

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

不同季节城市污水处理厂微生物群落特性

贺贇^{1,2,3}, 李魁晓^{1,2,3*}, 王佳伟^{1,2,3}, 王慰^{1,2,3}, 樊鹏超^{1,2,3}, 陈行行¹, 王军静^{1,2,3}

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044; 2. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京 100124; 3. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 不同季节污水处理厂由于水质和温度等的变化而导致处理效果不同. 为了解不同季节污水处理系统活性污泥中细菌群落结构及其多样性的变化规律, 本研究选取了 5 座不同处理工艺的污水处理厂, 分别在夏季(气温 $28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 水温 $24.9^{\circ}\text{C} \pm 1.1^{\circ}\text{C}$)和冬季(气温 $0^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, 水温 $16.8^{\circ}\text{C} \pm 1.3^{\circ}\text{C}$)两个时间点采集了 60 份活性污泥样品, 采用高通量测序技术对其微生物群落结构特征进行了解析. 结果表明, 不同污水处理厂主要优势菌属的相对丰度存在极显著性差异, 而同一污水处理厂不同处理单元(厌氧池、缺氧池和好氧池)中活性污泥细菌微生物群落结构相似. 同时冬夏两季的优势菌属也存在差异, 夏季主要优势菌属 *SJA-15*、*Ferruginibacter* 和 *Blastocatellaceae* 的相对丰度分别为 6.07%、4.50% 和 4.44%, 冬季主要优势菌属硝化螺旋菌属 *Nitrospira*、甲基娇养杆菌属 *Methylothermobacter* 和 *RBG-13-54-9* 的相对丰度分别为 10.17%、3.96% 和 3.28%. 环境因子关联分析表明, 温度、总氮、 NH_4^+-N 、总磷和化学需氧量是影响微生物群落结构的主要环境因子, 并且在这些环境因子中, 温度对群落结构影响最大, 其次是总氮. 同时, 功能酶的预测分析表明, 冬季污水处理厂活性污泥中参与氮循环关键酶相对丰度高于夏季. 上述结果表明, 温度、水质和处理工艺均会影响污水处理系统活性污泥中细菌群落结构, 包括优势细菌及其丰度.

关键词: 污水处理厂(WWTPs); 活性污泥; 微生物; 群落结构; 温度

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1488-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007015

Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons

HE Yun^{1,2,3}, LI Kui-xiao^{1,2,3*}, WANG Jia-wei^{1,2,3}, WANG Wei^{1,2,3}, FAN Peng-chao^{1,2,3}, CHEN Hang-hang¹, WANG Jun-jing^{1,2,3}

(1. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. Research and Development Center of Beijing Drainage Group Technology, Beijing 100124, China; 3. Beijing Wastewater Resourceful Engineering Technology Research Center, Beijing 100124, China)

Abstract: Wastewater treatment plants (WWTPs) have different treatment effects during different seasons due to changes in water quality and temperature. To understand bacterial community structure and diversity dynamics in the WWTPs, this study employed high-throughput sequencing technology during winter and summer. A total of 60 activated sludge samples were collected in five WWTPs in Beijing with different treatment processes in summer (temperature = $28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, water temperature = $24.9^{\circ}\text{C} \pm 1.1^{\circ}\text{C}$) and winter (temperature = $0^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, water temperature = $16.8^{\circ}\text{C} \pm 1.3^{\circ}\text{C}$). The relative abundances of dominant bacterial genera in activated sludge varied significantly between the WWTPs but microbial community structure was typically similar between different treatment units (i.e., the anaerobic tank, anoxic tank, and aerobic tank) at each WWTP. At the same time, different bacteria dominated in winter and summer, when the relative abundance of *SJA-15*, *Ferruginibacter*, and *Blasocatellaceae* was 6.07%, 4.50%, and 4.44% respectively, when the relative abundance of *Nitrospira*, *Methylothermobacter*, and *RBG-13-54-9* in winter was 10.17%, 3.96%, and 3.28%, respectively. Correlation analysis showed that temperature, total nitrogen (TN), NH_4^+-N , total phosphorus (TP), and chemical oxygen demand (COD) were the main environmental factors affecting microbial community structure, of which temperature had the greatest effect on species composition followed by TN. Furthermore, a predictive analysis of functional enzymes indicated that the abundance of key enzymes involved in the nitrogen cycle in the activated sludge of WWTPs is higher in winter than that in summer. These results show that temperature, water quality, and treatment process affect bacterial community structure (i.e., dominance and abundance) in WWTP activated sludge.

Key words: wastewater treatment plants (WWTPs); activated sludge; microorganisms; community structure; temperature

随着人口的增加、经济的高速发展和人民生活水平的提高,我国污水排放总量不断增加. 城市污水处理厂(wastewater treatment plant, WWTP)是保障水环境安全和实现城市可持续发展的重要基础设施. 我国城市污水处理厂普遍采用活性污泥法处理污水,例如 A²/O 法、氧化沟法和 SBR 法等活性污泥法. 其中微生物是去除污水中污染物的主体,是系统

稳定运行的基础^[1], 因此理解污水处理中微生物的群落结构和功能,对控制和提高污水处理的稳定性具有重要作用^[2].

收稿日期: 2020-07-02; 修订日期: 2020-08-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406305)

作者简介: 贺贇(1992~),女,硕士,主要研究方向为污水微生物学与资源化利用, E-mail: heyun1116@163.com

* 通信作者, E-mail: kuixiao_li@163.com

微生物常以污泥状絮凝物的形式存在于城市污水生物处理系统中,参与常规污染物(碳、氮、磷)和微量污染物的去除和代谢等过程.一个污水处理系统的性能与系统内微生物群落结构密切相关^[2,3].环境因素会影响生化处理工艺的运行效果,如温度和进水水质等,其中温度会影响活性污泥培养驯化效果和启动周期等^[4],低温会对微生物的数量和物种组成产生影响,延长系统启动时间和限制系统处理效率^[5].认识污水处理系统微生物群落是认识污水生物处理本质的前提,有助于指导污水处理系统的优化设计.然而微生物具有数量巨大、个体微小、多样性丰富和可培养性低等特征,导致经典培养法对微生物群落开展研究十分困难^[6].现有的高通量测序技术促使了大量不可培养菌的发现,生物信息学方法的发展为大数据处理提供了极大便利,推动了微生物群落规律的揭示^[7~9].近年来,高通量解析技术开始被应用于微生物群落动态变化的研究,不仅提供了总群落的结构变化特征,也提供了微生物群落组和环境条件的变化信息^[10,11].

为了解不同季节污水处理系统活性污泥中细菌群落结构及其多样性的变化规律,为污水处理系统稳定运行和精准调控提供理论依据^[12].本研究选取了北京市不同处理工艺的5座污水处理厂,采集污水处理厂生物池活性污泥,采用高通量测序技术主要从不同温度条件(冬夏两季),污水处理厂和水处

理单元2个空间维度,门和属两个水平对操作分类单元(operation taxonomy unit, OTU)所属的物种信息进行分析,从而分析污水处理系统活性污泥中细菌微生物群落组成特征、研究环境因子对微生物群落的影响、对比功能微生物群落的特征及优势微生物并预测不同季节功能性酶丰度,以期对污水处理厂的优化设计与运行提供基础数据和理论分析.

1 材料与方法

1.1 样品采集与理化分析

A、B、C、D和E为北京市的5座市政污水处理厂,分布在北京市的北部、东部与南部区域,样品采集时间为8月(夏季)和12月(冬季),采样点在污水处理厂生物池不同处理单元:厌氧池、缺氧池和好氧池,分别在每个处理单元中段取样,每个点取500 mL活性污泥.共采集60个泥水混合样,其中夏季30个,冬季30个.采样点具体信息见表1.

水质指标使用多参数水质仪(HACH,美国)现场测定,包括温度(*T*)、pH值和溶解氧,化学需氧量(COD)测定使用快速消解分光光度法(HACH,美国),总氮(TN)的测定使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894-1989),总磷(TP)的测定使用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989),氨氮(NH₄⁺-N)的测定使用纳氏试剂比色法(HJ 535-2009).

表1 采样点信息及污水处理厂工艺

Table 1 Sampling point information and treatment technology of the studied WWTPs

水厂名称	样本数量	采样月份	分组编号	采样气温 /℃	采样水温 /℃	处理工艺	布置形式	处理规模 /m ³ ·d ⁻¹
A	6	8	AS	27	24.3	A/A/O	敞开式	4×10 ⁵
A	6	12	AW	-2	16.2	A/A/O	敞开式	4×10 ⁵
B	3	8	BS	28	24.3	多级 A/O	半地下式	5×10 ⁵
B	3	12	BW	0	16.5	多级 A/O	半地下式	5×10 ⁵
C	5	8	CS	29	27.4	A/O	敞开式	10 ⁶
C	5	12	CW	4	15.7	A/O	敞开式	10 ⁶
D	12	8	DS	31	24.9	多级 A/O-MBR	全地下式	4×10 ⁵
D	12	12	DW	-3	19.6	多级 A/O-MBR	全地下式	4×10 ⁵
E	4	8	ES	26	24.4	A/A/O	敞开式	6×10 ⁵
E	4	12	EW	3	16.4	A/A/O	敞开式	6×10 ⁵

1.2 样品预处理及高通量测序

将采集的活性污泥样取50 mL离心后得到固态污泥,从污泥中提取样品总DNA后,采用引物对338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')通过Illumina MiSeq 测序平台完成样品细菌16S rDNA高通量测序.

1.3 数据分析

将所得序列进行相似性分析,并划分OTUs(相

似性大于0.97),随后,使用QIIME^[13](version 1.8.0)软件中的UCLUST^[14]对Tags在97%的相似度水平下进行聚类、获得OTUs,有效序列与SILVA数据库(<http://www.arb-silva.de>)进行对比并对OTUs进行分类学注释,并分别在各个分类水平统计各样本的群落组成与OTUs信息.参考Fang等^[15]的微生物α多样性指数算法计算Chao(物种丰度)指数、Shannon(物种多样性)指数和Coverage(覆盖度)指数.群落结构柱状图基于R语言工具作图.样本β

多样性分析基于 R 语言主要坐标分析 (principal coordinates analysis, PCoA) 统计分析和作图. 冬夏两季物种差异的两组比较基于 Wilcoxon 符号秩检验使用 R 的 stats 包和 python 的 scipy 包进行分析和作图. 环境因子关联分析的冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 基于 R 语言 vegan 包中 RDA 分析和作图. 为了比较冬夏两季污水处理系统功能酶的差异, 通过 PICRUST 软件对 OTUs 丰度表进行标准化并计算各功能类别丰度, 用于预测 KEGG 类别和功能酶^[16].

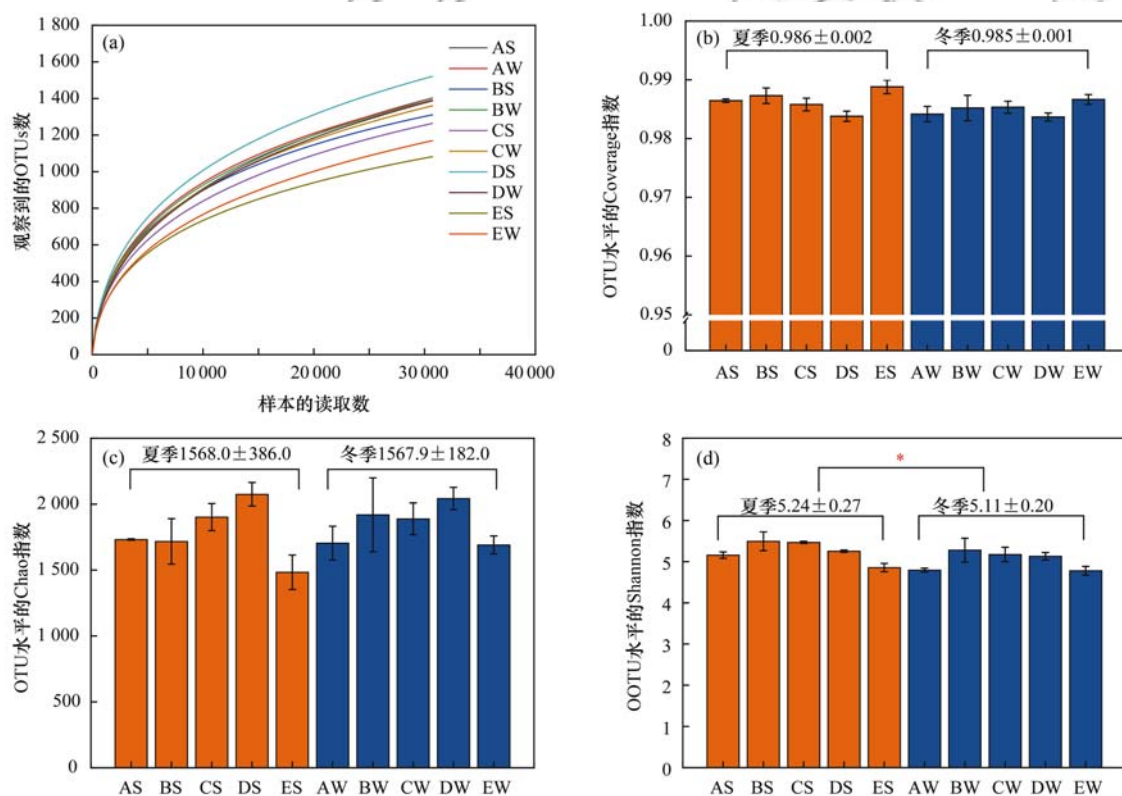
2 结果与讨论

2.1 污水处理厂活性污泥中细菌群落的 α 多样性分析

本研究对北京市 5 座污水处理厂冬夏两季共计 60 个活性污泥样进行了高通量测序分析. 夏季采样水温为 $24.93^{\circ}\text{C} \pm 1.12^{\circ}\text{C}$, 冬季采样水温为 $16.75^{\circ}\text{C} \pm 1.30^{\circ}\text{C}$. 60 个样本共计得到平均有效序列数

60 190 个, 构建 OTUs 并且获得注释信息的 Tags 数目 30 714 ~ 49 279, 按最小样本序列数 30 714 进行抽平, OTUs 平均有 665 个, 其中夏季样本特有 OTUs 1 158 个, 冬季样本特有 OTUs 1 094 个, 冬夏季共有的 OTUs 3 434 个.

不同污水处理厂在冬夏两季活性污泥中细菌群落的 α 多样性见图 1. 图 1 (a) 中随着样本读取数的增加, 观察到的 OTUs 数趋向平缓, 表明样本的测序深度足够. 图 1 (b) 中所有样本的 Coverage 指数均大于 0.98 表明测序深度足够, 结果可靠. Chao 指数与 Shannon 指数分别反映了群落丰富度^[17] 与群落多样性^[18]. 冬夏两季的 Chao 指数不存在显著性差异, 冬季的 Shannon 指数显著低于夏季, 表明温度影响微生物群落多样性且低温降低活性污泥中微生物多样性 [图 1 (c) 和 1 (d)]. 总体上, 各污水处理厂冬夏两季活性污泥中微生物 α 多样性较均匀, 表明各污水处理厂在长时间运行过程中形成了自我调节机制受温度波动影响较小^[19].



(a) 观察到的 OTUs 数; (b) OTU 水平的 Coverage 指数; (c) OTU 水平的 Chao 指数; (d) OTU 水平的 Shannon 指数

图 1 不同污水厂活性污泥样在冬夏两季的 α 多样性

Fig. 1 The α diversity of activated sludge samples from different WWTPs in winter and summer

2.2 污水处理厂活性污泥中细菌群落结构分析

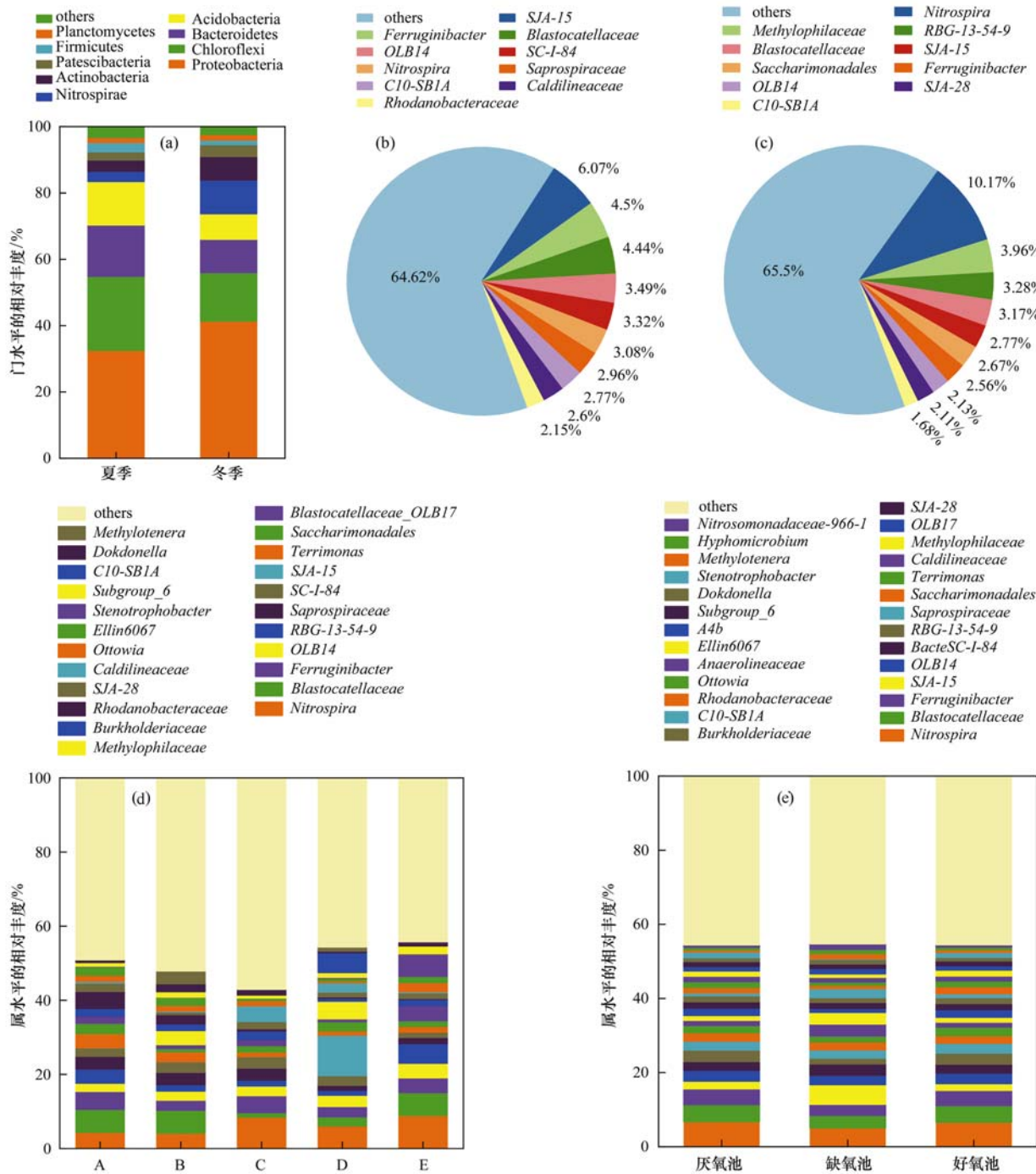
本研究主要从不同温度条件 (冬夏两季), 在污水处理厂和水处理系统处理单元这 2 个空间尺度, 门和属两个水平对 OTU 所属的物种信息进行分析, 从而揭示污水处理系统活性污泥中细菌群落组成特

征. 不同温度条件 (冬夏两季), 在门水平下, 活性污泥中细菌群落结构见图 2 (a). 冬夏两季主要的优势菌门有: 变形菌门 (Proteobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、酸杆菌门 (Acidobacteria) 和硝化螺旋菌门 (Nitrospirae), 此结

果与 Ma 等^[20]通过测序分析活性污泥中微生物群落的研究相似. 其中 Proteobacteria 为最优势菌门, 在夏季和冬季的相对丰度分别为 32.50% 和 41.34%, Proteobacteria 是污水处理过程最主要的细菌类群^[21,22]. Chloroflexi 和 Bacteroidetes 是继 Proteobacteria 之后的优势菌门, 普遍存在于污水处理厂生物池并参与有机物的降解^[23]. 两个季节在门水平下, 相对丰度前 7 的菌门丰度均存在显著性差

异 ($P < 0.05$). 结果表明在门水平下温度显著影响活性污泥中细菌群落结构.

在属水平下, 夏季和冬季活性污泥中细菌群落结构见图 2(b) 和 2(c). 夏季主要优势菌属 SJA-15、*Ferruginibacter* 和 *Blastocatellaceae* 的相对丰度分别为 6.07%、4.50% 和 4.44%; 冬季主要优势菌属硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*), 甲基娇养杆菌属 (*Methylothera*) 和 RBG-13-54-9 的相对丰度分别为



(a) 冬夏两季, 门水平; (b) 夏季, 属水平 (丰度前 10); (c) 冬季, 属水平 (丰度前 10); (d) 不同污水处理厂, 属水平; (e) 不同处理单元, 属水平; (a) 和 (e) 相对丰度 $< 1.0\%$ 的归为 others, (d) 相对丰度 $< 2.0\%$ 的归为 others

图 2 不同温度、维度、水平下活性污泥中细菌微生物群落结构

Fig. 2 Structure of bacterial microbial communities in activated sludge at different temperatures, scales, and levels

10.17%、3.96% 和 3.28%。且 *Nitrospira*、*Ferruginibacter* 和 *RBG-13-54-9* 的相对丰度在冬夏两季存在极显著性差异 ($P < 0.001$)。图 2(a)~2(c) 结果表明, 温度显著影响微生物群落结构, 冬季丰度较高菌属或具有更强的低温功能性, 例如检测到的 *Nitrospira* 是氨氧化细菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化细菌 (NOB) 中的主要菌属且具有低温脱氮性能^[24,25], 进一步分析这些微生物的特性和性能可以对污水处理系统低温条件运行提供优化指导或低温应急方案^[26]。

不同污水处理厂, 属水平下 [图 2(d)], 活性污泥细菌微生物群落结构存在显著性差异, 例如 *Blastocatellaceae*、*RBG-13-54-9*、*Saprospiraceae* 和 *SJA-15* 等的相对丰度在不同污水处理厂中存在极显著性差异 ($P < 0.001$), 表明处理工艺和进水水质会影响微生物群落结构。不同处理单元, 属水平下 [图 2(e)], 厌氧池、缺氧池和好氧池这 3 个污水处理单元的活性污泥中, 丰度在前 100 的菌属中, 只有丰度排名 25 的 *Methylothermobacter* 菌属在不同处理单元存在显著性差异 ($P < 0.05$), 表明不同处理单元的细菌种群组成相似, 微生物群落结构较为稳定。污水处理过程中活性污泥经厌氧池、缺氧池和好氧池后到二沉池又回流部分至厌氧池形成一个大的循环体系, 因此微生物种群组成相似, 但在不同的处理单元不同的微生物占据优势功能作用。这和 Zhang^[27] 等及马美玲等^[28] 分析的污水处理系统 (厌氧池、缺氧池和好氧池) 中微生物群落结构结果类似, 这 3 个处

理单元中优势菌属相同, 微生物群落演替不明显。

污水处理厂活性污泥中细菌群落物种组成分析表明, 细菌群落物种组成受温度、污水处理厂处理工艺和进水水质的影响, 而在生物池不同处理单元中活性污泥细菌微生物种群组成相似。

2.3 污水处理厂活性污泥中细菌群落差异分析

基于 PCoA 方法在门、纲和属水平下对冬夏两季不同污水处理厂的样品进行了群落结构分析, 结果如图 3 所示: 整体上, 夏季和冬季两个季节的活性污泥中细菌群落倾向于各自聚为一类, 表明温度影响活性污泥中细菌微生物群落。具体看, 各污水处理厂内部的活性污泥中细菌微生物群落聚类在一起, 同时来自 A、B、C 和 E 这 4 座污水处理厂的细菌微生物群落聚类在一起, D 污水处理厂的微生物群落聚类在一起, 即各污水处理厂不同处理单元的微生物群落具有很强相似性, 其次 A、B、C 和 E 这 4 座污水处理厂的微生物群落具有较强相似性, D 污水处理厂和其它 4 厂的微生物群落结构存在差异。此结果和上述群落结构分析结果类似, 温度、水厂工艺和进水水质均会影响活性污泥中微生物群落^[29]。同时推测 D 水厂和其它水厂细菌微生物群落差异性较大的原因, 可能为全地下式水厂的暗环境影响了群落结构, 有研究表明暗环境会影响细菌微生物群落多样性和群落组成^[30]; 同时全地下式的 D 水厂水温温差较其它水厂低 3℃ 左右, 这也是导致 D 水厂和其它水厂微生物群落存在较大差异的另一原因。

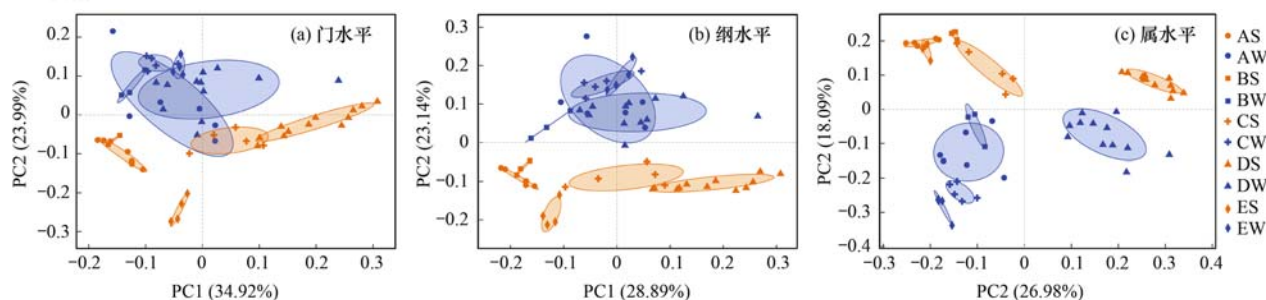


图 3 基于 PCoA 的污水处理厂活性污泥细菌微生物群落差异分析

Fig. 3 PCoA-based analysis of bacterial community differences in activated sludge in WWTPs

2.4 污水处理厂活性污泥中细菌微生物与水环境因子的相关性

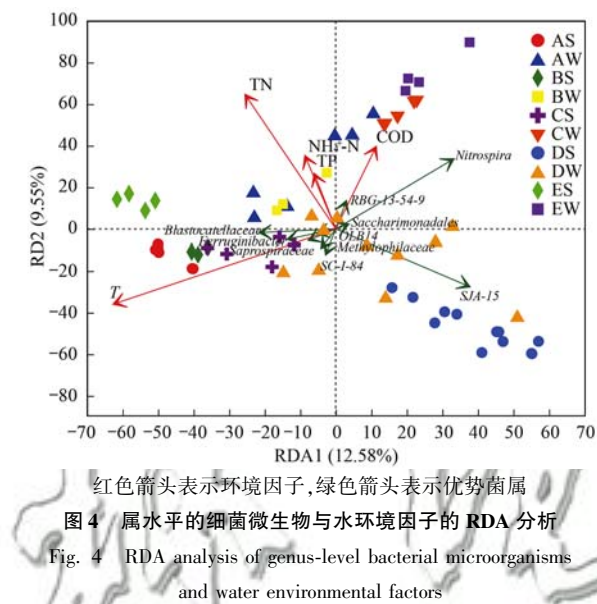
采样点水温及采样当月污水处理厂进出水水质见表 2, 各污水处理厂污染物处理效率均较高且在冬夏两季均可达标排放。结合采样点水质, 对属水平的细菌与水环境因子进行 RDA 分析。

反映菌群与环境因子之间关系的 RDA 分析结果见图 4。经过方差膨胀系数 (variance inflation factor, VIF) 检验, TN、 NH_4^+-N 、TP、COD 和温度 (T)

这 5 个环境因子均能影响微生物群落分布, Wang 等^[31] 的研究也表明, 进水水质特征会影响污水处理系统中微生物群落结构。图 4 中环境因子之间夹角大多 $< 90^\circ$, 表明环境因子之间除 COD 与温度是负相关, 其它两两之间都是自相关的, 自相关的环境因子对微生物群落产生协同作用, 且在环境因子中根据箭头长短可以看出, 温度对物种组成影响最大, 其次是 TN。细菌微生物与水环境因子的 RDA 分析进一步表明, 温度和污水处理厂进水水质均会影响

表 2 污水处理厂进出水水质
Table 2 Water quality of WWTPs

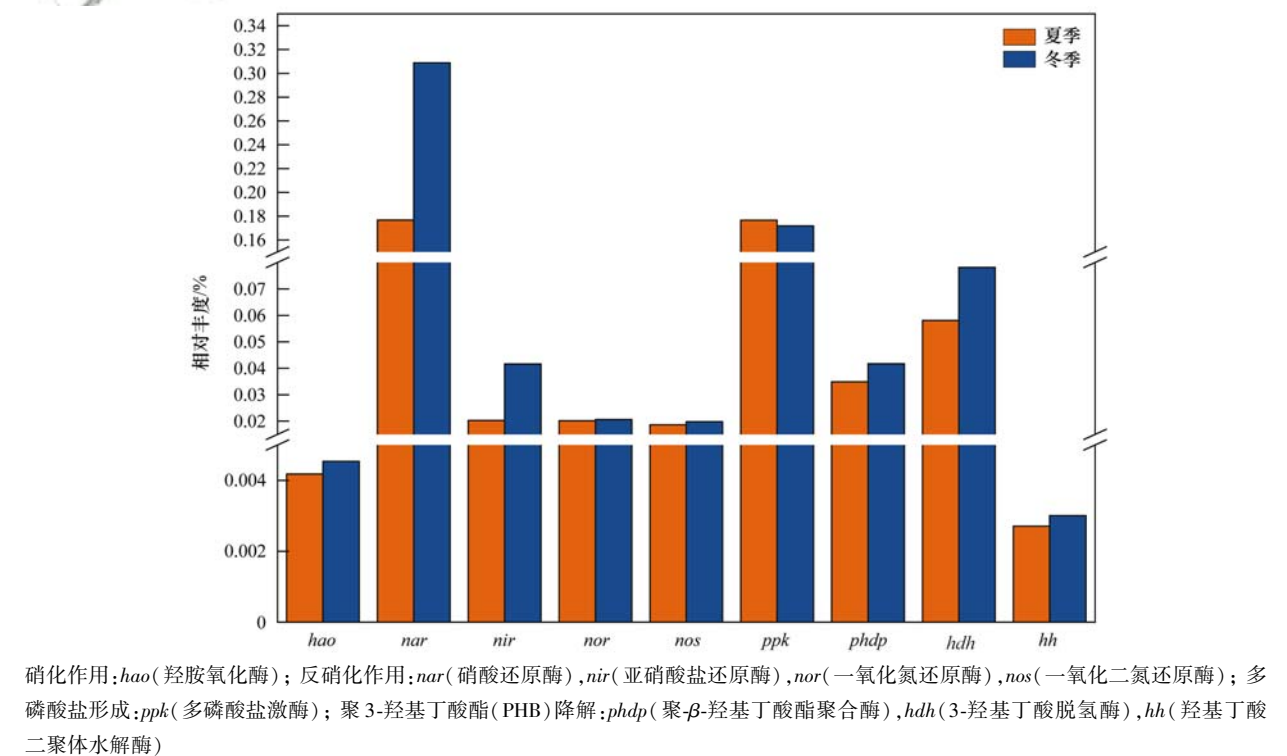
水厂名称	分组编号	采样水温/℃	进水/mg·L ⁻¹				出水/mg·L ⁻¹				去除率/%			
			COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
A	AS	24.3	632	33.5	48.6	8.9	12	0.3	12.6	0.2	98	99	74	98
A	AW	16.2	600	43.3	58.2	8.1	14	0.4	10.2	0.2	98	99	82	98
B	BS	24.3	480	34.3	45.1	6.1	12	0.3	10.0	0.1	98	99	78	98
B	BW	16.5	597	42.3	59.7	8.5	13	0.4	10.2	0.1	98	99	83	99
C	CS	27.4	370	30.6	43.4	5.2	15	0.3	10.3	0.1	96	99	76	98
C	CW	15.7	545	38.2	51.2	4.7	21	0.4	12.5	0.1	96	99	76	98
D	DS	24.9	300	48.0	58.2	4.0	13	0.3	8.5	0.2	96	99	85	95
D	DW	19.6	700	59.6	73.1	7.8	15	0.4	9.9	0.1	97	99	86	99
E	ES	24.4	317	34.5	45.2	4.6	12	0.2	8.5	0.2	96	99	81	96
E	EW	16.4	501	47.5	58.6	5.8	12	0.3	9.9	0.1	98	99	83	98



响污水厂活性污泥中细菌微生物群落.除 D 水厂样本,其它水厂夏季样本与 COD 负相关与其它理化因子正相关,而冬季的大部分样本与进水污染物浓度正相关与温度负相关.硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)、*SJA-15* 和 COD 正相关,与其它理化因子负相关,*Nitrospira* 与 TN 的浓度呈负相关的原因可能是 *Nitrospira* 类 NOB 在底物氮浓度非常低的时候更有竞争力^[32]; *Blastocatellaceae* 和甲基娇养杆菌属(*Methylobacterium*)等更多菌属和 COD 负相关,与其它理化因子正相关.

2.5 温度对污水处理厂活性污泥中关键功能酶的影响

图 5 展示了基于 PICRUST 预测分析的冬夏季污水处理所关注的 5 种代谢功能酶的相对丰度.基于氮和磷去除相关功能酶预测,与氨氧化细菌相



硝化作用:*hao*(羟胺氧化酶);反硝化作用:*nar*(硝酸还原酶),*nir*(亚硝酸盐还原酶),*nor*(一氧化氮还原酶),*nos*(一氧化二氮还原酶);多磷酸盐形成:*ppk*(多磷酸盐激酶);聚 3-羟基丁酸酯(PHB)降解:*phdp*(聚-β-羟基丁酸酯聚合酶),*hdh*(3-羟基丁酸脱氢酶),*hh*(羟基丁酸二聚体水解酶)

关的羟胺氧化酶(*hao*)的相对丰度在冬夏两季无显著性差异,但是冬季与反硝化相关酶的相对丰度有两组更高.对于磷的去除,多磷酸盐形成酶的相对丰度在冬夏两季无显著性差异,聚 3-羟基丁酸酯(PHB)降解的酶在冬季相对丰度更高.冬季北方污水厂活性污泥浓度在 $4\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,夏季污泥浓度在 $3\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,有研究表明污泥浓度会影响活性污泥中微生物功能基因丰度,具有高污泥浓度的活性污泥中硝化酶、反硝化酶、氨化酶的相关功能基因高于低污泥浓度污泥^[25].功能酶的预测分析表明,冬季污水处理厂活性污泥中参与氮循环关键酶丰度要高于夏季,一方面是因为冬季活性污泥浓度较高,另一面是参与氮循环的一些菌属如 *Nitrospira* 等生长温度较广^[24].在此基础,通过微生物群落结构分析及功能预测剖析污水处理厂性能仍需进一步研究.

3 结论

(1)细菌群落的 α 多样性分析表明,温度影响污水处理厂活性污泥中细菌微生物群落多样性且低温降低微生物多样性.

(2)微生物群落物种结构分析表明,细菌群落物种组成受温度、污水处理厂处理工艺和进水水质的影响,不同污水处理厂主要优势菌属的相对丰度存在极显著性差异,而同一污水处理厂不同处理单元(厌氧池、缺氧池和好氧池)中活性污泥细菌微生物群落结构相似.夏季主要优势菌属 *SJA-15*、*Ferruginibacter* 和 *Blastocatellaceae* 的相对丰度分别为 6.07%、4.50% 和 4.44%,冬季主要优势菌属 *Nitrospira*、*Methylothera* 和 *RBG-13-54-9* 的相对丰度分别为 10.17%、3.96% 和 3.28%.

(3)环境因子关联分析表明:温度、TN、 NH_4^+-N 、TP 和 COD 是影响微生物群落结构的主要环境因子,并且在这些环境因子中,温度对物种组成影响最大,其次是 TN,此结果进一步表明,温度和污水处理厂进水水质均会影响细菌群落.

(4)功能酶的预测分析表明冬季污水处理厂活性污泥中参与氮循环关键酶丰度要高于夏季.

参考文献:

- [1] 秦文韬, 张冰, 孙晨翔, 等. 城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2368-2374.
Qin W T, Zhang B, Sun C X, *et al.* Characteristics and regional heterogeneity of eukaryotic microbial community in wastewater treatment plants[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2368-2374.
- [2] Chen Y W, Lan S H, Wang L H, *et al.* A review: driving factors and regulation strategies of microbial community structure and dynamics in wastewater treatment systems [J]. Chemosphere, 2017, **174**: 173-182.
- [3] Shu D T, He Y L, Yue H, *et al.* Metagenomic and quantitative insights into microbial communities and functional genes of nitrogen and iron cycling in twelve wastewater treatment systems [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **290**: 21-30.
- [4] 吴成强, 杨金翠, 杨敏, 等. 运行温度对活性污泥特性的影响[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(9): 5-7.
Wu C Q, Yang J C, Yang M, *et al.* Effect of operating temperature on characteristics of activated sludge [J]. China Water & Wastewater, 2003, **19**(9): 5-7.
- [5] Rittmann B E, Hausner M, Löffler F, *et al.* A vista for microbial ecology and environmental biotechnology [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(4): 1096-1103.
- [6] Amann R I, Ludwig W, Schleifer K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation[J]. Microbiological Reviews, 1995, **59**(1): 143-169.
- [7] Álvarez J A, Ruiz I, Gómez M, *et al.* Start-up alternatives and performance of an UASB pilot plant treating diluted municipal wastewater at low temperature [J]. Bioresource Technology, 2006, **97**(14): 1640-1649.
- [8] Wang X H, Wen X H, Xia Y, *et al.* Ammonia oxidizing bacteria community dynamics in a pilot-scale wastewater treatment plant [J]. PLoS One, 2012, **7**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0036272.
- [9] Zhang T, Shao M F, Ye L. 454 pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants[J]. The ISME Journal, 2012, **6**(6): 1137-1147.
- [10] Ju F, Guo F, Ye L, *et al.* Metagenomic analysis on seasonal microbial variations of activated sludge from a full-scale wastewater treatment plant over 4 years [J]. Environmental Microbiology Reports, 2014, **6**(1): 80-89.
- [11] Saunders A M, Albertsen M, Vollertsen J, *et al.* The activated sludge ecosystem contains a core community of abundant organisms[J]. The ISME Journal, 2016, **10**(1): 11-20.
- [12] 夏瑜. 城市污水处理系统微生物多样性和时间动态变化[D]. 北京: 清华大学, 2016.
Xia Y. Diversity and temporal assembly patterns of microbial communities in municipal wastewater treatment systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [13] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. Nature Methods, 2010, **7**(5): 335-336.
- [14] Edgar R C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST[J]. Bioinformatics, 2010, **26**(19): 2460-2461.
- [15] Fang D X, Zhao G, Xu X Y, *et al.* Microbial community structures and functions of wastewater treatment systems in plateau and cold regions [J]. Bioresource Technology, 2018, **249**: 684-693.
- [16] Langille M G I, Zaneveld J, Caporaso J G, *et al.* Predictive functional profiling of microbial communities using 16S rRNA marker gene sequences [J]. Nature Biotechnology, 2013, **31**(9): 814-821.
- [17] Curtis T P, Sloan W T, Scannell J W. Estimating prokaryotic diversity and its limits[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, **99**(16): 10494-10499.
- [18] 张恩华, 戴幼芬, 肖勇, 等. 还原 Cr(VI) 的混菌胞外聚合物和细菌群落结构分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 352-357.

- Zhang E H, Dai Y F, Xiao Y, *et al.* Analysis of extracellular polymeric substances and bacterial community in mixed cultures for Cr(VI) reduction[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 352-357.
- [19] Zhou Z, Qiao W M, Xing C, *et al.* Microbial community structure of anoxic-oxic-settling-anaerobic sludge reduction process revealed by 454-pyrosequencing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **266**: 249-257.
- [20] Ma S J, Ding L L, Huang H, *et al.* Effects of DO levels on surface force, cell membrane properties and microbial community dynamics of activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 645-652.
- [21] Hu M, Wang X H, Wen X H, *et al.* Microbial community structures in different wastewater treatment plants as revealed by 454-pyrosequencing analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **117**: 72-79.
- [22] Ye L, Shao M F, Zhang T, *et al.* Analysis of the bacterial community in a laboratory-scale nitrification reactor and a wastewater treatment plant by 454-pyrosequencing [J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4390-4398.
- [23] Thomas F, Hehemann J H, Rebuffet E, *et al.* Environmental and gut *Bacteroidetes*: the food connection [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2011, **2**, doi: 10.3389/fmicb.2011.00093.
- [24] 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 等. 冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1002-1008.
- Huang F, Mei X J, Wang Z W, *et al.* Diversity of operation performance and microbial community structures in MBRs and CAS processes at low temperature[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1002-1008.
- [25] 罗晓, 郑向阳, 赵丛丛, 等. A/O 工艺中污泥浓度对微生物群落结构的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(1): 275-283.
- Luo X, Zheng X Y, Zhao C C, *et al.* Effects of sludge concentration on microbial community structure in A/O process [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(1): 275-283.
- [26] 隋天娥. 耐冷菌处理低温生活污水的实验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [27] Zhang L, Shen Z, Fang W K, *et al.* Composition of bacterial communities in municipal wastewater treatment plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **689**: 1181-1191.
- [28] 马美玲, 刘永军, 左丽丽, 等. A²/O 工艺中微生物群落结构分析[J]. *山西化工*, 2008, **28**(2): 11-13, 60.
- Ma M L, Liu Y J, Zuo L L, *et al.* Analysis on microbial community structure in A²/O process [J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2008, **28**(2): 11-13, 60.
- [29] Miłobędzka A, Muszyński A. Can DNA sequencing show differences between microbial communities in Polish and Danish wastewater treatment plants? [J]. *Water Science & Technology*, 2017, **75**(6): 1447-1454.
- [30] 叶佳松. 光暗环境下活性污泥的生长衰减与污染物去除研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- Ye J S. Study on growth and attenuation characteristics and pollutant removal of activated sludge in light and dark environment[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [31] Wang X H, Hu M, Xia Y, *et al.* Pyrosequencing analysis of bacterial diversity in 14 wastewater treatment systems in China [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(19): 7042-7047.
- [32] Wagner M, Loy A, Nogueira R, *et al.* Microbial community composition and function in wastewater treatment plants [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2002, **81**(1-4): 665-680.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)