

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期  
Vol.42 No.8

目次

|                                                                  |                                                                |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 .....                                           | 严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)                                   |
| 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 .....                                   | 王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)                 |
| 重庆市主城区 O <sub>3</sub> 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析 .....                | 李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)           |
| 汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性 .....                                  | 陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)                                 |
| 2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析 .....                                    | 毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)                                             |
| 北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 .....                                     | 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)                     |
| 郑州市 PM <sub>2.5</sub> 组分、来源及其演变特征 .....                          | 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)                             |
| 上海市 PM <sub>2.5</sub> 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应 .....             | 程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)                                        |
| 粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 .....                                            | 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)                                 |
| 河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征 .....                             | 高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)                    |
| 广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险 .....                                 | 刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)                         |
| 天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 .....                               | 武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)                              |
| 河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征 .....                                         | 杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)                                    |
| 重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征 .....                                | 周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)                                       |
| 城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征 .....                                     | 俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)                   |
| 白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征 .....                               | 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)                |
| 夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化 .....                                     | 宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)                                         |
| 洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素 .....                                        | 陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)                         |
| 农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响 .....                              | 罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)                                        |
| 沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 .....                                           | 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)                                         |
| 微塑料对海水抗生素抗性基因的影响 .....                                           | 周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)                                           |
| 磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用 .....                            | 王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)                                           |
| 潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果 .....                               | 程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)                        |
| 三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价 .....                                 | 黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)             |
| 长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 .....                                    | 李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)                                           |
| 淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析 .....                               | 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)                                       |
| DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制 .....                                    | 丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)                      |
| 市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性 .....                             | 王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)                                           |
| 亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响 .....                                | 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)                                         |
| A <sup>2</sup> /O 与倒置 A <sup>2</sup> /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析 .....   | 李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)                                        |
| 厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析 .....                           | 闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)                    |
| 活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析 .....                                    | 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)                                   |
| 汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析 .....                                       | 朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)                         |
| 基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析 .....                    | 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)                                 |
| 典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价 .....                            | 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)                   |
| 大气 CO <sub>2</sub> 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N <sub>2</sub> O 排放的影响 ..... | 于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)                          |
| 椰糠生物炭对热区双季稻田 N <sub>2</sub> O 和 CH <sub>4</sub> 排放的影响 .....      | 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)                        |
| 不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N <sub>2</sub> O 排放的影响 .....              | 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)                   |
| 物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应 .....                                    | 杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)                                      |
| 来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析 .....                                     | 秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)                  |
| 黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应 .....                                | 林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)                   |
| 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响 .....                             | 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)                        |
| 镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响 .....                                 | 陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997) |
| 岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征 .....                                       | 周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)                             |
| 锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制 .....                                      | 刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)                             |
| 不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响 .....                                  | 王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)                             |
| 4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制 .....                                | 丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)                                       |
| 叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响 .....                                    | 张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)                       |
| 镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响 .....                                         | 刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)                              |
| 中国造纸业物质代谢演化特征 .....                                              | 刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)                                        |
| 《环境科学》征订启事 (3651)                                                | 《环境科学》征稿简则 (3718)                                              |
| 信息 (3836, 3885, 3893)                                            |                                                                |

# 活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析

马切切<sup>1</sup>, 袁林江<sup>1,2\*</sup>, 牛泽栋<sup>1</sup>, 赵杰<sup>1</sup>, 黄崇<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学陕西省环境重点实验室, 西安 710055; 2. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

**摘要:** 对已发表的 62 个来自国内外污水处理设施中活性污泥的 16S rRNA 扩增子数据进行数据挖掘和分析, 旨在揭示不同进水性质、温度及处理工艺对应的污泥菌群结构特性。结果表明, 活性污泥中整体有着较高的物种多样性和群落丰富度, 不同活性污泥样品微生物群落结构有一定差异, 样品中常见的优势菌属有 *Thauera*、*Nitrospira*、*Comamonas*、*Dechloromonas*、*Rhodoferrax*、*Aquihabitans* 和 *Acidovorax* 等。温度与 *Nitrospira*、*Aquihabitans*、*Terrimonas* 和 *Dechloromonas* 等多种关键的脱氮微生物呈负相关, 当温度低于 15℃ 时, 32 座污水处理厂对 TN 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除率仅有 49.67% 和 63.19%。BOD<sub>5</sub>/COD 值越大的污水处理系统, *Zoogloea*、*Arcobacter*、*Acidovorax* 和 *Acinetobacter* 等优势功能性菌属相对丰度也越高, 污染物的去除率也越高。对于生活污水的处理, A<sup>2</sup>O 工艺性能要优于 OD、CAS 和 CMAS 工艺, *Comamonas*、*Rhodoferrax*、*Nitrospira* 和 *Novosphingobium* 等多种功能性优势菌属的相对丰度要高于其它 3 类工艺。

**关键词:** 污水处理厂; 活性污泥; 16S rRNA; 微生物群落; 环境因素

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3886-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202012191

## Microbial Community Structure of Activated Sludge and its Response to Environmental Factors

MA Qie-qie<sup>1</sup>, YUAN Ling-jiang<sup>1,2\*</sup>, NIU Ze-dong<sup>1</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>, HUANG Chong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Environmental Engineering of Shaanxi Province, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** By mining and analyzing the published 16S rRNA amplification data of activated-sludge from 32 sewage and waste-water treatment facilities, at home and abroad, this study examines the microbial structure of sludge and its response to inflow water quality, temperature, and treatment type. Activated sludge generally shows high species diversity and community richness. Many activated sludge samples contain different microbial community structures. In these samples, the dominant bacteria included *Thauera*, *Nitrospira*, *Comamonas*, *Dechloromonas*, *Rhodoferrax*, *Aquihabitans*, and *Acidovorax*. Temperature was negatively correlated with several key denitrifying microorganisms, such as *Nitrospira*, *Aquihabitans*, *Terrimonas*, and *Dechloromonas*. When temperatures were lower than 15℃, the corresponding removal rates of TN and  $\text{NH}_4^+$ -N in the 32 sewage treatment plants only reached 49.67% and 63.19%, respectively. With higher BOD<sub>5</sub>/COD values, these sewage treatment systems exhibited improved biodegradability performances. With higher relative abundances of advantageous functional bacteria, such as *Zoogloea*, *Arcobacter*, *Acidovorax*, and *Acinetobacter*, pollutant-removal rates would increase accordingly. As for domestic-sewage treatments, the performance of the A<sup>2</sup>O process is superior to that of the OD, CAS, and CMAS processes. Additionally, the relative abundances of multiple functional dominant bacteria, including *Comamonas*, *Rhodoferrax*, *Nitrospira*, and *Novosphingobium*, were significantly higher in sludge treated with the A<sup>2</sup>O process than in sludge treated with the other three processes.

**Key words:** wastewater treatment plants; activated sludge; 16S rRNA; microbial community; environmental factors

在污水生物处理过程中,微生物通过不同的代谢途径实现水中污染物转化和降解,从而实现净化作用。其中关键微生物决定了污染物的去除与功能的实现关系,群落结构直接影响着活性污泥处理系统的稳定性和处理效率,而进水性质、工艺组成和温度等是系统微生物群落结构变化的重要驱动因素<sup>[1-4]</sup>;但目前活性污泥微生物群落结构解析,功能性微生物与进水性质和工艺组成等环境因素之间的关联研究依旧匮乏。

近年来,随着测序技术的飞速发展,基于 16S rRNA 标记基因的扩增子分析方法被广泛应用于活性污泥样品并产生了大量的有关生物处理系统

中微生物的数据,这些微生物数据对于进一步认识活性污泥微生物群落结构,阐明微生物与环境间的相互作用关系具有重要意义<sup>[5]</sup>。Tian 等<sup>[6]</sup>基于来自 GenBank 和 MG-RAST 等已发表的 16S rRNA 高通量测序数据对世界各地不同污水处理厂的微生物群落进行了分析,结果认为气候是影响污泥微生物群落的关键因素。从生态学的角度来看,气候应该是通过水温对污水生物处理中微生物菌群产生影响的,众

收稿日期: 2020-12-20; 修订日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878538)

作者简介: 马切切(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染处理, E-mail: 1259865310@qq.com

\* 通信作者, E-mail: yuanlinjiang@xauat.edu.cn

所周知,(水)温度毫无疑问对微生物的代谢活性有着直接而显著的影响.除此之外,进水性质也应该是影响活性污泥微生物群的另一关键因素,但目前尚缺少这方面详细定量化的研究.本研究利用多个已发表的活性污泥微生物数据进行统计分析,旨在更准确探究活性污泥系统微生物群落结构及其与进水性质、工艺组成和温度等关键环境因素的响应关系,进一步提升人们对污水处理系统的主体特征菌群、净化性能及与环境关系的认识.

1 材料与方法

1.1 污水处理厂选择

利用污水处理厂、菌群结构、16S rRNA 和环境因子等关键词在 SCIE、Elsevier ScienceDirect、

SpiScholar 学术资源在线和 Engineering Village 数据库上进行文献搜索以获取公共可用的污水处理厂数据,污水处理厂选择标准如下:①采用生物处理工艺的污水处理厂;②研究采用基于 16S rRNA 标记基因的扩增子分析方法;③测序的原始数据必须在公共数据库中具有有效编号,如 SRA(序列读取存档)、GenBank 和 MG-RAST 等;④具有具体的水质数据和操作参数.最终根据以上标准共选出了来自 7 个国家的 32 座污水处理厂(部分污水处理厂包含 2~5 个平行样品,共有 62 个活性污泥样品),其中生活污水处理厂 28 个(包含活性污泥样品 40 个)和工业废水处理厂 14 个(包含活性污泥样品 22 个),污水处理厂具体特征及样品有效编号见表 1.

表 1 32 个污水处理厂运行特点<sup>1)</sup>  
Table 1 Characteristics of 32 wastewater treatment plants

| 污水处理厂 | 位置   | 样品                  | 废水类型 | T    | COD <sub>in</sub> | COD <sub>eff</sub> | BOD <sub>in</sub> | BOD <sub>eff</sub> | TN <sub>in</sub> | TN <sub>eff</sub> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N <sub>in</sub> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N <sub>eff</sub> | 文献   |
|-------|------|---------------------|------|------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|------|
| D1    | 中国   | D10、D11、D12、D20     | 生活污水 | 22.0 | 150.0             | 25.0               | 90.0              | 15.0               | 44.9             | 4.4               | 40.0                                          | 2.4                                            | [7]  |
| D2    | 中国   | D21、D22、D30         | 生活污水 | 21.0 | 227.0             | 20.0               | 127.0             | 11.2               | 49.0             | 4.5               | 44.0                                          | 3.2                                            |      |
| D3    | 中国   | D31、D32、D40         | 生活污水 | 29.8 | 180.0             | 22.0               | 104.5             | 12.8               | 30.5             | 3.8               | 26.0                                          | 2.8                                            |      |
| D4    | 中国   | D41、D42             | 生活污水 | 23.0 | 222.0             | 18.2               | 125.0             | 10.2               | 18.2             | 4.2               | 13.9                                          | 1.3                                            |      |
| D5    | 中国   | D50                 | 生活污水 | 28.0 | 103.4             | 17.9               | 67.3              | 12.0               | 15.0             | 4.5               | 10.9                                          | 1.6                                            |      |
| D6    | 中国   | D60                 | 生活污水 | 17.7 | 340.0             | 32.4               | 182.3             | 17.4               | 38.2             | 5.3               | 33.5                                          | 1.3                                            |      |
| D7    | 加拿大  | D70                 | 工业废水 | 23.0 | 260.0             | 16.0               | 60.0              | 4.0                | 8.3              | 4.1               | 4.3                                           | 0.2                                            | [8]  |
| D8    | 加拿大  | D80                 | 工业废水 | 23.0 | 233.0             | 25.0               | 146.0             | 4.0                | 10.2             | 5.3               | 6.2                                           | 1.3                                            |      |
| A1    | 中国   | A10、A11             | 生活污水 | 13.0 | 130.0             | 7.6                | 80.0              | 3.7                | 15.5             | 1.7               | 6.0                                           | 0.5                                            | [9]  |
| A2    | 中国   | A20                 | 生活污水 | 25.5 | 102.0             | —                  | —                 | —                  | —                | —                 | 7.9                                           | —                                              | [10] |
|       |      | A21                 |      |      | 170.0             | —                  | —                 | —                  | —                | —                 | 9.4                                           | —                                              |      |
| A3    | 中国   | A30                 | 生活污水 | 27.5 | 95.5              | —                  | —                 | —                  | —                | —                 | 9.4                                           | —                                              |      |
|       |      | A31                 |      |      | 165.5             | —                  | —                 | —                  | —                | —                 | 36.9                                          | —                                              |      |
| A4    | 中国   | A40                 | 生活污水 | 29.1 | 624.0             | 54.0               | 402.0             | 22.0               | —                | —                 | 37.0                                          | 1.2                                            | [11] |
| A5    | 中国   | A50                 | 生活污水 | 30.5 | 133.0             | 12.0               | 59.0              | 8.0                | —                | —                 | 15.0                                          | 2.0                                            |      |
| A6    | 中国   | A60                 | 生活污水 | 30.7 | 149.0             | 10.0               | 77.0              | 9.0                | —                | —                 | 26.0                                          | 2.0                                            |      |
| A7    | 中国   | A70                 | 生活污水 | 30.3 | 167.0             | 18.0               | 99.0              | 7.0                | —                | —                 | 20.0                                          | 1.0                                            |      |
| A8    | 中国   | A80                 | 工业废水 | 27.6 | 2 000.0           | 65.0               | 1 300.0           | 14.0               | —                | —                 | 16.0                                          | 1.7                                            |      |
| A9    | 中国   | A90                 | 工业废水 | 25.0 | 830.0             | 71.0               | 580.0             | 20.0               | —                | —                 | 600.0                                         | 31.0                                           |      |
| A10   | 中国   | A100                | 工业废水 | 24.5 | 650.0             | 48.1               | 457.0             | 10.0               | —                | —                 | 41.0                                          | 3.0                                            |      |
| A11   | 中国   | A110                | 工业废水 | 24.8 | 316.0             | 23.0               | 152.0             | 11.0               | —                | —                 | 36.0                                          | 2.7                                            |      |
| S1    | 中国   | S10                 | 工业废水 | 24.5 | 450.0             | 80.0               | 36.0              | 34.0               | —                | —                 | 380.0                                         | 41.0                                           |      |
| S2    | 中国   | S20                 | 工业废水 | 24.7 | 547.0             | 80.0               | 47.0              | 44.0               | —                | —                 | 380.0                                         | 39.0                                           |      |
| S3    | 中国   | S30                 | 工业废水 | 28.7 | 374.0             | 39.0               | 243.0             | 15.0               | —                | —                 | 3.0                                           | 1.0                                            |      |
| S4    | 中国   | S40、S50             | 工业废水 | 28.9 | 130.0             | 53.0               | 76.0              | 8.0                | —                | —                 | 132.0                                         | 32.0                                           | [12] |
| S5    | 澳大利亚 | S51、S52、C10         | 工业废水 | 22.0 | 740.0             | 4.4                | 340.0             | 2.0                | 58.9             | 5.2               | 44.6                                          | 1.6                                            |      |
| C1    | 中国   | C11、C12、C20         | 生活污水 | 28.3 | 180.0             | 12.0               | 90.0              | 4.4                | 40.0             | 6.8               | 25.0                                          | 5.5                                            |      |
| C2    | 新加坡  | C21、C22、M10         | 生活污水 | 28.0 | 500.0             | 40.0               | 200.0             | 28.0               | 42.0             | 7.7               | 32.0                                          | 4.4                                            |      |
| M1    | 丹麦   | M11、M12、M20         | 生活污水 | 19.0 | 660.0             | 44.0               | 280.0             | 36.0               | 57.0             | 3.5               | 39.0                                          | 0.2                                            |      |
| M2    | 美国   | M21、M22、M23         | 生活污水 | 8.0  | 133.6             | 16.0               | 240.0             | 33.0               | 26.0             | 18.9              | 21.6                                          | 14.6                                           |      |
| G1    | 巴西   | G10、G11、G12         | 生活污水 | 25.0 | 410.0             | 28.3               | 240.0             | 12.5               | 30.5             | 20.2              | 23.5                                          | 15.4                                           |      |
| G2    | 澳大利亚 | G20、G21、G22、G23、G24 | 工业废水 | 14.0 | 1001.1            | 17.4               | 460.0             | 8.0                | 60.0             | 32.6              | 32.5                                          | 21.4                                           |      |
| O1    | 中国   | O10、O11             | 工业废水 | 8.0  | 437.0             | 97.0               | 148.0             | 8.1                | 77.5             | 27.1              | 59.7                                          | 1.2                                            | [13] |
| O2    | 中国   | O20、O21             | 工业废水 | 14.0 | 120.0             | —                  | 294.0             | —                  | —                | —                 | 38.9                                          | —                                              |      |

1) T 表示温度,单位为℃,水质单位均为 mg·L<sup>-1</sup>;污水处理厂 D1~D8 采用 OD 工艺,A3~A11 采用 A<sup>2</sup>O 工艺,S1~S5 采用 SBR 工艺,C1 和 C2 采用 CAS 工艺,M1 和 M2 采用 CMAS 工艺,G1 和 G2 采用 CSAS 工艺,A1 和 A2 采用 A/O 工艺;“—”表示文章中没有相关数据

## 1.2 样品原始数据处理

将 32 个污水处理厂的 62 个活性污泥样品原始测序数据从 NCBI 中下载,使用 USEARCH 处理扩增子分析数据,具体处理流程如下<sup>[14]</sup>:①将双端序列合并为单端的扩增子序列,将 Barcode 序列从样品序列中拆除并切除样品中扩增时使用的引物序列;②继续使用 Usearch 对样品的序列去冗余并筛选高丰度,以降低下游计算量;③使用 unoise3 非聚类算法去噪,包括去除了测序错误的序列,嵌合体序列,Phix 污染序列以及低复杂度等序列,然后构建 OTU 表,62 个样品共获得了 12 356 条代表性序列;④采用 RDP classifier 贝叶斯分类算法将获得的 12 356 条代表性序列和 RDP 数据库进行比对,进行物种分类学注释<sup>[15]</sup>。

## 1.3 统计分析

对 32 个污水处理厂活性污泥样品的多样性、门和属水平优势物种进行可视化分析,以探究污水生

物处理系统微生物群落结构。在微生物门水平上,采用 R 语言进行 RDA 冗余分析,在属水平上,利用 SPSS 进行相关性 Spearman 分析,以探究微生物群落结构和 4 项变量(进水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度、可生化性指标  $\text{BOD}_5/\text{COD}$ 、温度)以及污染物去除效率之间的响应关系。对生活污水不同工艺类型活性污泥样品的优势菌属进行分析,探究工艺类型对微生物群落结构及污染物去除率的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污水处理中微生物多样性及群落结构分析

#### 2.1.1 活性污泥系统微生物多样性分析

利用 USEARCH 对原始数据处理后,得到了每个污水处理厂活性污泥样品中的 OTU 数目。基于 OTU 数据,对反应活性污泥系统中物种多样性和群落丰富度指数进行计算。32 座污水处理厂活性污泥样品的 ACE 指数和 Shannon 指数分布如表 2 所示。

表 2 活性污泥样品  $\alpha$  多样性分析

Table 2 The  $\alpha$  analysis of activated sludge samples

| 污水处理厂      | A1    | A2    | A3    | A4    | A5    | A6    | A7    | A8    | A9    | A10   | A11   | C1    | C2    | D1    | D2    | D3    |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ACE 指数     | 1 743 | 1 511 | 1 644 | 1 880 | 1 998 | 1 680 | 1 509 | 1 518 | 1 688 | 1 834 | 1 206 | 1 311 | 1 279 | 1 323 | 1 372 | 1 423 |
| Shannon 指数 | 5.27  | 5.85  | 3.92  | 4.77  | 4.92  | 4.40  | 4.90  | 3.56  | 4.76  | 3.79  | 4.82  | 3.63  | 4.27  | 4.03  | 4.46  | 4.43  |
| 污水处理厂      | D4    | D5    | D6    | D7    | D8    | G1    | G2    | M1    | M2    | O1    | O2    | S1    | S2    | S3    | S4    | S5    |
| ACE 指数     | 1 206 | 1 521 | 1 659 | 492   | 1 110 | 926   | 411   | 308   | 1 114 | 818   | 439   | 924   | 399   | 315   | 1 205 | 1 713 |
| Shannon 指数 | 4.12  | 3.97  | 4.17  | 4.62  | 4.84  | 3.88  | 3.58  | 4.66  | 3.78  | 3.03  | 3.46  | 3.43  | 3.12  | 2.97  | 3.17  | 3.62  |

在本研究中,污水处理厂活性污泥样品的 ACE 指数范围为 308 ~ 1 998,平均值为 1 233;除了 O2、S2、S3 以及 M1 等少数污水处理的 ACE 指数较低,其余大部分污水处理厂有着较高的群落丰富度,ACE 指数  $\geq 1 000$ 。32 座污水处理厂活性污泥样品的 Shannon 指数差异较小,平均值为 4.04,这与此前研究结果相似,活性污泥中拥有较高的物种多样性和群落丰富度<sup>[16]</sup>。

#### 2.1.2 活性污泥系统群落结构分析

对 32 座污水处理厂活性污泥样品门水平微生物群落结构进行分析,如图 1 所示。Proteobacteria (变形菌门)在绝大部分的污水处理厂中都占有主要地位,平均相对丰度为 52%,该菌门已经被证实是参与脱氮除磷、降解有机物的最主要菌种,其大量的存在可以保证污水处理厂活性污泥系统能够正常运行<sup>[17]</sup>;Bacteroidetes (拟杆菌门)在大部分污水处理厂中也占有相对较高的丰度,研究资料表明该菌门有利于促进含氮物质的利用、类固醇生物转化及水解大分子物质<sup>[18]</sup>;Actinobacteria (放线菌门)、Firmicutes (厚壁菌门)、Acidobacteria (酸杆菌门)、Chloroflexi (绿弯菌门)和 Nitrospirae (硝化螺旋菌

门)等微生物也是污水处理厂常见的优势菌门。

优势菌属在污水处理过程中起到重要作用,本次分析到的优势菌属有 *Thauera* (陶厄氏菌属)、*Nitrospira* (硝化螺旋菌属)、*Comamonas* (丛毛单胞菌属)、*Dechloromonas* (脱氯单胞菌属)、*Rhodoferrax* (红育菌属)和 *Acidovorax* (噬酸菌属)等微生物,这些优势菌属在 32 个污水处理厂的分布情况如图 2 所示。*Nitrospira* 是典型的亚硝酸盐氧化菌 (NOB),其作为优势菌属广泛存在于污水处理厂,在 32 个污水处理厂的平均丰度为 3.93%<sup>[19]</sup>; *Thauera* 的分布差异较大,在 6 个工业废水处理厂中都占有主导地位,在工业废水处理厂中的相对丰度要明显高于生活污水处理厂,这与已有研究结果一致, *Thauera* 具有较强的反硝化作用,且对多种芳香族污染物降解起关键作用,在工业废水处理系统占有重要地位<sup>[13]</sup>;与 *Thauera* 相反的是 *Terrimonas* 好氧反硝化菌属,该菌属在生活污水处理厂中普遍占有较高的丰度,平均相对丰度为 1.79%,而在工业废水处理厂中的平均相对丰度仅有 0.7%,远低于生活污水处理厂; *Dechloromonas*、*Rhodoferrax* 和 *Clostridium-sensu-stricto* 是具有反硝化除磷功能的菌属, *Zoogloea* 是一种兼

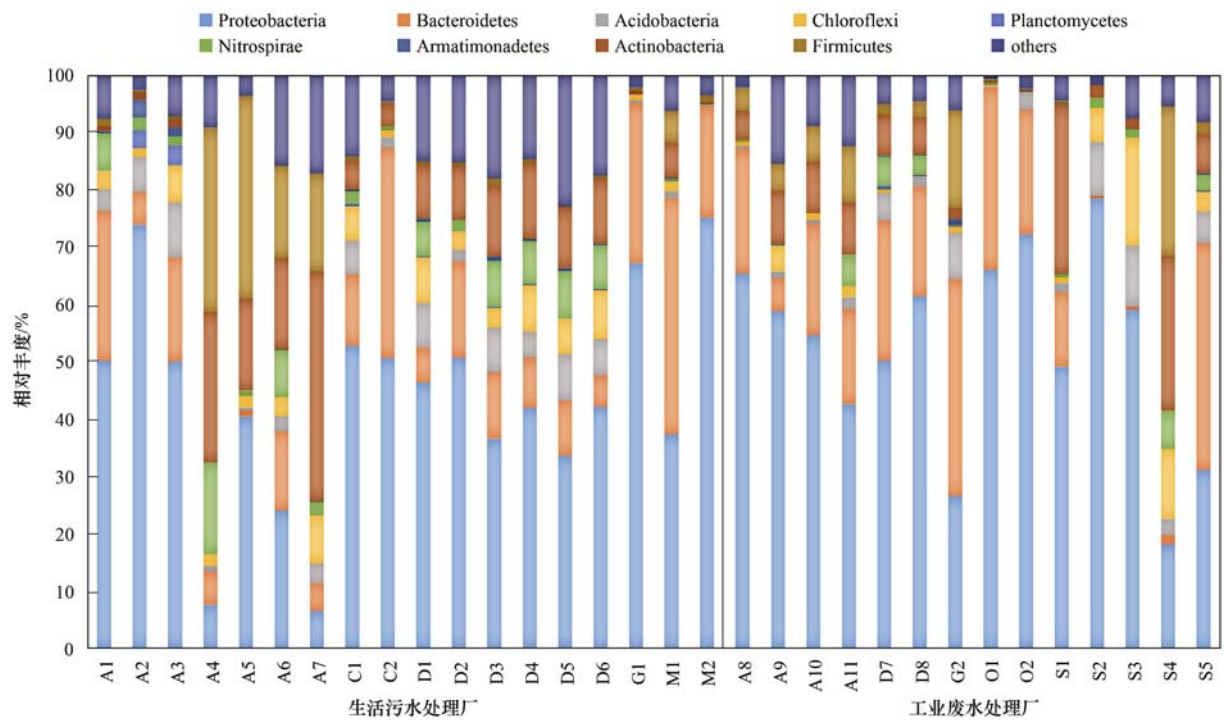


图1 污水处理厂门水平微生物菌群分布

Fig. 1 Microbial community composition at different phylum levels

性菌,可以有效去除污水中的有机物质,这些菌属普遍以及较高的丰度存在于大部分污水处理厂中,驱动着污水处理厂有机碳、氮和磷等污染物的降解与转化<sup>[20,21]</sup>.同时可以看出,不同生活污水处理厂之间的微生物群落结构较为相似,但生活污水处理厂和工业废水处理厂微生物群落结构具有较大的差异,不同工业废水处理厂之间的优势微生物菌属分布差异也较大,这是由于生活污水处理厂进水水质相似,微生物群落具有聚集的趋势,而生活污水与工业废水进水水质差异较大,不同工业废水之间来源

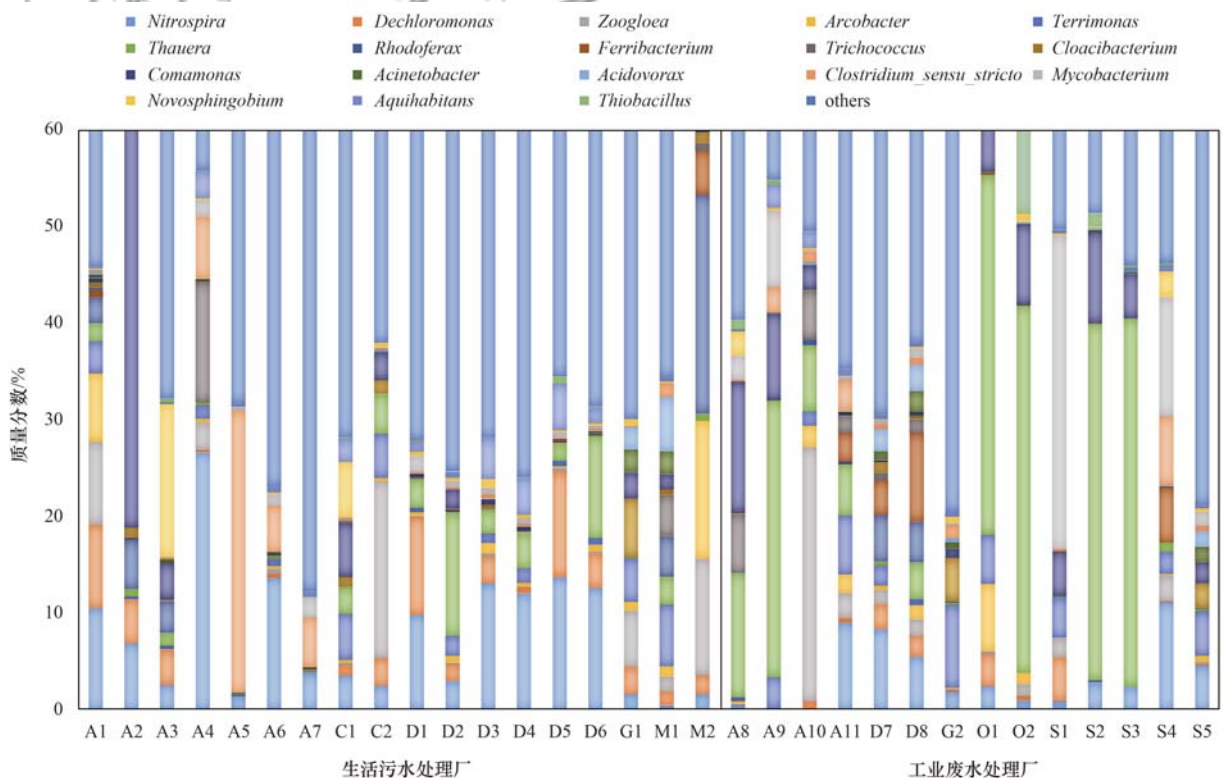


图2 污水处理厂属水平微生物菌群分布

Fig. 2 Microbial community composition at different genus levels

差异也较大,有制药废水、精细化工废水和印染废水等,使得微生物群落结构也有较大差异<sup>[21,22]</sup>.

2.2 进水性质及温度对微生物群落结构的影响

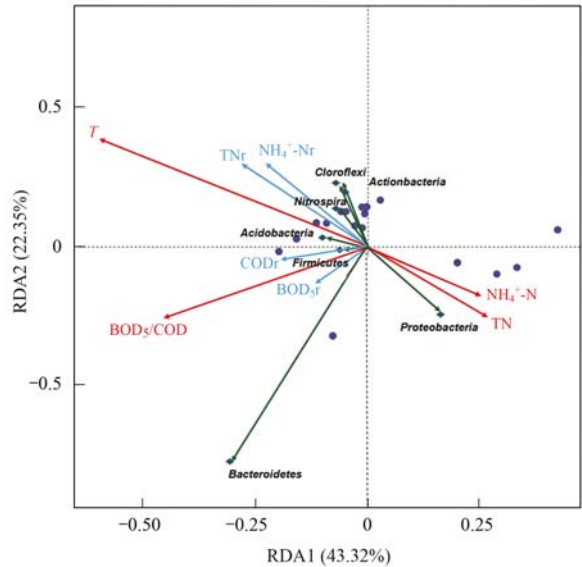
由 2.1 节的分析可知不同污水处理厂活性污泥样品的微生物群落结构具有一定的差异,为了探究进水水质以及系统温度对微生物群落结构的具体影响,在门水平上,采用 R 语言进行 RDA 冗余分析;在属水平上,利用 SPSS 对 4 项变量(进水 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度、可生化性指标 BOD<sub>5</sub>/COD、温度)和生物处理系统排名前 15 优势菌属的相关性进行 Spearman 分析.

2.2.1 温度

如图 3 和图 4 所示,相比于进水水质,温度对活性污泥样品中的优势菌门有着更大的影响. 温度与 Bacteroidetes、Firmicutes、Acidobacteria 和 Nitrospirae 等优势菌门之间均呈正相关. 在属水平上,温度对具有脱氮功能的菌属影响显著,其与 *Nitrospira*、*Aquihabitans* (放线菌属) 和 *Dechloromonas* 呈显著正相关, Spearman 相关性系数分别为 0.436、0.447 和 0.399, 与 *Ignavibacterium*、*Thiobacillus* (硫杆菌属)、*Comamonas* 和 *Terrimonas* 呈普通正相关, Spearman 相关性系数分别为 0.130、0.126、0.160 和 0.154. 温度与这些关键脱氮微生物菌属之间的关系直接决定了温度与 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效率(TNr 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nr) 均呈正相关的关系,如表 3 所示. 结合水质参数计算可得:当温度低于 15℃ 时,TNr 为 49.76%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nr 为 63.19%,当温度在 15~25℃ 之间时,TNr 为 76.90%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nr

为 84.46%,当温度在 25~31℃ 之间时,TNr 为 82.66%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nr 为 85.19%,氮的去除率随着温度的上升而增加.

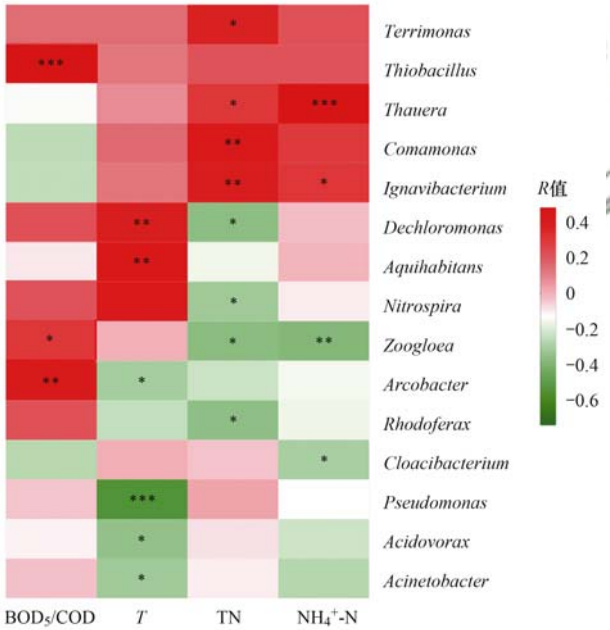
同时,由图 4 可知,*Pseudomonas* (假单胞菌属)、*Acidovorax* (食酸菌属) 和 *Acinetobacter* (不动杆菌属) 等微生物,与温度的 Spearman 相关性系数分别为 -0.548、-0.348 和 -0.210,呈显著负相关,*Pseudomonas* 是专性需氧的革兰氏染色阴性无芽胞杆菌,它能够通过好氧反硝化作用和解磷作用去除氮、磷等污染物<sup>[23]</sup>; *Acinetobacter* 是一种异养硝化好氧反硝化菌,能有效降解污水中的污染物<sup>[24]</sup>; *Acidovorax* 具有氢自养反硝化脱氮功能,也可以降解污水中难降解的有机物<sup>[25]</sup>;这些菌属在低温环境具有较强的活性,因此在面对低温脱氮效果较差问题时可以向污水处理系统投加这些菌剂以提高脱氮效率.



TNr、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nr、BOD<sub>5</sub>r 和 CODr 分别表示 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、BOD<sub>5</sub> 和 COD 的去除率

图3 活性污泥样品 RDA 分析

Fig. 3 RDA analysis of sludge samples



X 轴:环境因子,Y 轴:优势菌属;图例为 Spearman 等级相关系数(R 值);\* 表示 0.01 < P ≤ 0.05, \*\* 表示 0.001 < P ≤ 0.01, \*\*\* 表示 P ≤ 0.001

图4 进水水质和温度与优势菌属物种相关性 Heatmap 图

Fig. 4 Spearman correlation heatmap for influent and temperature with abundance of dominated bacterial community at the genus level

表3 温度与氮去除效率之间的关系/%

Table 3 Relationship between temperature and nitrogen

| 项目                               | removal efficiency/% |         |         |
|----------------------------------|----------------------|---------|---------|
|                                  | 温度范围/℃               |         |         |
|                                  | < 15                 | 15 ~ 25 | 25 ~ 31 |
| TNr                              | 49.67                | 76.90   | 82.66   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -Nr | 63.19                | 84.46   | 85.19   |

2.2.2 进水性质

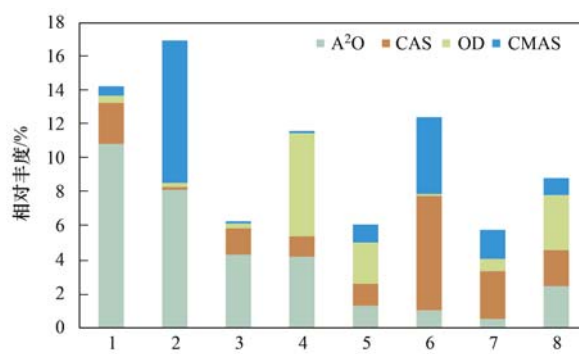
如图 3 和图 4 所示:进水 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度和可生化性指标 BOD<sub>5</sub>/COD 值均会对微生物群落结构

产生一定的影响. 可生化性指标  $BOD_5/COD$  值与污水处理厂大部分的优势菌门呈正相关, 与 *Zoogloea*、*Arcobacter* 和 *Thiobacillus* 等优势菌属呈显著正相关, 与 *Acidovorax*、*Acinetobacter*、*Terrimonas* 和 *Dechloromonas* 等优势菌属呈普通正相关, 并且其与  $BOD_5$ 、TN、COD 和  $NH_4^+-N$  氨氮的去除率均呈正相关, 因此  $BOD_5/COD$  值越大时, 污水处理系统可生化性越强, 这些优势功能性菌属在污水处理厂的相对丰度越高, 污染物的去除率也越高. 进水 TN 和  $NH_4^+-N$  浓度相较于温度和  $BOD_5/COD$  值而言, 对微生物群落的影响较小, 在门水平上, 其与 Proteobacteria 呈正相关, 与 Actinobacteria 基本没有关系, 而与 Firmicutes 和 Acidobacteria 等优势菌门呈负相关; 在属水平上, *Ignavibacterium*、*Thauera*、*Comamonas* 和 *Terrimonas* 等菌属与进水 TN 和  $NH_4^+-N$  浓度呈显著或普通正相关, 这些功能性微生物能够适应高浓度氮污染物的冲击, 维持系统运行.

### 2.3 工艺类型对微生物群落结构的影响

剔除掉由于来源不同而菌群结构波动差异较大的工业废水样品和样品含量较少的工艺, 剩余 37 个水质性质相似的生活污水样品: OD 工艺 14 个 (D10 ~ D60)、 $A^2O$  工艺 10 个样品 (A10 ~ A70)、CMAS 工艺 7 个样品 (M10 ~ M23) 和 CAS 工艺 6 个 (C10 ~ C22). 对不同工艺类型生活污水活性污泥样品中的优势微生物菌属进行分析, 如图 5 所示. 不同工艺类型活性污泥样品中的优势微生物菌属分布具有较大的差异, 大部分优势功能菌属在  $A^2O$  工艺中占有相对较高的丰度, *Comamonas*、*Rhodoferrax*、*Nitrospira* 和 *Novosphingobium* 等与脱氮除磷有关的菌属丰度要远高于其它 3 类工艺, *Terrimonas*、*Thauera* 和 *Zoogloea* 等功能性微生物也在  $A^2O$  工艺样品中占有较高的丰度, 结合图 6,  $A^2O$  工艺对生活污水中 COD、 $BOD_5$ 、TN 和  $NH_4^+-N$  的去除率分别为 92.20%、92.18%、89.04% 和 92.24%, 综合性能要优于其它 3 类工艺. OD 工艺中的主导菌属为 *Nitrospira*、*Thauera* 和 *Dechloromonas* 等关键的脱氮微生物菌属, 其 TN 去除率为 83.55%, 仅次于  $A^2O$  工艺,  $NH_4^+-N$  去除率为 92.96%, 与  $A^2O$  工艺去除率相似, 远高于 CAS 和 CMAS 两种传统活性污泥工艺, 表明 OD 工艺整体脱氮性能良好; 在 CAS 和 CMAS 两种传统的活性污泥工艺中, *Zoogloea* 菌属丰度要高于 OD 和  $A^2O$  工艺, 这可能是由于传统活性污泥法普遍存在污泥膨胀的问题, 导致 *Zoogloea* 菌属增殖<sup>[26]</sup>, 同时, 由图 6 可以看出, CAS 和 CMAS 工艺可以保证生活污水中 COD 和  $BOD_5$  的去除效果, 但对氮的去除率较低, CAS 工艺对 TN 和

$NH_4^+-N$  的去除率分别为 82.33% 和 86.13%, 低于  $A^2O$  和 OD 工艺; CMAS 工艺对生活污水中 TN 和  $NH_4^+-N$  的去除率分别为 55.83% 和 66.16%, 是 4 种工艺中脱氮效果最差的工艺.



1. *Comamonas*; 2. *Rhodoferrax*; 3. *Novosphingobium*; 4. *Nitrospira*; 5. *Dechloromonas*; 6. *Zoogloea*; 7. *Terrimonas*; 8. *Thauera*

图 5 不同工艺类型活性污泥样品属水平细菌群落组成

Fig. 5 Microbial community composition at different genus levels

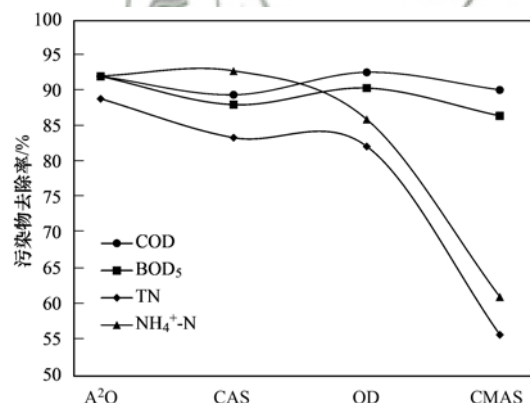


图 6 不同工艺类型对生活污水中污染物的去除率

Fig. 6 Removal rates of pollutants from domestic sewage with different processes

### 3 结论

(1) Proteobacteria 在绝大部分污水处理厂都占有主导地位, 其余污水处理厂优势菌门还有 Bacteroidetes、Actinobacteria 和 Nitrospirae 等; 污水处理厂常见优势菌属有 *Thauera*、*Nitrospira*、*Comamonas*、*Dechloromonas*、*Rhodoferrax*、*Aquihabitans* 和 *Acidovorax* 等.

(2) 进水 TN、 $NH_4^+-N$  浓度、可生化性指标  $BOD_5/COD$  和温度都会影响微生物群落结构. 温度对微生物群落结构的影响最大, 与多种脱氮微生物呈负相关, 当温度低于 15℃ 时, 32 座污水处理厂对 TN 和  $NH_4^+-N$  的去除率仅有 49.67% 和 63.19%.  $BOD_5/COD$  值越大时, 污水处理系统可生化性越强, *Zoogloea*、*Arcobacter*、*Thiobacillus*、*Acidovorax* 和 *Acinetobacter* 等优势功能性菌属在污水处理厂的相对丰度越高, 污染物的去除率也越高.

(3)对于生活污水的处理, A<sup>2</sup>O 工艺性能要优于 OD、CAS、CMAS 工艺, *Comamonas*、*Rhodoferrax*、*Nitrospira* 和 *Novosphingobium* 等多种功能性优势菌属的相对丰度要高于其他 3 类工艺,对生活污水中污染物的去除率最佳。

#### 参考文献:

- [1] 鞠峰, 张彤. 活性污泥微生物群落宏组学研究进展[J]. 微生物学通报, 2019, **46**(8): 2038-2052.
- Ju F, Zhang T. Advances in meta-omics research on activated sludge microbial community[J]. Microbiology China, 2019, **46**(8): 2038-2052.
- [2] 康小虎. 西北高原地区城市污水净化的微生物学机制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- Kang X H. The microbial mechanism underling municipal sewage treatment on sub-plateau region in northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [3] 张晓红, 姜博, 张文武, 等. 京津冀区域市政污水厂活性污泥种群结构的多样性及差异[J]. 微生物学通报, 2019, **46**(8): 1896-1906.
- Zhang X H, Jiang B, Zhang W W, et al. Microbial community diversity of activated sludge from municipal wastewater treatment plants in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Microbiology China, 2019, **46**(8): 1896-1906.
- [4] Wang Q H, Liang J H, Zhang S M, et al. Characteristics of bacterial populations in an industrial scale petrochemical wastewater treatment plant: composition, function and their association with environmental factors [J]. Environmental Research, 2020, **189**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109939.
- [5] 黄志强, 邱景璇, 李杰, 等. 基于 16S rRNA 基因测序分析微生物群落多样性[J]. 微生物学报, 2021, **61**(5): 1044-1063.
- Huang Z Q, Qiu J X, Li J, et al. Analysis of microbial community diversity based on 16S rRNA gene sequencing[J]. Microbiology China, 2021, **61**(5): 1044-1063.
- [6] Tian L, Wang L. A meta-analysis of microbial community structures and associated metabolic potential of municipal wastewater treatment plants in global scope[J]. Environmental Pollution, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114598.
- [7] Xu D, Liu S T, Chen Q, et al. Microbial community compositions in different functional zones of Carrousel oxidation ditch system for domestic wastewater treatment [J]. AMB Express, 2017, **7**(1), doi: 10.1186/s13568-017-0336-y.
- [8] Isazadeh S, Jauffur S, Frigon D. Bacterial community assembly in activated sludge: mapping beta diversity across environmental variables[J]. Microbiologyopen, 2016, **5**(6): 1050-1060.
- [9] Chen C, Peng X C, Huang S, et al. Data on microbial community composition of sludge from high altitude wastewater treatment plants determined by 16S rRNA gene sequencing[J]. Data in Brief, 2019, **23**, doi: 10.1016/j.dib.2019.103739.
- [10] Wang P, Yu Z S, Zhao J H, et al. Seasonal changes in bacterial communities cause foaming in a wastewater treatment plant[J]. Microbial Ecology, 2016, **71**(3): 660-671.
- [11] Fan X Y, Gao G F, Pan K L, et al. Functional genera, potential pathogens and predicted antibiotic resistance genes in 16 full-scale wastewater treatment plants treating different types of wastewater [J]. Bioresource Technology, 2018, **268**: 97-106.
- [12] Wu L W, Ning D L, Zhang B, et al. Global diversity and biogeography of bacterial communities in wastewater treatment plants[J]. Nature Microbiology, 2019, **4**(7): 1183-1195.
- [13] Zhang B, Xu X Y, Zhu L. Structure and function of the microbial consortia of activated sludge in typical municipal wastewater treatment plants in winter [J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-17743-x.
- [14] 刘永鑫, 秦媛, 郭晓璇, 等. 微生物组数据分析方法与应用[J]. 遗传, 2019, **41**(9): 845-862.
- Liu Y X, Qin Y, Guo X X, et al. Methods and applications for microbiome data analysis [J]. Hereditas (Beijing), 2019, **41**(9): 845-862.
- [15] 刘赛. 基于 16S rRNA 序列可变区的微生物物种鉴定及分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- Liu S. Taxonomic classification and analysis based on 16S rRNA variable regions[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [16] 樊柳. 城镇污水处理系统活性污泥性质与微生物群落结构相关性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- Fan L. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree for the Master of Engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [17] Yang C, Zhang W, Liu R H, et al. Phylogenetic diversity and metabolic potential of activated sludge microbial communities in full-scale wastewater treatment plants[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(17): 7408-7415.
- [18] Lee I S, Parameswaran P, Rittmann B E. Effects of solids retention time on methanogenesis in anaerobic digestion of thickened mixed sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(22): 10266-10272.
- [19] 包鹏, 王淑莹, 高瑶远, 等. 利用高通量测序技术分析不同溶解氧条件下硝化活性污泥的菌群结构特性[J]. 北京工业大学学报, 2017, **43**(5): 801-808.
- Bao P, Wang S Y, Gao Y Y, et al. Effect of dissolved oxygen on microbial community of nitrify activated sludge based on high-throughput sequencing technology [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, **43**(5): 801-808.
- [20] Fang H, Zhang H P, Han L X, et al. Exploring bacterial communities and biodegradation genes in activated sludge from pesticide wastewater treatment plants via metagenomic analysis [J]. Environmental Pollution, 2018, **243**: 1206-1216.
- [21] Cao J S, Zhang T, Wu Y, et al. Correlations of nitrogen removal and core functional genera in full-scale wastewater treatment plants: influences of different treatment processes and influent characteristics[J]. Bioresource Technology, 2020, **297**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122455.
- [22] Tong J, Tang A P, Wang H Y, et al. Microbial community evolution and fate of antibiotic resistance genes along six different full-scale municipal wastewater treatment processes [J]. Bioresource Technology, 2019, **272**: 489-500.
- [23] 王子寒, 赵磊, 熊民莉, 等. 甲烷为唯一电子供体驱动硝酸盐/亚硝酸盐生物还原及微生物群落结构分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(10): 3764-3771.
- Wang Z H, Zhao L, Xiong M L, et al. Methane-driven microbial nitrate/nitrite reduction and microbial community structure analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(10): 3764-3771.
- [24] 栾志翔, 吴迪, 韩文杰, 等. 北方某污水厂 MBBR 工艺升级改造后的高效脱氮除磷效果[J]. 环境工程学报, 2020, **14**(2): 333-341.
- Luan Z X, Wu D, Han W J, et al. Effect of high efficiency nitrogen and phosphorus removal in a wastewater treatment plant in north China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, **14**(2): 333-341.

- [25] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1704-1716.

Yang H, Zhang G Z, Yang X N, *et al.* Microbial community structure and diversity in cellar water by 16S rRNA high-throughput sequencing [J]. Environmental Science, 2017, 38

(4): 1704-1716.

- [26] 徐双. 活性污泥微生物群落结构及沉降性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.

Xu S. Study on microbial community structure and settling performance of activated sludge [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.

---

## 《环境科学》连续 9 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2020 年 12 月 17 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2020 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果. 《环境科学》荣获“2020 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 9 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                              |                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai .....                                                                              | YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)        |
| Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin .....                                                                                 | WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)     |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing .....                               | LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)            |
| Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry .....                                         | CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)            |
| Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei .....                                                                | MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)                              |
| Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu .....                                                                  | DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)     |
| Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou .....                                                                  | ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)     |
| High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Shanghai .....                                                             | CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)     |
| Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....                                                                                    | DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-ni, <i>et al.</i> (3652)      |
| Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019 .....                                                                      | GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)         |
| Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou .....                                                               | LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)        |
| Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin .....                                                           | WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)           |
| Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks .....                                                              | YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)             |
| Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu .....                                          | ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)     |
| Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies .....                                                         | YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)          |
| Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake .....                                      | ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)  |
| Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed .....                                                 | NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)            |
| Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake .....                                                                         | CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)             |
| Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir ..... | LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)                 |
| Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin .....                                                            | XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)             |
| Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater .....                                                                                            | ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)                 |
| Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater .....           | WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)                      |
| Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes .....                                                   | CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)          |
| Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area .....                            | HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)            |
| Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt .....                                                  | LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)                       |
| Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems .....                                                                      | LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)       |
| Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles .....                                                                                   | DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)          |
| Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent .....                                                | WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)               |
| Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System .....                                                 | WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)                |
| Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A <sup>2</sup> /O Sewage Treatment Processes in Winter .....                       | LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)             |
| Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX .....                                                      | YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)                |
| Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors .....                                                                            | MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)     |
| Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River .....                                                                                       | ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)    |
| Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model .....                                                                                           | GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)  |
| Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area .....     | TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)            |
| Effect of Elevated CO <sub>2</sub> on N <sub>2</sub> O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields .....                                                          | YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)       |
| Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas .....                                                       | WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)       |
| Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N <sub>2</sub> O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan .....                               | WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)      |
| Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings .....                                                       | YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953) |
| Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings .....                                                            | QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)   |
| Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone .....                                                | LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)       |
| Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation .....                                  | JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)           |
| Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure .....                               | CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)        |
| Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields .....                                                                                 | ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)    |
| Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site .....                                                                | LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)    |
| Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil .....                                                     | WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)       |
| Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil .....                                                                               | DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)         |
| Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice .....                                                                      | ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)   |
| Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods .....                                                     | LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)          |
| Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry .....                                                                                                    | LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)                |