和 9 月在研究区按照均匀布点并兼顾考虑流域尺度点源与非点源污染类型分布原则设置 10 个采样点(图 1).采样时通过全球定位系统(GPS, Garmin Legend, Garmin USA)定位每个样点的坐标.每个采样点采集平行的 2 L 混合均匀的水样 2 个,低温保存并尽快运回实验室.带回室内的水样,定量 1 L 水样充分摇匀(0.25 L)通过 0.22 μm 混合纤维素膜过滤,滤膜密封于 -80℃ 保存用于浮游微生物测定.

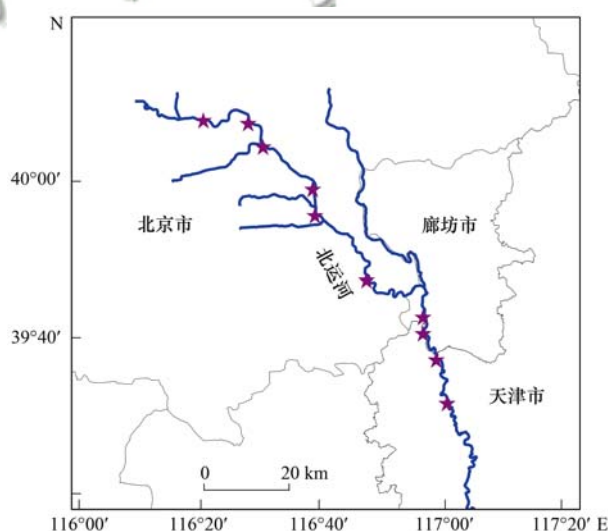


图 1 北运河采样点布设

Fig. 1 Sampling sites in the North Canal River

1.3 分析测定方法

1.3.1 水质数据测定

采用多参数水质测定仪(AP-7000)现场测定 pH、溶解性总固体(TDS)、温度(*T*)、氧化还原电位(ORP)和浊度(Turb)水质物理指标.带回室内的水样 24 h 内完成水质理化分析,采用国标法测定水样总磷(TP)、总氮(TN)、总有机碳(TOC)、总碳

(TC)、氨氮(NH_4^+-N)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、硝态氮(NO_3^--N)和亚硝态氮(NO_2^--N)。

1.3.2 微生物数据测定

将处理好的样品送至诺禾致源科技有限公司进行微生物 PCR 扩增和 16S rRNA 高通量测序,扩增引物为 (CCTAYGGRBGCASCAG, GGACTACNNGGGTATCTAAT),扩增区间为 V3 ~ V4 区。

1.3.3 数据处理及分析

使用 Excel 对返回的 OTU 表进行基础分析,借助 Galaxy 微生物数据分析平台 (<http://mem.rcees.ac.cn:8080/>) 进行数据处理,计算 α 多样性指数 (Chao1 指数、Shannon 指数和 Pielou 指数),利用 Primer 5 进行非度量多维尺度分析 (NMDS) 和 Global 检验. 利用 SPSS 24.0 进行独立样本 t 检验和主成分分析 (principal components analysis, PCA). 利用 Galaxy 平台基于线性判别分析线性 (Linear discriminant analysis, LDA) 进行差异贡献分析 (linear discriminant analysis effect size, LEfSe),来估算每个组分 (物种) 丰度对差异效果影响的大小,以揭示两季节浮游微生物群落组成的差异. 利用 Canoco 5.0 进行典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA),探究浮游微生物群落分布与环境因子的关系. 使用 Origin 2018 绘制 α 多样性指数箱图、百分比堆积柱状图、物种丰度热图

和环境因子箱图。

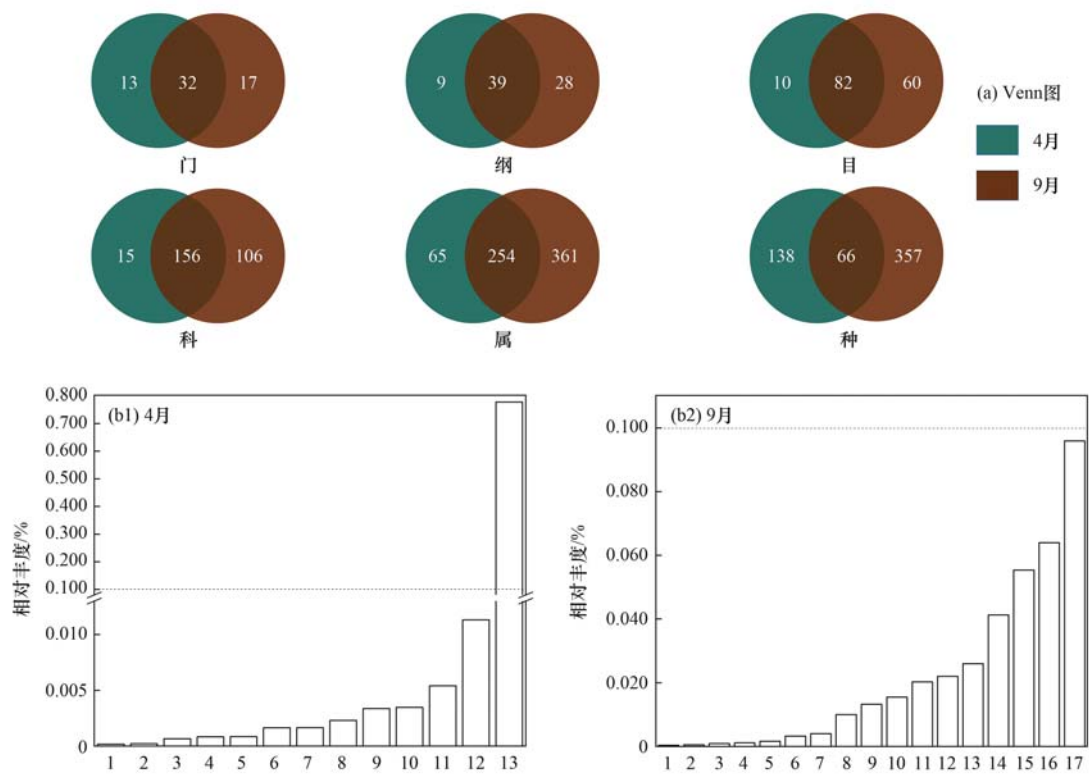
2 结果与分析

2.1 北运河浮游微生物群落多样性季节变化分析

2.1.1 不同季节浮游微生物群落 α 多样性分析

本研究基于高通量测序并去除嵌合体等疑问序列,分别对北运河 10 个样点 4 月和 9 月两种不同时间状态的样品序列量进行统计,分别得到了 534 243 条、602 833 条序列和 1 622 条、5 863 条 OTU 片段数。

基于 97% 的相似性阈值的序列划分结果显示: 4 月 1 622 条 OTUs 片段隶属于 45 门 48 纲 92 目 171 科 319 属 204 种,而 9 月 5 863 条 OTU 片段隶属于 49 门 67 纲 142 目 262 科 615 属 423 种 [图 2(a)], 9 月较 4 月具有更为丰富的浮游微生物类型. 从 Venn 图共有物种占比可以看出,两样本共有物种在总物种数中具有较高的占比 (门: 51.61%, 纲: 51.32%, 目: 53.95%, 科: 56.32%, 属: 37.35%, 种: 11.76%), 表明浮游微生物物种组成季节变异程度较低. Venn 图特有物种数则显示 4 月样本中独有的 OTU 数 (门: 13, 纲: 9, 目: 10, 科: 15, 属: 65, 种: 138) 均低于 9 月样本 (门: 17, 纲: 28, 目: 60, 科: 106, 属: 361, 种: 357), 说明 9 月微生物特异性显著高于 4 月是引起 9 月样本具有较高的多样性的主要原因之一,另一方面表明浮游微生物群落



(b)特有门相对丰度,横坐标代表4月或9月独有的门水平物种

图2 不同季节各分类水平下 OTU 分布 Venn 图和特有门丰度

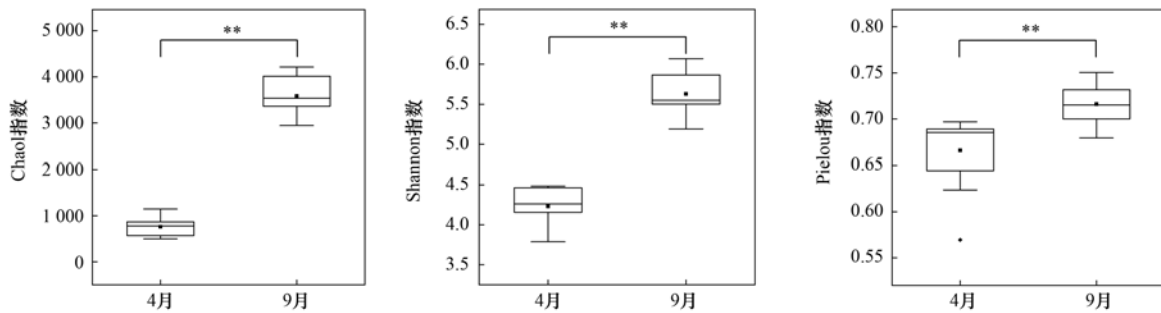
Fig. 2 Venn diagram of OTU distribution at different classification levels and the abundance of unique phylum in different seasons

异性随分类水平的降低而增强,物种分离程度越来越大。

基于门水平定义片段丰度值 $>1\%$ 的为优势菌群, $<0.1\%$ 为偶见菌群,其余则为非优势菌群。从结果可以看出[图 2(b)], 4 月检测出的 13 个特有门中包含了 12 个偶见门和 1 个非优势门, 9 月检测出的 17 个特有门均隶属于偶见门。由此可知,共有优势门是导致浮游微生物物种组成季节变异程度较低

的主要因素,而特有偶见门和非优势门则是导致微生物多样性季节分离程度较高的主要原因之一。

进一步分析不同样本 α 多样性指数(图 3),不同季节的两样本间 Chao1 指数、Shannon 指数和 Pielou 指数均存在极显著差异($P < 0.01$)。说明 9 月的浮游微生物群落较 4 月具有更高的物种丰富度和多样性且群落结构更加均匀,该结果与基于 Venn 图的多样性分析结果一致。



独立样本 t 检验, ** 表示 $P < 0.01$, 有极显著差异

图 3 不同季节浮游微生物群落 α 多样性指数

Fig. 3 The α diversity index of planktonic microbial community in different seasons

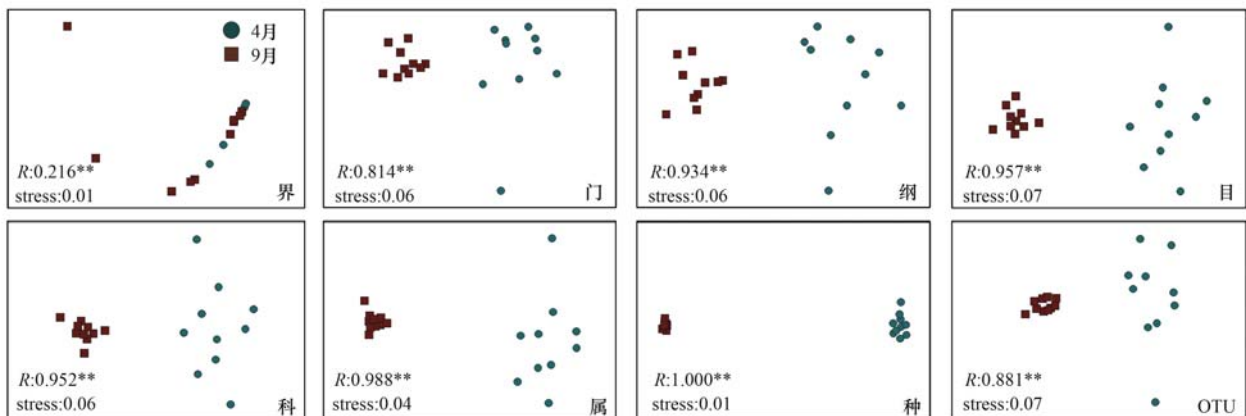
2.1.2 不同季节浮游微生物群落 β 多样性分析

非度量多维尺度分析 (nonmetric multidimensional scaling, NMDS) 显示不同分类水平下的两样本均具有明显的分布范围和界限,且这种分布范围和界限随着分类水平的降低而增强。进一步采用 Global 检验分析不同季节微生物群落在 NMDS 分布图上的差异性(图 4),结果显示两样本微生物群落在不同分类水平下均具有极显著差异($P < 0.01$)。两样本季节差异的显著性从高级分类水平界到低级分类水平 OTU 依次为 0.216、0.814、0.934、0.957、0.952、0.988、1.000 和 0.881,进一步说明这种差异性随分类水平的降低而增强,即季节差异对低级分类单元的影响较高级分类单元更为

显著。同时在 NMDS 排序中, 9 月样本的分布格局更为相似,其分布范围也较为集中,而 4 月样本则在排序图上具有较广的分布范围和格局,说明 9 月微生物群落多样性空间分化程度更低。受季节性降雨和再生水补给水源的影响,北运河流域夏季河道高度连通,水体扩散能力增强,从而导致 9 月浮游微生物群落结构在空间上具有较高的相似度。

2.2 北运河浮游微生物群落组成的季节变化分析

绘制基于门水平的不同季节优势物种组成[图 5(a)]。变形菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、放线菌门 (Actinobacteria)、疣微菌门 (Verrucomicrobia) 和蓝藻 (Cyanobacteria) 是不同季节共有优势门。以上优势门在 4 月和 9 月样点的



独立样本 t 检验, ** 表示 $P < 0.01$, 有极显著差异

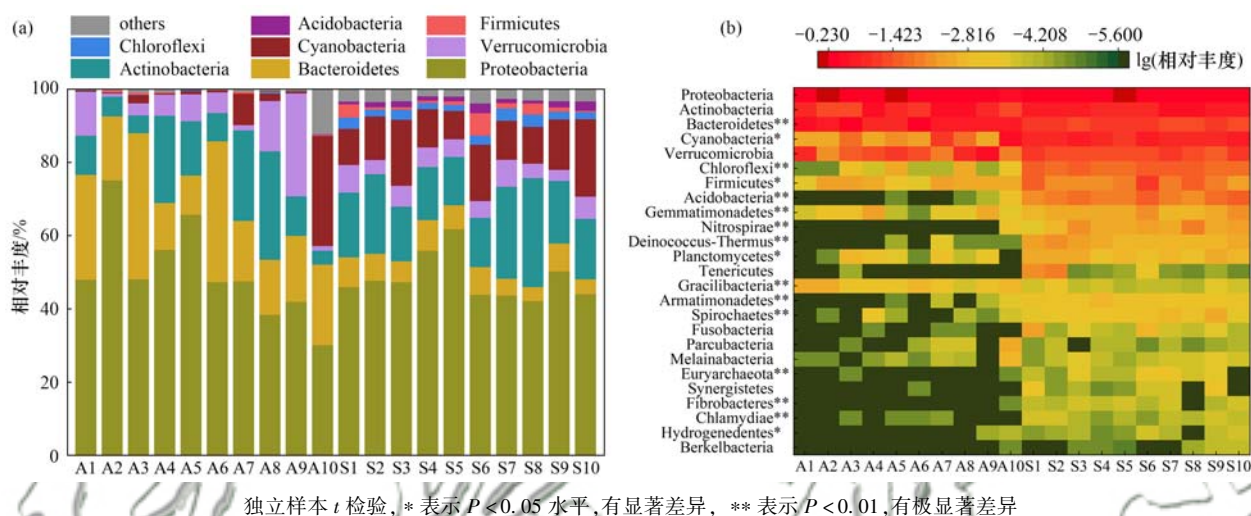
图 4 不同季节各分类水平下 NMDS 分析

Fig. 4 NMDS analysis at different classification levels in different seasons

相对丰度分别达到了 87.20%~99.65% 和 84.78%~94.53%。此外,9 月样本的优势门还包括了酸杆菌门(Acidobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)和厚壁菌门(Firmicutes)。

进一步识别基于门水平相对丰度数据集,采用独立样本 t 检验筛选出 16 个门在两季节样本中存在显著差异[图 5(b)]。其中,除蓝藻(Cyanobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、浮霉菌门(Planctomycetes)和食氢菌门(Hydrogenedentes)在两

样本间存在显著差异($P < 0.05$),其余 12 个门存在极显著差异($P < 0.01$)。4 月样本中的拟杆菌门(Bacteroidetes)和纤维菌门(Gracilibacteria)相对丰度较 9 月样本分别高 244.14% 和 710.49%。剩余的 14 个门相对丰度均表现为 4 月样本显著低于在 9 月样本($P < 0.05$),特别是蓝藻(Cyanobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria)和芽单胞菌门(Gemmatimonadetes),在 4 月样本中较 9 月样本分别低了 64.56%、96.71%、99.20% 和 73.89%。



独立样本 t 检验, * 表示 $P < 0.05$ 水平,有显著差异, ** 表示 $P < 0.01$,有极显著差异

图 5 不同季节门水平微生物群落结构和共有微生物相对丰度热图

Fig. 5 Microbial community structure and heat map of relative abundance of common microbes at phylum level in different seasons

利用 Galaxy 平台进行 LEFSe 分析,并采用 LDA 来估算不同样本组分(物种)丰度对差异效果的影响(图 6)。设置 LDA 阈值为 3.0。4 月样本相对丰度显著高于 9 月样本的纲水平物种是拟杆菌纲(Bacteroidia),这与拟杆菌门(Bacteroidetes)的结果相同,这是因为拟杆菌纲是拟杆菌门的优势类群,丰度值占门水平的 98.52%,其中包括鞘脂杆菌目(Sphingobacteriales)、鞘脂杆菌科(Sphingobacteriaceae)和地杆菌属(Pedobacter)。属水平的 *Fluviicola* LDA 指数较高,但是其高分类水平的黄杆菌目(Flavobacteriales)和 Crocinitomicaceae 在 4 月和 9 月样本间无显著差异。此外,假红杆菌属(*Pseudorhodobacter*)也有较高的 LDA 指数,是 4 月样本的特有菌,其相对丰度达到 $(1.15 \pm 1.25)\%$,但所属的变形菌门(Proteobacteria)、 α -变形杆菌纲(α -Proteobacteria)、红杆菌目(Rhodobacterales)和红杆菌科(Rhodobacteraceae)在 4 月和 9 月样本间均无显著差异。

9 月样本相对丰度显著高于 4 月样本的物种包括 6 纲、14 目、15 科和 20 属。其中异常球菌纲(Deinococci)和梭菌纲(Clostridia)的 LDA 指数较大分别为 3.5 和 3.7,对两季节的差异效果影响较大。

此外, LDA 指数较高的还有目水平的根瘤菌目(Rhizobiales)、立克次氏体目(Rickettsiales)、乳杆菌目(Lactobacillales)和梭菌目(Clostridiales)。科水平的莫拉氏菌科(Moraxellaceae)、立克次氏体科(Rickettsiaceae)和拜叶林克氏菌科(Beijerinckiaceae)。属水平的不动杆菌属(*Acinetobacter*)、*Candidatus_Megaira*、硅单胞菌(*Silanimonas*)、苯基杆菌(*Phenyllobacterium*)、副球菌属(*Paracoccus*)、产吡啶杆菌属(*Porphyrobacter*)和甲基孢囊菌属(*Methylocystis*),它们的 LDA 指数均大于 3.5。

2.3 北运河浮游微生物群落变化的环境解释

2.3.1 不同季节河道水质分析

采用独立样本 t 检验筛选出两季节有显著差异的环境变量(图 7)。结果显示 4 月样本中 TN 浓度和 pH 值均显著高于 9 月($P < 0.05$),TP 和 NO_2^- -N 极显著高于 9 月($P < 0.01$)。相比而言,TOC、 NO_3^- -N 和 T 在 9 月样本中的浓度显著或极显著高于 4 月($P < 0.05$)。

主成分分析是利用降维分析方法,将多个水质指标转化为少数几个彼此之间互不相关的综合指标,有利于更好地理解各污染物的来源和影响(表

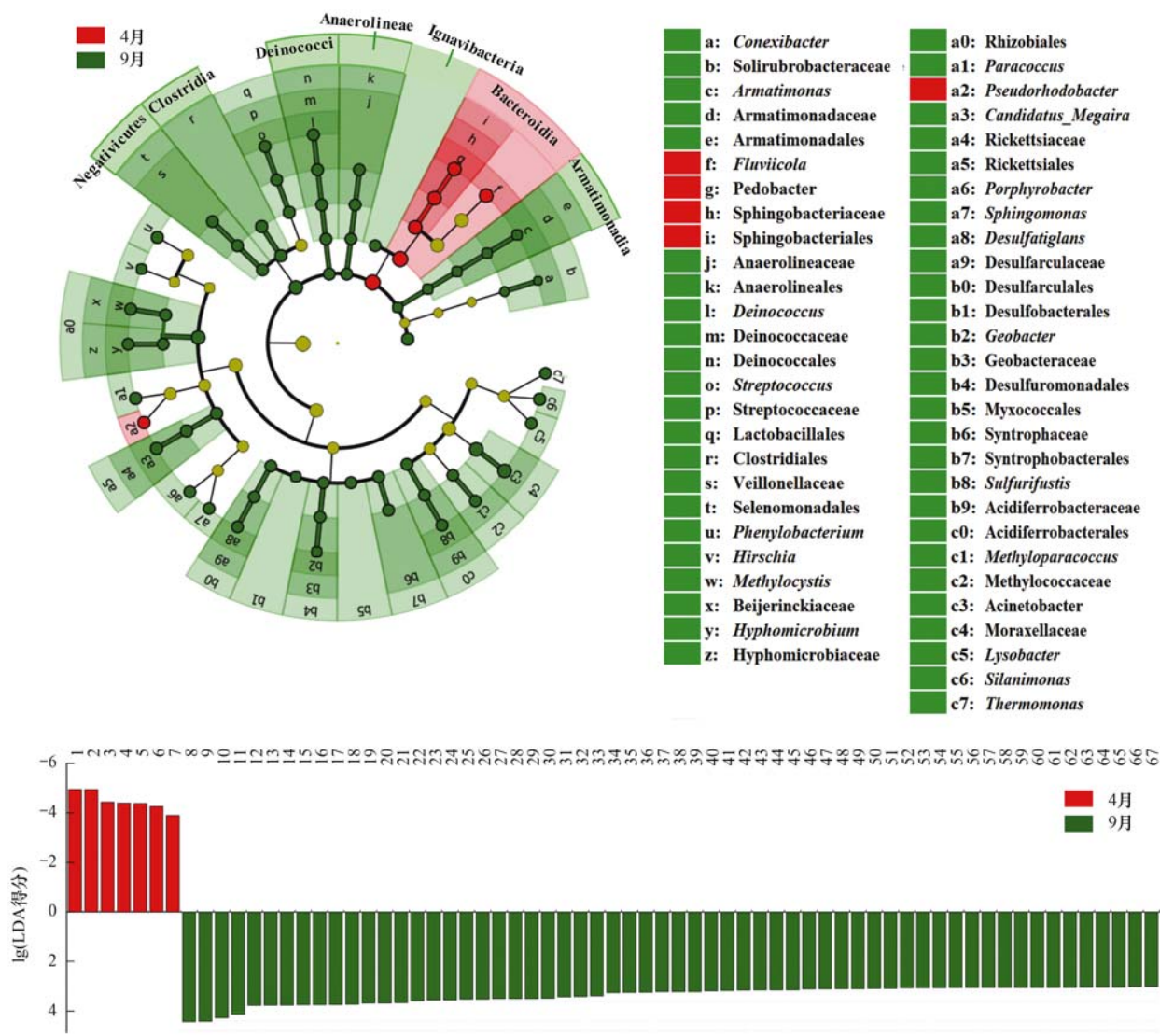
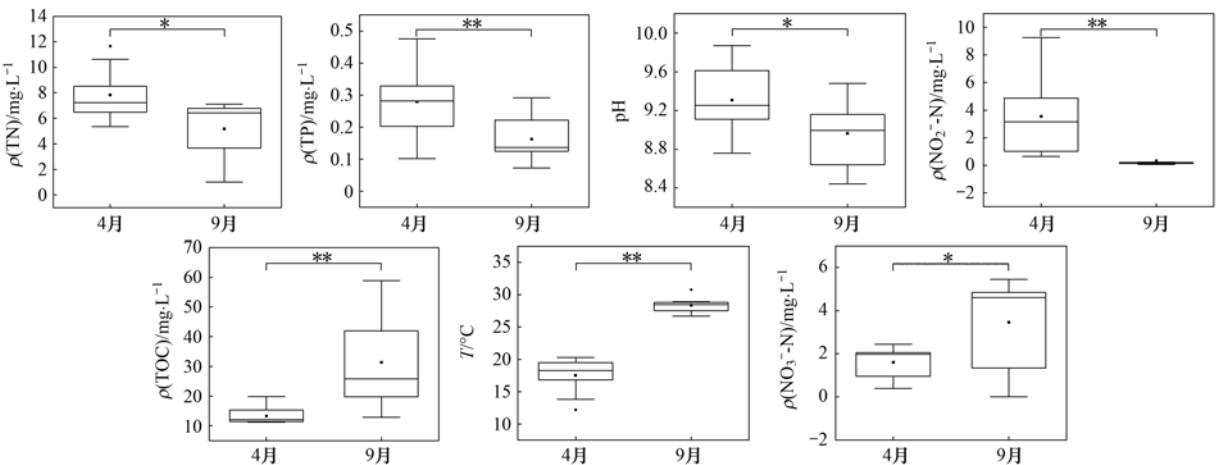


图 6 不同季节微生物群落的线性判别分析物种进化分支与 LDA 值分布直方图

Fig. 6 Linear discriminant analysis effect size evolutionary cladograms and LDA value distribution histograms of microbial communities in different seasons

1). 水质理化指标的主成分分析共提取了 5 个主成分, 累计解释水质变异 88.09%。PC 1 (方差贡献率为 33.81%) 与 TP、pH 负相关, 且与 TOC、 NO_3^- -N 和 T 正相关, 主要表征季节性径流和温度水文水质的间接影响。夏季地表径流量补给缓解河道 TP 和酸碱污染, 而季节性高温下活跃的硝化菌群则促进再生水典型污染物铵态氮氧化为硝态氮。与 TN 和 NO_2^- -N 正相关的 PC 2 (方差贡献率为 23.37%) 和与

ORP 正相关 PC 4 (方差贡献率为 9.82%) 表征非雨季间歇性断流河道水力学变化, 改变补给水富含的无机氮存在形态, 形成以 NO_2^- -N 为主导的还原性环境条件, 进而改变 ORP。PC 3 (方差贡献率为 13.09%) 表征与季节性变化无关的空间点源或非点源 I_{Mn} 污染。PC 5 (方差贡献率为 8.00%) 与 Turb 正相关, 用来表征季节性降雨携带的非点源泥沙污染, 导致水中悬浮物对光线透过时所发生的阻碍程



独立样本 *t* 检验, * 表示 *P* < 0.05 水平, 有显著差异, ** 表示 *P* < 0.01, 有极显著差异

图 7 不同季节差异显著的环境因子箱线图

Fig. 7 Box plot of environmental factors of significant differences in different seasons

表 1 主成分荷载和贡献率计算结果

Table 1 Calculation results of principal component load and contribution rate												
项目	TP	TN	TOC	NH ₄ ⁺ -N	<i>I</i> _{Mn}	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	<i>T</i>	pH	ORP	Turb	贡献率/%
PC 1	-0.77	0.04	0.86	-0.11	-0.20	0.88	-0.42	0.68	-0.74	-0.16	-0.19	33.81
PC 2	-0.10	0.95	-0.09	0.54	-0.40	0.23	0.73	-0.63	-0.14	0.30	-0.66	23.37
PC 3	0.38	0.12	0.35	0.39	0.78	-0.08	-0.09	-0.07	0.31	0.37	0.22	13.09
PC 4	0.01	0.13	0.19	-0.60	-0.14	0.18	0.17	0.00	0.12	0.72	0.10	9.82
PC 5	-0.02	0.04	-0.24	0.28	-0.17	-0.12	0.18	0.28	-0.43	0.35	0.64	8.00

度增强.

2.3.2 不同季节浮游微生物群落变化的环境解释

基于不同季节 OTU 和环境因子的典范对应分析结果如图 8 所示,反映不同季节浮游微生物群落分布与环境因子的关系. 两样本样点在空间上呈现了沿 *x* 轴从左到右的变化趋势 (On All Axes; pseudo-F = 1.2, *P* = 0.092). 与群落分布相关程度

最高的环境因子是 *T*、NO₂⁻-N 和 TP. 其中, NO₃⁻-N、TDS 等盐分离子、TOC 和浊度与 *T* 协同作用,与夏季样品微生物群落分布正相关. 夏季闸门开闭频率增高、降水量增大,水体富氧速率增强,季节性径流稀释了水体磷污染和酸碱污染的同时提高了水体非点源泥沙污染,导致夏季样品浮游微生物群落与 TP 和 pH 负相关,而季节性高温下活跃的反硝化菌群则促进硝化反应的进行. 其次, TN、ORP 和 NO₂⁻-N 高度协同作用, TP 则与 pH、NH₄⁺-N 表现出较为相似的分布特征,与春季样品微生物群落分布正相关. 春季水体的间歇性断流,形成了以 NO₂⁻-N 为主导的还原性条件,这会导致春季北运河河道浮游微生物群落向适应还原性的方向演替. *I*_{Mn} 则仅在不同季节的微生物群落空间变异中发挥作用,与季节变异不具有密切关系.

3 讨论

3.1 水质因子季节变化分析

季节性径流和温度变化是造成水生态系统水质季节变化的主要因素^[14]. 尤其是快速城市化和不透水表面的增加使雨季的暴雨径流携带大量非点源污染进入城市水生态系统,有研究结果指出,支持城市水生态系统富营养化年内峰值常常出现在夏季^[15~17]. 同时,夏季水温较高,水中藻类和浮游生物

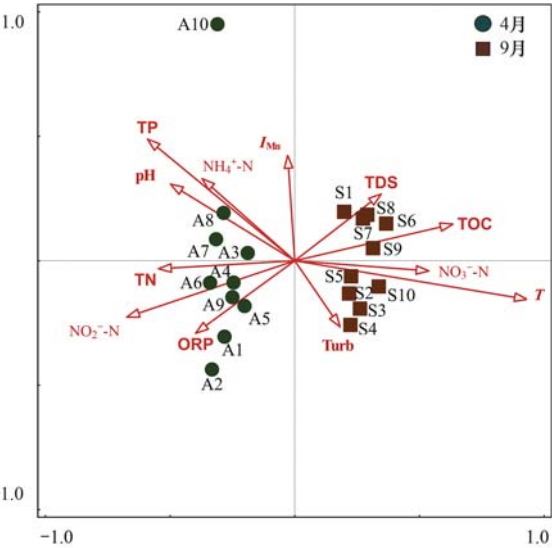


图 8 不同季节浮游微生物群落与环境因子的 CCA 分析

Fig. 8 CCA analysis of microbial community and environmental factors in different seasons

生物量迅速繁殖,水体溶解氧量下降,进一步促进夏季城市水生态系统富营养化风险^[18]. 季节性径流和温度变化仍然是以再生水为主要补给水源的城市河道水质季节变化的主要因素,但其变化规律和机制存在较大差异. 本研究分析结果表明季节性径流对河道水体稀释作用增加,河道上、中游广泛密布再生水处理厂频繁再生水补给,雨季频繁降雨引起的河道闸坝闸门开闭频率增高,都可以导致水体流动性和复氧能力增强,显著缓解河道营养物质污染. 加之,上、中、下游河岸带湿地生态植物夏季生长旺盛,生物量增加,消耗氮、磷营养物质,增加水体 DO,且具有一定的抑藻效应^[19]. 季节性径流和温度变化显著缓解以再生水为主要补给水源的城市河道水质污染.

3.2 浮游微生物多样性季节变化分析

9月北运河浮游微生物 α 多样性显著高于4月,这与永定河、太湖和南京玄武湖浮游细菌群落多样性季节变化规律一致^[6,20,21]. 9月适宜的温度和较长的日照时间为浮游藻类生长提供良好条件,浮游藻类可显著影响细菌丰度、生物活性及群落多样性^[22,23],尤其是改变群落中非优势菌群和偶见菌群的类型和多度^[24],最终表现为9月较高的 α 多样性. 另一方面,微生物因为具有相对较高的代谢灵活性、生理耐受性、分散性、快速增长性^[25,26]. 作为水生态系统稳定性表征指标,大量文献表明浮游微生物 α 多样性与水生态系统稳定性正相应^[6,24],这一结果支持了本研究9月较4月水质污染显著缓解且 α 多样性显著升高的结论.

与4月相比较,研究区9月样点的微生物群落有着更高的同质性. 究其原因与雨季较高的径流量下水体扩散能力较强有关,提高水质同质化水平,进而促进微生物群落空间同质化,这种同质化的影响对低分类单元的影响较高分类单元更为显著.

3.3 微生物组成的季节变化分析

有研究表明,微生物群落时间变异的演替特征,一方面是微生物群落调节自身生理机能或者微生物之间的相互作用来适应环境的内源性动力的结果,另一方面是环境变化驱动微生物群落产生适应性演替的外源性动力的结果^[27~29]. 再生水补给过程产生的水化学特征的改变以及季节性径流和温度水文水质的变化是促使微生物组成产生季节变异的直接原因. 因此,基于微生物生理功能特性探究两样本微生物组成差异及其与环境因子之间的响应,能更好地理解两者的耦合关系.

蓝藻(Cyanobacteria)是河流中大部分光合自养产物的来源^[30],它的嗜高温特性使其在夏季节大量

繁殖^[5]. 绿弯菌门(Chloroflexi)属兼性厌氧菌,利用3-羟基丙酸途径固定 CO_2 产生能量,使它能在不同营养程度的环境中生存,但更倾向生活在富营养化程度高的区域^[31]. 这些浮游细菌生长依赖于氮和磷等无机营养盐的供给,在生长的过程中,吸收了大量营养盐,加之嗜高温特性,其丰度在夏季达到峰值,造成了北运河水体中营养盐的降低. 而这些细菌是河流中大部分光合自养产物的来源,但对于北运河这种高污染的河流,光能自养微生物对有机碳的贡献应该较少. 拟杆菌门(Bacteroidetes)是肠道中数量最大的革兰氏阴性细菌,也普遍存在于污水处理厂生物池,是溶解性有机物的主要消费者^[32],部分拟杆菌可致病,因其在肠道内数量的绝对优势,在受污染的水体中不能长时间存活和繁殖,且通过16S rRNA基因序列的差异能够分辨粪源的污染源等特点可指示水体所受粪源污染程度^[33,34],而其中的鞘脂杆菌目(Sphingobacteriales)在海洋细菌中占有较大比例,可以降解纤维素^[35]. 本文水体中拟杆菌门(Bacteroidetes)和鞘脂杆菌目(Sphingobacteriales)在4月的丰度高于9月,这可能与水体呈还原态,并受粪源污染的程度有关. 酸杆菌门(Acidobacteria)参与了缺氧条件下纤维素的厌氧降解^[36],其在9月富集与水体 TOC 浓度分布有关.

有研究表明在缺氧和高碳环境中适宜生存的纤细细菌门(Gracilibacteria)和属水平的 *Fluviicola* 和假红杆菌属(*Pseudorhodobacter*)同属于反硝化细菌^[37,38],在呈还原态的4月水体中高度富集. 硝化螺旋菌门(Nitrospirae)与亚硝酸盐氧化过程有关,并可借助于亚硝酸盐氧化过程中产生的能量固定部分无机碳^[39]. 夏季高温活跃的反硝化菌在好氧环境下大量繁殖,与9月 NO_3^- -N 浓度升高有关. 芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)广泛存在于污泥污水处理系统中,能够在有氧和厌氧环境中生存^[40],其下的芽单胞菌科(Gemmatimonadaceae)是一类具有代表性的聚磷菌,在有氧条件下大量吸收磷酸盐并积累在细胞^[41]. 厌氧菌科(Anaerolineaceae)可降解有机碳物质^[42],并与低溶解氧条件下的除磷有关^[43]. 属水平的不动杆菌属(*Acinetobacter*)是一类重要的反硝化聚磷菌^[44],部分物种属于条件致病菌^[45]. 本文水体中这些类群的细菌在9月富集,促进了磷元素的降解转化,这可能与9月河流水体呈氧化态且具有更高的碳磷比有关.

4 结论

(1)不同季节特有偶见门和非优势门的组成差异是引起北运河9月的浮游微生物 Chao1 指数、

Shannon 指数和 Pielou 指数均极显著高于 4 月的主要原因。季节性降雨和再生水补给物理扰动过程在促进 9 月河道水体扩散能力增强的同时,减弱 9 月浮游微生物群落多样性空间分化程度。这种多样性变化对低级分类单元的影响较高级分类单元更为显著。

(2) 浮游微生物群落结构组成存在显著的季节变化。春季样本中富集的拟杆菌门(Bacteroidetes)和纤细菌门(Gracilibacteria)大都为厌氧菌。而夏季样本中富集的蓝藻(Cyanobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)等大多为好氧菌或兼性厌氧菌。

(3) 以再生水为主要补给水源的城市河道浮游微生物多样性季节变化机制与自然河道存在较大差异。CCA 分析表明 T 、 NO_2^- -N 和 TP 是影响微生物群落季节变化主要环境因子。 T 表征季节性高温下活跃的硝化菌群促进再生水典型污染物铵态氮氧化为硝态氮。 NO_2^- -N 表征非雨季间歇性断流河道水力学特征决定的补给水中富含的无机氮主要以还原型的 NO_2^- -N 形式存在。TP 则表征夏季地表径流量补给缓解河道 TP 和酸碱污染。 I_{m} 仅表征微生物群落空间变异中,与季节变异不具有密切关系。

(4) 在夏季节大量繁殖的嗜高温蓝藻(Cyanobacteria)和兼性厌氧菌绿弯菌门(Chloroflexi)与水体中 TOC 浓度和温度呈正相关分布,在北运河水体中营养盐的生物地化循环中发挥重要作用,同时也是造成 9 月 TOC 污染严重的潜在因素。溶解性有机物的主要消费者的拟杆菌门(Bacteroidetes)和鞘脂杆菌目(Sphingobacteriales)在 4 月的丰度高于 9 月,指示 4 月水体粪源污染的程度更高。

参考文献:

- [1] 姜彩虹, 张美玲, 陶琰洁, 等. 上海市内不同水质的河道春季浮游细菌群落结构分析[J]. 微生物学通报, 2009, **36**(4): 522-527.
- Jiang C H, Zhang M L, Tao Y J, *et al.* Bacterial community structure in four different rivers of Shanghai in Spring[J]. Microbiology, 2009, **36**(4): 522-527.
- [2] 于洋, 王晓燕, 张鹏飞. 北运河水体浮游细菌群落的空间分布特征及其与水质的关系[J]. 生态毒理学报, 2012, **7**(3): 337-344.
- Yu Y, Wang X Y, Zhang P F. Spatial distribution of planktonic bacterial community and its relationship to water quality in Beiyun River[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2012, **7**(3): 337-344.
- [3] 胡愈忻, 张静, 黄杰, 等. 长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1414-1423.
- Hu Y X, Zhang J, Huang J, *et al.* Characteristics of bacterioplankton community between river and lake/reservoir in the Yangtze River basin[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1414-1423.
- [4] 刘峰, 冯民权, 王毅博. 汾河入黄口夏季微生物群落结构分析[J]. 微生物学通报, 2019, **46**(1): 54-64.
- Liu F, Feng M Q, Wang Y B. Microbial community structure of estuary of the Fenhe River into the Yellow River in summer[J]. Microbiology China, 2019, **46**(1): 54-64.
- [5] 秦宇, 张曦, 王紫薇, 等. 三峡水库中段水体微生物群落结构的季节变化[J]. 水生态学杂志, 2021, **42**(6): 16-23.
- Qin Y, Zhang X, Wang Z W, *et al.* Seasonal variation of microorganism community structure in the middle section of three gorges reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 2021, **42**(6): 16-23.
- [6] 李洁, 孙寓姣, 尹萌, 等. 永定河山峡与城市段微生物群落结构季节变化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, **56**(2): 257-264.
- Li J, Sun Y J, Yin M, *et al.* Seasonal variations in microbial community structure in Yongding River[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, **56**(2): 257-264.
- [7] 刘睿, 吴巍, 周孝德, 等. 渭河浮游细菌群落结构特征及其关键驱动因子[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(3): 934-944.
- Liu R, Wu W, Zhou X D, *et al.* Bacterioplankton community structure in Weihe River and its relationship with environmental factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(3): 934-944.
- [8] Sieburth J M. Seasonal selection of estuarine bacteria by water temperature[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1967, **1**(1): 98-121.
- [9] 王鹏, 陈波, 李传琼, 等. 赣江南昌段丰水期细菌群落特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2453-2462.
- Wang P, Chen B, Li C Q, *et al.* Bacterial communities in Nanchang section of the Ganjiang River in wet season[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2453-2462.
- [10] 笪文怡, 黎云祥, 朱广伟, 等. 水文气象过程对千岛湖氮磷变化的影响[J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(5): 9-19.
- Da W Y, Li Y X, Zhu G W, *et al.* Influence of hydrometeorological processes on nutrient dynamics in Qiandao Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2019, **40**(5): 9-19.
- [11] 刘君政, 王鹏, 肖汉玉, 等. 城市河流细菌群落特征及影响因素——以鄱阳湖流域赣江南昌段为例[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 741-752.
- Liu J Z, Wang P, Xiao H Y, *et al.* Characteristics of aquatic bacterial community and the influencing factors in an urban river—A case study of Nanchang section of the Ganjiang River, Lake Poyang Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(3): 741-752.
- [12] 谢琼, 王红瑞, 柳长顺, 等. 城市化快速进程中河道利用与管理存在的问题及对策[J]. 资源科学, 2012, **34**(3): 424-432.
- Xie Q, Wang H R, Liu C S, *et al.* Problems in river use and management during the rapid urbanization process and the strategies[J]. Resources Science, 2012, **34**(3): 424-432.
- [13] 梁灵君. 北运河运河核心区地表水资源状况分析[J]. 北京水务, 2021, (1): 22-26.
- Liang L J. Analysis of surface water resources in the core area of the North Canal[J]. Beijing Water, 2021, (1): 22-26.
- [14] 张文婷, 王铭泽, 宋丹阳, 等. 降雨径流过程的非点源污染时空动态分布研究[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(10): 153-160.
- Zhang W T, Wang M Z, Song D Y, *et al.* Study on spatial distribution of non-point source pollution in the process of rainfall

- runoff [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38** (10): 153-160.
- [15] 张波, 翟路, 林杰, 等. 南京城市湖泊湿地的水质动态及其评价[J]. *湿地科学与管理*, 2011, **7**(1): 29-32, 39.
Zhang B, Zhai L, Lin J, *et al.* The dynamics of water quality of urban wetland and its assessment [J]. *Wetland Science & Management*, 2011, **7**(1): 29-32, 39.
- [16] 余宝宝, 陈松. 城市河流水质组成季节变化规律——以宿州市沱河为例[J]. *自然科学*, 2016, **4**(4): 412-419.
Yu B B, Chen S. Water quality and its variation character by the season change in city—A case study from Tuohe River in Suzhou City [J]. *Open Journal of Nature Science*, 2016, **4**(4): 412-419.
- [17] 王倩, 吴亚东, 丁庆玲, 等. 西太湖入湖河流水系污染时空分异特征及解析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(7): 2699-2707.
Wang Q, Wu Y D, Ding Q L, *et al.* Temporospatial variations and influential factors of water quality in the flowing river systems of western Taihu Lake Basin [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2699-2707.
- [18] 张会豪, 闫光辉, 焦鑫雅, 等. 基于主成分分析法的长三角地区某水库蓝藻生长影响因子分析[J]. *环境保护与循环经济*, 2020, **40**(9): 37-41.
- [19] 黄迪, 熊薇, 刘克, 等. 典型再生水人工湿地净化系统水质时空变异研究——以北京市奥林匹克森林公园人工湿地为例[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(7): 1738-1750.
Huang D, Xiong W, Liu K, *et al.* Temporal-spatial variations of water quality in a reclaimed-water-supplied constructed wetland purification system: a case study in Olympic Forest Park of Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(7): 1738-1750.
- [20] 邢鹏, 孔繁翔, 高光. 太湖浮游细菌种群基因多样性及其季节变化规律[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(4): 373-381.
Xing P, Kong F X, Gao G. Phylogenetic diversity and seasonal variation of bacterioplankton communities in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, **19**(4): 373-381.
- [21] 沈烽, 赵大勇, 黄睿, 等. 南京玄武湖浮游细菌群落结构的季节变化及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(3): 662-669.
Shen F, Zhao D Y, Huang R. Seasonal variation of bacterioplankton community structure in Xuanwu Lake (Nanjing) and its relationship with environmental factors [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(3): 662-669.
- [22] 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 等. 分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3285-3296.
Yan M M, Chen S N, Huang T L, *et al.* Water quality and bacterial population driving mechanism of algae vertical succession in stratified reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3285-3296.
- [23] Muylaert K, Van der Gucht K, Vloemans N, *et al.* Relationship between bacterial community composition and bottom-up versus top-down variables in four eutrophic shallow lakes [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(10): 4740-4750.
- [24] 郭芝芝, 苏振华, 邸琰茗, 等. 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 803-812.
Guo Z Z, Su Z H, Di Y M, *et al.* Analysis on diversity of plankton microbial community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 803-812.
- [25] Fuhrman J A, Cram J A, Needham D M. Marine microbial community dynamics and their ecological interpretation [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2015, **13**(3): 133-146.
- [26] Allison S D, Martiny J B J. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(S1): 11512-11519.
- [27] Odum E P. The strategy of ecosystem development: an understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature [J]. *Science*, 1969, **164** (3877): 262-270.
- [28] 邹莉, 谢曙光, 黄艺. 天然水体基于分子生物学的微生物生态学研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(7): 85-89, 101.
Zou L, Xie S G, Huang Y. Molecular techniques-based microbial ecology in natural waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(7): 85-89, 101.
- [29] Lyautey E, Jackson C R, Cayrou J, *et al.* Bacterial community succession in natural river biofilm assemblages [J]. *Microbial Ecology*, 2005, **50**(4): 589-601.
- [30] Findlay S. Stream microbial ecology [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, **29**(1): 170-181.
- [31] 赵立君, 刘云根, 王妍, 等. 典型高原湖滨带底泥细菌群落结构及多样性特征[J]. *微生物学通报*, 2020, **47**(2): 401-410.
Zhao L J, Liu Y G, Wang Y, *et al.* Bacterial community structure and diversity of sediments in a typical plateau lakeshore [J]. *Microbiology China*, 2020, **47**(2): 401-410.
- [32] 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 等. 不同季节城市污水处理厂微生物群落特性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1488-1495.
He Y, Li K X, Wang J W, *et al.* Microbial community structure of waste water treatment plants in different seasons [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1488-1495.
- [33] Converse R R, Blackwood A D, Kirs M, *et al.* Rapid QPCR-based assay for fecal *Bacteroides* spp. as a tool for assessing fecal contamination in recreational waters [J]. *Water Research*, 2009, **43**(19): 4828-4837.
- [34] 张麟杰, 王淦淦, 张利兰, 等. 重庆市河水中粪源微生物污染特征及源解析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 1253-1260.
Zhang L J, Wang G G, Zhang L L, *et al.* Pollution characteristics and source track of fecal microorganism in the rivers across Chongqing City [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 1253-1260.
- [35] 王中华, 徐茂琴, 谢利, 等. 宁波沿海陆源排污口拟杆菌 (*Bacteroidetes*) 分布的特点[J]. *海洋与湖泊*, 2014, **45**(5): 1030-1036.
Wang Z H, Xu M Q, Xie L, *et al.* Distribution of bacteroidetes in Ningbo coastal sewage outlets [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, **45**(5): 1030-1036.
- [36] Jing C L, Xu Z C, Zou P, *et al.* Coastal halophytes alter properties and microbial community structure of the saline soils in the Yellow River Delta, China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **134**: 1-7.
- [37] Wei Z S, Pei J L, Huang Z S, *et al.* Effect of oxygen content on no removal and microbial communities of a hybrid catalytic membrane biofilm reactor [J]. *Research & Reviews: Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2018, **7**(3): 62-71.
- [38] Zhou J H, Yu H C, Ye K Q, *et al.* Optimized aeration strategies for nitrogen removal efficiency: application of end gas recirculation aeration in the fixed bed biofilm reactor [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*,

- 2019, **26**(27): 28216-28227.
- [39] Black E M, Chiment M S, Just C L. Effect of freshwater mussels on the vertical distribution of anaerobic ammonia oxidizers and other nitrogen-transforming microorganisms in upper Mississippi river sediment[J]. *PeerJ*, 2017, **5**, doi: 10.7717/peerj.3536.
- [40] Wong J T F, Chen X W, Deng W J, *et al.* Effects of biochar on bacterial communities in a newly established landfill cover topsoil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **236**: 667-673.
- [41] Mandel A, Zekker I, Jaagura M, *et al.* Enhancement of anoxic phosphorus uptake of denitrifying phosphorus removal process by biomass adaption [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, **16**(10): 5965-5978.
- [42] Ahmadi M, Jorfi S, Kujlu R, *et al.* A novel salt-tolerant bacterial consortium for biodegradation of saline and recalcitrant petrochemical wastewater [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **191**: 198-208.
- [43] Wang H Y, Song Q, Wang J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor with high dissolved oxygen: effects of carbon to nitrogen ratios [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 1145-1152.
- [44] Wang Q, Lv R Y, Rene E R, *et al.* Characterization of microbial community and resistance gene (CzcA) shifts in up-flow constructed wetlands-microbial fuel cell treating Zn (II) contaminated wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **302**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.122867.
- [45] 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 等. 西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3249-3256.
- Liu X D, Huang Y, Wang Y H, *et al.* Structural characteristics of microbial communities in the sediments of the Niyang River in Tibet[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3249-3256.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2021年12月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2020年度中国科技论文统计结果。统计结果显示《环境科学》2020年度总被引频次12 709,影响因子2.736,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列。

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shay County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)