

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 鄧允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤 (4413)
面向二/三维城市形态指标的 PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉 (4425)
减排背景下成都大气 PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科 (4438)
青岛秋冬季 PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰 (4448)
港口地区大气 PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏 (4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思 (4475)
北京市城区夏季 VOCs 变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影 (4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间 VOCs 组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊 (4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明 (4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建 (4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红 (4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 卓保庆, 刘操 (4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐 (4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐 (4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物 DOM 的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊 (4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞 (4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航 (4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟 (4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除 SS 和有机物性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃 (4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉 (4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟 (4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 <i>phoD</i> 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣 (4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑 (4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪 (4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯 (4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾 (4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐 (4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚 (4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水 (4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻 (4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基 (4727)
IFAS 工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰 (4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利 (4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡 (4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰 (4779)
典型城市土壤中重金属锑 (Sb) 的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏 (4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞 (4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒 (4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣 (4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠 (4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫 (4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫 (4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探索	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰 (4858)
小型养殖塘水体中 CH ₄ 、CO ₂ 和 N ₂ O 浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东 (4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢 (4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉 (4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成 (4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮 (4911)
《环境科学》征订启事 (4512) 《环境科学》征稿简则 (4735) 信息 (4696, 4790, 4887)	

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响

王伟¹, 赵中原², 张鑫¹, 由志鹏¹, 黄子晋¹, 彭永臻^{2,3,*}

(1. 黑龙江工程学院土木与建筑工程学院, 哈尔滨 150050; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150090; 3. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124)

摘要: 投加外碳源是污水厂尾水深度脱氮的重要手段。为充分对比多种碳源在极限脱氮条件下的性能及经济性, 以及碳源对微生物种群结构的影响, 选取甲醇、乙醇、葡萄糖和乙酸钠这4种单碳源, 并采用反应速率较高的乙酸钠和乙醇与价格便宜的葡萄糖配制成4种复合碳源进行研究。结果表明, 所有系统均能满足出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的要求。单碳源系统, 乙醇反应速率最快, 投加量最省, 费用最低。复合碳源系统, 乙酸钠/葡萄糖(1:1)在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 为6时, 与乙酸钠/葡萄糖(1:3)、乙醇/葡萄糖(1:1)和乙醇/葡萄糖(1:3)在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 为9、10和10时的效果相当, 且乙酸钠/葡萄糖(1:1)系统反应速率最快且经济性最好。Illumina MiSeq 高通量测序显示, 经70 d左右的运行, 微生物群落结构发生根本性变化。在与葡萄糖相关的系统, 常规脱氮系统不常见的菌门 *Candidatus Saccharibacteria*, 丰度从种泥的1.16%提高到47.37%; 相应地, 在属水平 *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis* 成为绝对优势菌种。研究结果可为污水厂尾水极限脱氮的碳源选择提供更全面的对比, 也为碳源在微生物菌群驯化方面的作用提供更多参考和借鉴。

关键词: 碳源; 反硝化; 尾水; 微生物群落; 16S rRNA

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4717-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112238

Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process

WANG Wei¹, ZHAO Zhong-yuan², ZHANG Xin¹, YOU Zhi-peng¹, HUANG Zi-jin¹, PENG Yong-zhen^{2,3,*}

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. National Engineering Laboratory of Urban Wastewater Treatment and Resource Utilization Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Adding external carbon sources is an important method for advanced nitrogen removal of secondary effluent in wastewater treatment plants (WWTPs). In order to compare the denitrification performance and economy of different carbon sources sufficiently, as well as the effect of long-term addition of carbon sources on the microbial population structure, four single carbon sources (methanol, ethanol, glucose, and sodium acetate) and four types of composite carbon sources were prepared by mixing sodium acetate and ethanol with a higher reaction rate and cheap glucose. The results showed that the effluent $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ concentration of all systems was less than $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ during the experiment. For single-carbon source systems, ethanol had the fastest denitrification rate, followed by sodium acetate and methanol; that of the glucose was the slowest. In the composite carbon source systems, the sodium acetate/glucose (1:1) with $\text{COD}/\rho(\text{N})$ was 6, which was equivalent to the results of sodium acetate/glucose (1:3), ethanol/glucose(1:1), and ethanol/glucose (1:3) with $\text{COD}/\rho(\text{N})$ of 9, 10, and 10, respectively. The sodium acetate/glucose (1:1) system had the fastest reaction rate and the best economy. High-throughput sequencing results showed that after more than 70 days of operation, the structure of the microbial community had changed completely. In the glucose-related system, the abundance of *Candidatus Saccharibacteria*, which is not popular in typical nitrogen removal systems, increased from 1.16% of seed sludge to 47.37%, and *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis* correspondingly became the dominant community. This study not only provides a more comprehensive comparison for the selection of carbon sources in WWTPs with ultimate nitrogen removal but also provides basic data for the role of carbon sources in the domestication of microbial communities.

Key words: carbon source; denitrification; secondary effluent; microbial community; 16S rRNA

随着经济的快速发展,许多发达地区的城市受纳水体发生严重污染,环境容量变得非常有限。这些地区的城市污水处理厂即使执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级A标准,氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和总氮(TN)也高于地表水Ⅴ类标准的限值,污染物的累积将使得污染难以得到控制^[1]。因此,控制城市污水处理厂出水达到国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)的Ⅲ类水质是科学可行的策略。

污水厂排放满足Ⅲ类水质要求,需达到 $\rho(\text{TN})$

$\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的极限脱氮水平。硝化良好的系统, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的完全去除不成问题,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 因受限于尾水的基质浓度,通常成为极限脱氮的难点。尾水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的深度去除常需要投加外碳源来实现。近年来,关于外碳源的研究得到广

收稿日期: 2021-12-23; 修订日期: 2022-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778216); 黑龙江省自然科学基金项目(QC2017060)

作者简介: 王伟(1979~),女,博士,教授,主要研究方向为污水深度处理及资源化, E-mail: wang_weibjtu@163.com

* 通信作者, E-mail: pyz@bjtu.edu.cn

泛关注,许多新型碳源的研究也取得一定进展. 固体碳源如天然纤维素物质^[2~4]、人工合成可降解高聚物聚己内酯(PCL)^[5]和聚丁二酸丁二醇酯(PBS)^[6]等,可实现缓慢释放并容易控制,但通常需要较长的停留时间. 以高浓度有机工业废水^[7,8]、污泥水解液^[9]、垃圾渗滤液^[10]和餐厨废弃物水解液^[11]为代表的新型液体碳源也引起广泛关注. 利用这些碳源符合可持续发展的原则,但预处理成本一般较高,投加量需精准控制,容易引入重金属和有毒物质等,不适合尾水处理. 考虑污水厂尾水深度脱氮在反应效率、安全性以及经济性等方面的要求,采用甲醇、乙醇等传统液态型单一碳源以及由这些单一碳源为基础开发的复合碳源可能是较为合适的选择^[12,13]. 单一碳源通常较容易被利用,反应速率快,但也存在缺点,如甲醇具有毒性^[14~16],乙醇运输和贮存有一定安全隐患^[17],乙酸钠价格较高^[18~20],葡萄糖反应速率较低^[13,21],以及单碳源可能仅被少量微生物利用、容易造成菌群结构丰度下降^[22]等. 而复合碳源可能会克服上述一些缺点和问题,近年来在商业碳源领域得到较多关注^[22,23],但公开数据较少. 关于单碳源和复合碳源在尾水深度脱氮系统的应用和对比研究还较少.

此外,通过投加碳源对尾水进行深度脱氮是一个长期的过程. 外碳源作为生化反应和微生物生长的基质,其对微生物种群必然存在选择作用^[12,24~26],不同菌群也会影响系统反硝化性能^[27]. 关于碳源对种群结构影响的研究还较少. 本研究针对某实际污水处理厂面临的碳源选择问题展开,为充分对比碳源的性能,选取4种单碳源和4种复合碳源,对系统反硝化性能、微生物群落结构和碳源经济性进行综合对比,以期为污水处理厂的碳源选择提供更多更全面的借鉴.

1 材料与方法

1.1 试验水质及接种污泥

本试验采用人工配水. 在实验室取自来水,加入硝酸钠作为氮源,配制微量元素浓缩储备液 I 和 II (见表1)为微生物提供必要营养,每个反应器每周周期投加浓缩储备液 I 和 II 均为 2.5 mL. 进水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 为 14.33 ~ 17.71 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 0 ~ 0.078 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 试验过程为排除自来水携带的溶解氧(DO)对缺氧反硝化的影响,投加无水亚硫酸钠脱氧. 试验种泥取自哈尔滨某城市污水处理厂二沉池,该处理厂未投加碳源,脱氮除磷性能稳定. 接种后污泥 MLSS 为 4 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MLVSS 为 1 937 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 1 矿物元素和微量元素成分

Table 1 Composition of minerals and trace elements		
微量元素浓缩液	物质	浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
I	EDTA2Na·2H ₂ O	6.37
	(C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₈ Na ₂ ·2H ₂ O)	
	FeSO ₄ ·7H ₂ O	
II	EDTA2Na·2H ₂ O	19.11
	(C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₈ Na ₂ ·2H ₂ O)	
	H ₃ BO ₄	0.014
	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.99
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.25
	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.42
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.43
	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.19
	NaSeO ₄ ·10H ₂ O	0.21
	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.22

本试验所用复合碳源按相应单碳源理论-COD当量,配制成同一浓度基准溶液(以COD计). 复合碳源的配比主要考虑配制容易、尽量增加葡萄糖比例以降低造价和突出结果差异性等问题,选择1:1和1:3两种体积比. 4种复合碳源分别为乙酸钠/葡萄糖(1:3)、乙酸钠/葡萄糖(1:1)、乙醇/葡萄糖(1:1)和乙醇/葡萄糖(1:3). 本试验过程,每周周期固定投加碳源溶液 10 mL,通过控制外碳源的质量浓度,达到不同的进水碳氮比 $\text{COD}/\rho(\text{N})$,碳源投加量的变化即体现在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 变化上.

1.2 试验装置

本试验采用8个序批式(SBR)反应器,有效容积为2 L,结构如图1所示. 8个SBR反应器分别编号为1~8号. 1~4号反应器加入单一碳源,按顺序分别为甲醇、乙醇、葡萄糖和乙酸钠;5~8号反应器投加复合碳源,按顺序分别为乙酸钠/葡萄糖(1:3)、乙酸钠/葡萄糖(1:1)、乙醇/葡萄糖(1:1)和乙醇/葡萄糖(1:3). 配有蠕动泵控制进水和外碳源,通过时间控制系统控制出水. 设置搅拌装置用于搅拌混合,在线监测pH和温度,通过PLC控制系统处理信号,通过控制系统终端监测数据.

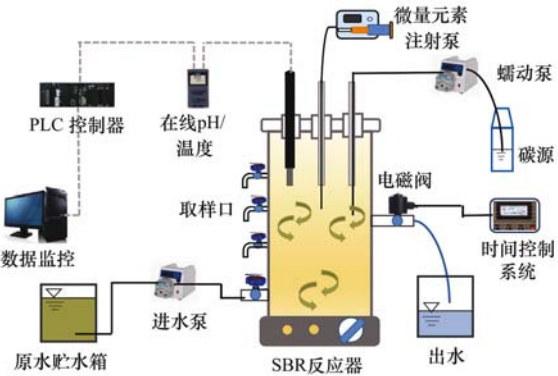


图 1 SBR 试验系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the SBR system

1.3 运行策略

(1) 碳源投加量确定 试验模拟实际污水厂经常采用的碳源投加方法和策略,即按照出水标准来调整碳源用量的反馈控制.以出水 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N}) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为处理目标,标记 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 达到 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的碳源投加量,计算反应速率和运行费用.根据文献[28,29]以及试验前期在污水厂进行的初步试验,确定单碳源系统初始 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 均为 5,复合碳源系统初始 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 均为 7.根据出水 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 来调节 $\text{COD}/\rho(\text{N})$,若出水 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 高于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,调高 $\text{COD}/\rho(\text{N})$;若出水 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,调低 $\text{COD}/\rho(\text{N})$.每次调整 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 后,系统稳定时间不少于 5 个周期.

(2) 试验时间及高通量测序 单周期运行 6 h,每天运行一周期.每周进水 10 min,缺氧搅拌 270 min,沉淀 70 min,排水 10 min,其余时间闲置,排水比 50%.全程未控制温度,水温范围 $17 \sim 19^\circ\text{C}$.试验过程不排泥,部分污泥随出水流失.单一碳源 1~4 号系统运行时间为 70 d,复合碳源 5~8 号系统,运行期为 64 d.试验初期,取种泥样品进行高通量测试;待系统稳定,单一碳源 1~4 号反应器于第 65 d 及复合碳源 5~8 号系统第 60 d 取样,对污泥样品进行高通量测试.

1.4 分析项目与测定方法

样品采用标准方法^[30]测定:COD 采用重铬酸钾快速测定法,由连华快速测定仪测定; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用 N -(1-萘基)-乙二胺光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用麝香草酚分光光度法;pH 值、ORP、DO 和温度由美国哈希在线测定仪监测.

采用 16S rRNA 高通量测序方法分析微生物种群结构.污泥取样后,使用无菌离心管离心 3 min,采用冰袋低温保存送至生工生物(上海)公司进行测序.样品 DNA 提取采用 E. Z. N. A.™ Mag-Bind Soil DNA Kit 试剂盒(OMEGA).采用通用引物 341F (CCTACGGGNGGCWGCAG) 和 805R (GACTACHVGGGTATCTAATCC) 对样品 16S rRNA 中的 V3-V4 区进行扩增.PCR 反应体系和扩增方法同文献[13]的报道.扩增后的 DNA 进行回收纯化,利用 Qubit3.0 DNA 检测试剂盒对其精确定量,最后利用 Illumina MiSeq 平台进行测序.

2 结果与讨论

2.1 不同碳源系统的脱氮性能

不同碳源系统运行周期及脱氮性能见图 2.试验结果表明,1~4 号系统在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 为 8、5、10、7 和 5~8 号系统在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 为 9、6、10、10

分别达到 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N}) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理目标.单碳源系统,2 号系统在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 为 5 时的处理效果与 1、3 和 4 号系统在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 为 8、10 和 7 时的相当.而复合碳源系统,6 号系统在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 为 6 时的处理效果与 5、7 和 8 号系统在 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 为 9、10 和 10 时的相当.从 5~8 号系统出水 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 曲线可以看出,在第 27~33 d,未改变反应条件,出水 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 均出现升高.这主要是因为在这期间,未对原水进行脱氧处理.第 33 d 之后继续采取脱氧措施,出水 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 出现明显的下降.这说明,原水携带 DO 会造成外碳源浪费.实际工程从好氧池到缺氧池的内循环,经常会携带大量的 DO,从节省碳源的角度,应采取措施尽可能降低 DO 的携带.

8 个系统在最优 $\text{COD}/\rho(\text{N})$ 下,一个周期内 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 变化如图 3 所示.1~4 号系统,从投加碳源开始到 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 达到 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的时间分别为 45、20、80 和 25 min,相应的平均速率分别为 0.245 、 0.562 、 0.141 和 $0.454 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率分别为 96.57%、98.87%、96.87% 和 98.34%.响应速度和反应速率最快的是乙醇系统.而葡萄糖系统,先出现一个短暂的平台期,然后 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 快速下降,第 30 min 左右,反应速率再次出现下降.4 个系统,投加葡萄糖外碳源,反应速率最慢,这与彭永臻等^[12]的研究结果一致,分析原因可能是因为葡萄糖代谢途径较为复杂^[13].

5~8 号复合碳源系统,与单碳源系统相比,反应速率均出现较大程度下降.从反应开始,到 $\rho(\text{NO}_x^- - \text{N})$ 到达 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的时间分别为 79、45、78 和 85 min,平均反应速率为 0.138 、 0.233 、 0.137 和 $0.127 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除率分别为 96.44%、97.56%、95.41% 和 94.78%.其中 5、7 和 8 号系统的反应速率均低于速率最低的 3 号系统.乙醇与葡萄糖组成复合碳源后,反应速率均低于乙酸钠/葡萄糖组合,8 号系统反应时间甚至高于葡萄糖单碳源系统.分析原因可能是由于乙醇是葡萄糖的发酵产物,其大量存在导致葡萄糖分解反应的推动力降低,反应速率变缓.

2.2 不同碳源系统污泥群落结构变化

2.2.1 微生物群落多样性分析

对样品进行高通量测序.种泥样品编号为 0,1~8 号系统污泥样品编号为 1~8.首先利用多样性分析(α)来反映群落丰度和多样性, α 多样性指数的统计如表 2 所示.9 组样品的 Coverage 指数均大于 0.99,说明可靠性非常高.

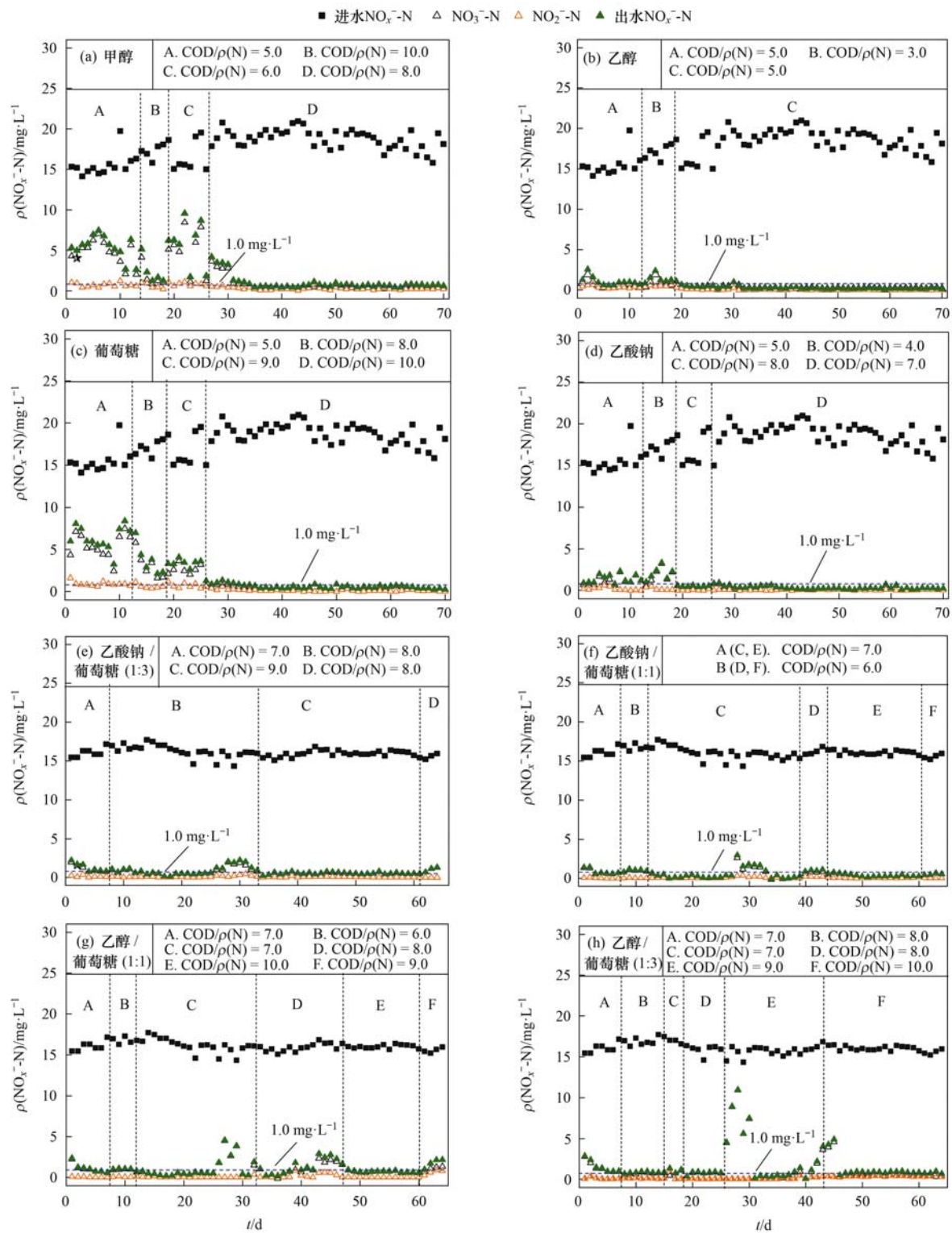


图 2 不同碳源系统 $\text{NO}_x\text{-N}$ 去除性能

Fig. 2 $\text{NO}_x\text{-N}$ removal performance in different systems with different external carbon sources

由表 2 可以看出,所有系统的 Shannon 指数均低于种泥样本. 这表明,投加外碳源, 8 个系统的群落多样性均下降. 这与李彭^[31]的研究结果相一致, 其研究表明,城镇污水深度反硝化系统内的微生物群落多样性低于生物法二级处理系统,这可能是由单一的缺氧环境导致. 考察群落丰富度, 1~4 号单碳源系统 Chao 和 Ace 指数与种泥相当,而 5~8 号

复合碳源系统的 Chao 和 Ace 指数出现明显的下降. 根据本研究碳源组成,推断葡萄糖是复合碳源系统群落丰富度降低的主要原因.

2.2.2 微生物群落结构分析

为进一步明确各系统菌群结构和丰度差异,对样品在不同分类水平上进行类别及丰度分析. 样本中丰度占比小于 1% 的物种归为 others,其余作为优

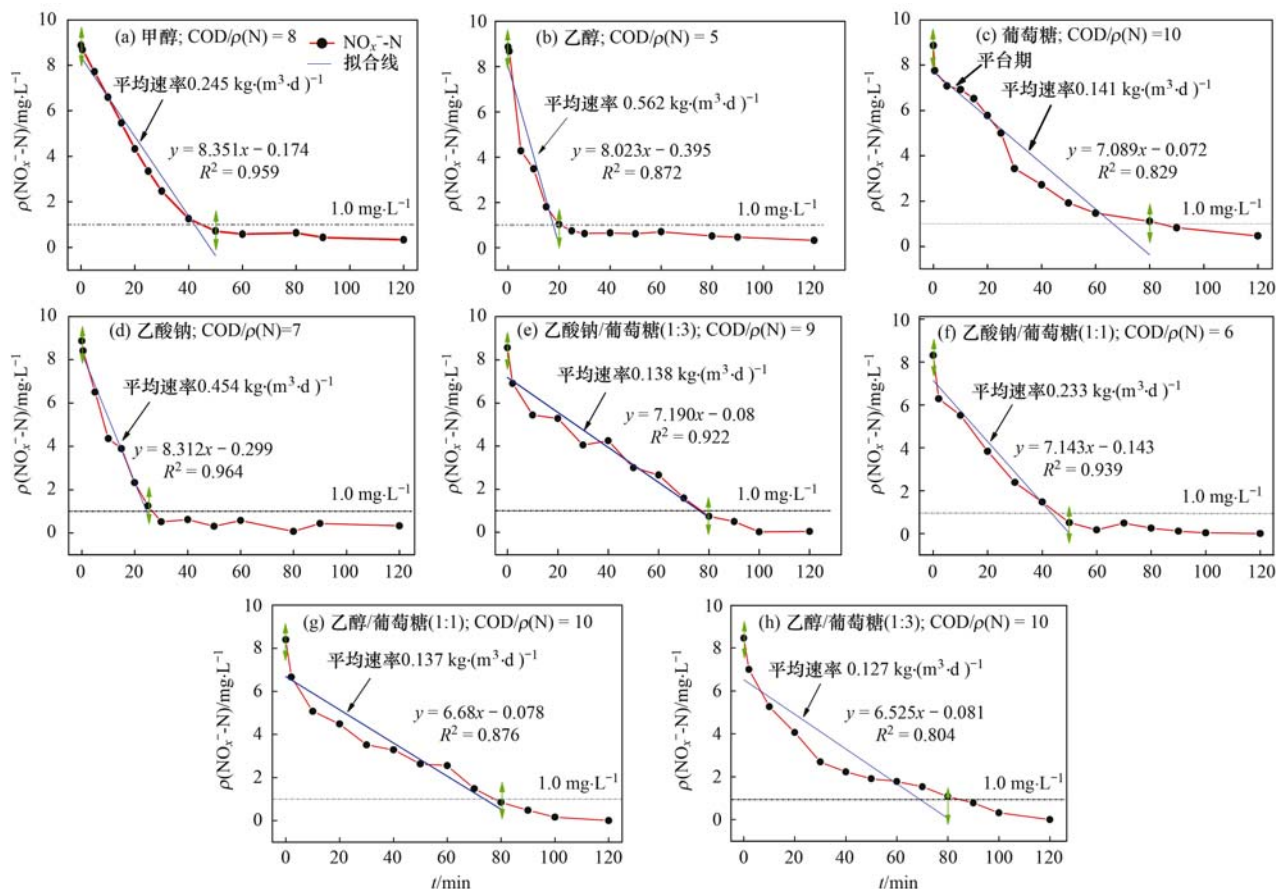


图3 典型周期内NO_x-N去除性能
Fig. 3 NO_x-N removal performance in typical cycle

表2 样品物种多样性指数

Table 2 Species diversity index of the sample

样品	OTUs	Shannon 指数	Chao 指数	Ace 指数	Simpson 指数	Coverage 指数
0	1 537	6.037	1 646	1 628	0.005 3	0.996 3
1	1 392	4.781	1 619	1 608	0.049 8	0.993 4
2	1 535	5.636	1 699	1 676	0.011 0	0.995 2
3	1 437	4.648	1 628	1 621	0.046 8	0.994 9
4	1 501	5.408	1 673	1 648	0.024 7	0.995 3
5	1 338	4.946	1 541	1 545	0.032 4	0.992 5
6	1 392	5.204	1 592	1 580	0.022 1	0.993 5
7	1 318	4.724	1 500	1 507	0.040 7	0.993 9
8	1 337	4.881	1 547	1 538	0.038 1	0.992 9

势菌种进行分析。

2.2.2.1 门水平下微生物种类及丰度

样品在门水平上的群落结构分析如图4所示。从中可知,在种泥样本中排名前10位的优势菌门和相对丰度为:Proteobacteria(变形菌门,36.6%)、Bacteroidetes(拟杆菌门,21.45%)、Unclassified_Bacteria(未分类菌门,9.25%)、Planctomycetes(浮霉菌门,8.22%)、Chloroflexi(绿弯菌门,8.96%)、Acidobacteria(酸杆菌门,4.19%)、Verrucomicrobia(疣微菌门,2.93%)、Nitrospirae(硝化螺旋菌门,1.27%)、Firmicutes(厚壁菌门,1.25%)和Actinobacteria(放线菌门,1.42%)。

Proteobacteria 菌群被证实为大部分污水厂的优势菌群,能脱氮除磷并去除有机物^[32,33],种泥丰度较高可能与其所在的污水处理厂具有较好的脱氮除磷性能有关。经不同碳源驯化后,种泥群落结构发生显著变化。Proteobacteria 除在甲醇污泥中略有增长外,在其余系统中均下降,在葡萄糖相关系统中下降程度最高,而相应的,Candidatus Saccharibacteria 菌群在葡萄糖相关的系统增加也最为明显。Candidatus Saccharibacteria 菌门的相对丰度在种泥中为1.16%,在1~4号系统分别为0.35%、1.37%、46.4%和0.75%,而在5~8号系统中丰度分别为42.22%、31.91%、47.37%和43.51%。显然,其在

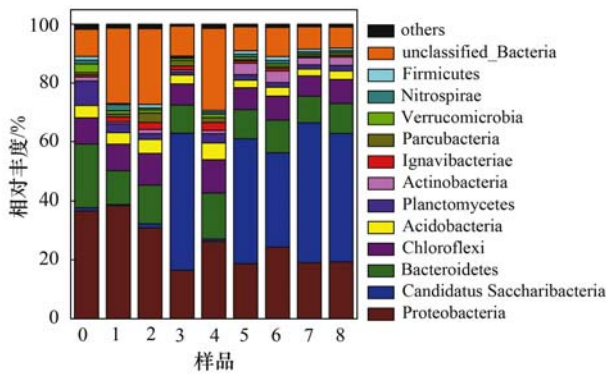


图4 各样品门水平群落结构分析

Fig. 4 Horizontal community structure analysis of each sample at phylum level

3、5、6、7 和 8 号系统内均成为绝对优势菌种。值得注意的是, 4 种复合碳源反硝化速率与单碳源相比均有降低, 但在 6 号系统, *Candidatus Saccharibacteria* 的相对丰度较低, 而 6 号系统的反硝化速率、氮的去除效率相对较高, 这也间接说明 *Candidatus Saccharibacteria* 菌门对提高反硝化速率可能不利。 *Candidatus Saccharibacteria* 菌群已被证实可在缺氧条件下降解有机物并对 NO_3^- -N 进行还原, 且可能是与短程脱氮密切相关的菌群^[34,35]。王维奇等^[13]曾在 2018 年首次报道, 在葡萄糖作为基质的系统, *Candidatus Saccharibacteria* 成为优势菌种, 并推测其对短程反硝化 (NO_3^- -N 还原生成 NO_2^- -N) 起主要作用, 且倾向于好氧环境生存。Zhao 等^[36]以溶解性淀粉做碳源, *Candidatus Saccharibacteria* 发展成优势菌属; 而有研究结果表明^[37,38], 复杂有机物可能有利于 *Candidatus Saccharibacteria* 的富集。本研究菌种选择富集结果与王维奇等^[13]的结果高度一致, 且所有与

葡萄糖有关的系统出现相似结果, 因此判定 *Candidatus Saccharibacteria* 菌门是由葡萄糖筛选富集, 并适应缺氧条件。

在投加甲醇、乙醇和乙酸钠系统中, *Unclassified_Bacteria* 的相对丰度得到极大提高, 而其它系统, *Unclassified_Bacteria* 与种泥丰度相当, 未有显著变化。另外注意到, *Firmicutes* 菌种, 其作为无氧条件下重要的反硝化菌, 彭永臻等^[12]的研究表明其在乙酸钠碳源系统得到较高水平的富集, 而本研究在乙醇、乙酸钠系统以及 4 种复合碳源系统该菌群丰度均得到一定比例的提高, 而在甲醇和葡萄糖单碳源系统比例非常低, 这说明乙醇和乙酸钠对该菌群的富集可能均起到促进作用。 *Bacteroidetes* 主要被发源于缺氧环境中, 且在大部分污水厂占有较高丰度, 能水解大分子, 促进含氮物质的转化等^[39]。 *Bacteroidetes* 在种泥中的丰度较高, 而 1~8 号系统均出现下降, 这表明, 传统易降解外碳源可能对富集该类菌种不利。 *Chloroflexi* 属于碱性厌氧菌, 该门下的一些细菌可以将 NO_3^- -N 转化为 NO_2^- -N^[40]。该菌属在 1、2 和 4 号样品中丰度维持较高水平, 而在 3、5、6、7 和 8 号污泥样品中均有一定下降, 说明葡萄糖对其生长不利。 *Actinobacteria* 门生物被认为主要降解葡萄糖^[12,41], 不以 NO_x^- -N 为电子受体, 在单碳源系统该类菌群丰度水平较低, 而在复合碳源系统, *Actinobacteria* 门得到大幅度提高, 且乙酸钠/葡萄糖系统的 *Actinobacteria* 丰度明显高于乙醇/葡萄糖系统, 推断复合类型的碳源对该类微生物的富集有促进作用。

2.2.2.2 属水平下的群落结构及丰度

样品属水平群落结构及丰度如图 5 所示。从中

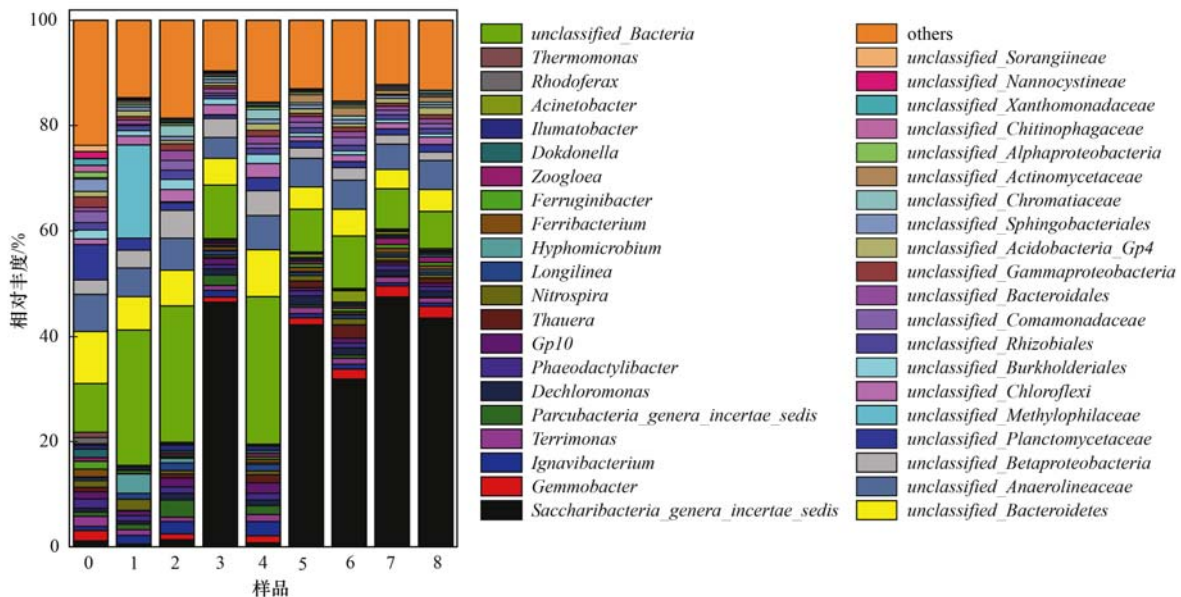


图5 各样品属水平群落结构分析

Fig. 5 Analysis of the horizontal community structure of each sample at genus level

可知,变化最为显著的是 *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis* 菌属,该菌属属于 *Candidatus Saccharibacteria* 门.在种泥中,其仅占 1.51%,在 1~8 号系统其相对丰度与 *Candidatus Saccharibacteria* 菌门相当.*Candidatus Saccharibacteria* 门高度富集情况下, *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis* 菌属高度富集,这与已有的研究结果一致^[35,36,42],不同的是 Zhao 等^[36]和霍小爱^[42]以溶解性淀粉为碳源.马思佳等^[25]的研究发现,葡萄糖/蛋白胨和乙酸钠/蛋白胨均促进了 *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis* 的选择富集,且葡萄糖/蛋白胨系统富集比例更高,推断复杂类型碳源更有利于 *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis* 富集.

在 1、2 和 4 号系统中优势菌属为 *unclassified_Bacteria*(未分类细菌),相对丰度分别为 25.74%、25.84% 和 27.96%,而其在种泥中丰度为 9.25%,分析认为,传统碳源促进了复杂菌属的生长.值得注意的是,1 号甲醇系统, *unclassified_Methylophilaceae* 的相对丰度大幅度增加,其属于 *Methylophilaceae*(嗜甲基菌科),专性或严格兼性以甲醇或者甲胺为唯一碳源和能源.而高鑫华等^[45]的研究表明 NO_x^- -N 会增加嗜甲基菌属的丰度,且认为 NO_x^- -N 可能和铵盐一样,作为营养物质参与反应,而非氧化还原反应中的电子受体.本研究可以确定甲醇是该菌种得到富集的主要原因, NO_x^- -N 是否对其有利尚无法证实.此外, *Thaurea*(陶厄氏菌属)和 *Acinetobacter*(不动杆菌属)在 4、5 和 6 号乙酸钠系统均有明显的数量优势, *Thaurea* 被证明是污水厂广泛存在的重要反硝化

菌^[32,43,44],而 *Acinetobacter* 菌可能与一些系统的除磷和反硝化除磷有关^[45,46],这些种属在 4、5 和 6 号系统具有数量优势,推断和乙酸钠有直接关系. *Zoogloea*(动胶菌属)在 7 号和 8 号系统显著增加,其被认为与菌胶团形成有关,能以 NO_x^- -N 为电子受体进行反硝化^[47],某些研究也表明其具有好氧反硝化功能,对同步硝化反硝化(SND)具有促进作用^[48].本试验 *Zoogloea* 的变化表明,乙醇对其富集起重要作用.但由于反应过程为严格缺氧, *Zoogloea* 不可能发挥好氧反硝化作用,只能参与缺氧反硝化^[49,50],或者如文献^[51,52],其仅仅发挥污泥沉降功能.噬氢菌属(*Hydrogenophaga*)属于 *Proteobacteria*,有研究认为 *Hydrogenophaga* 能进行反硝化,但很少利用碳水化合物作为碳源^[53].本研究在 1 号甲醇系统 *Hydrogenophaga* 得到显著增加,说明甲醇可能对其富集生长有利.

2.3 不同碳源经济性分析

根据碳源投加量及碳源价格,对运行费用进行粗略估算,见表 3.按照市场价格,4 种单碳源中乙醇单价最高,但因其反硝化速率高,反应时间短,投加量省,其作为外碳源费用最低.投加乙酸钠的系统,反应速率仅次于乙醇,但由于单位乙酸钠折合的 COD 当量不高,其投加量较大,折算后的费用为最高.复合碳源系统,反硝化速率与单一碳源系统相比,较低,但均能在一个周期内达到处理目标.根据碳源投加量计算得到的复合碳源运行费用,以乙酸钠/葡萄糖(1:1)为最低.实际污水厂因规模、工艺及设计参数等不同,碳源投加运行费用可能会有较大差别,需因地制宜地制定优化策略.

表 3 不同碳源系统氮去除性能及经济性分析
Table 3 Nitrogen removal performance and economic analysis of different carbon source systems

系统 编号	碳源类型	单价 /元·t ⁻¹	碳源用量 (以 NO_x^- -N 计) /g·g ⁻¹	出水 $\rho(\text{NO}_x^-$ -N) /mg·L ⁻¹	N 平均 去除率/%	N 平均去除速率 (以 NO_x^- -N 计) ¹⁾ /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	费用 (以 NO_x^- -N 计) /元·kg ⁻¹
1	甲醇	3 500	4.346	0.643	96.57	0.245	15.21
2	乙醇	7 300	1.959	0.204	98.87	0.562	14.11
3	葡萄糖	2 000	8.150	0.589	96.87	0.141	16.30
4	乙酸钠	4 400	7.315	0.318	98.34	0.454	32.19
5	乙酸钠/葡萄糖(1:3)	2 600	9.137	0.581	96.44	0.138	23.76
6	乙酸钠/葡萄糖(1:1)	3 200	7.780	0.393	97.56	0.233	21.34
7	乙醇/葡萄糖(1:1)	4 600	6.065	0.734	95.41	0.137	27.9
8	乙醇/葡萄糖(1:3)	3 300	7.350	0.830	94.78	0.127	24.26

1) N 平均去除速率指 NO_x^- -N 从初始浓度降解到 1 mg·L⁻¹ 时的平均速率

3 结论

(1) 从系统反硝化效率看,投加单碳源和复合碳源,出水 $\rho(\text{NO}_x^-$ -N) 均能达到 1 mg·L⁻¹ 以下的处理目标.投加乙醇单碳源的系统反应速率最快,乙酸钠次之.若能解决安全运输和贮存问题,乙醇为最

优.单纯考虑安全性及效率,投加乙酸钠较为理想.乙醇与葡萄糖组成复合碳源后,在速率上未体现优势;而乙酸钠更适合与葡萄糖组成复合碳源,但葡萄糖比例不宜过高.考虑经济性、安全性和反应速率,复合碳源乙酸钠/葡萄糖(1:1)较为优化.

(2) 从微生物群落结构上看,碳源对菌群具有

明显的筛选作用,会导致优势菌群发生根本性变化.在葡萄糖相关的系统中,Candidatus Saccharibacteri 经过 70 d 左右的选择富集,成为绝对优势菌门.相应的,在属水平, *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis* 菌群占绝对优势.多种碳源的对比试验证明,葡萄糖对群落结构影响较大,可引起 Candidatus Saccharibacteri 菌门和 *Saccharibacteria_genera_incertae_sedis* 属的高度富集,且此类菌群可在缺氧环境下生存.

参考文献:

- [1] Wang Y M, Lin Z Y, Wang Y, *et al.* Sulfur and iron cycles promoted nitrogen and phosphorus removal in electrochemically assisted vertical flow constructed wetland treating wastewater treatment plant effluent with high S/N ratio [J]. *Water Research*, 2019, **151**: 20-30.
- [2] Zhao Y F, Song X S, Cao X, *et al.* Modified solid carbon sources with nitrate adsorption capability combined with nZVI improve the denitrification performance of constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **294**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122189.
- [3] 唐婧,任琦,赵凯,等.水力停留时间对天然纤维素类固体碳源反硝化滤池处理效果的影响[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(3): 307-311.
- Tang J, Ren Q, Zhao K, *et al.* Effect of HRT on the performance of denitrification filter using natural cellulose as solid carbon source[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(3): 307-311.
- [4] 汤同欢,陈丙法,金婧梅,等.芦苇碳源后置反硝化滤池强化低碳氮比纳污河水脱氮[J]. *中国给水排水*, 2019, **35**(5): 19-23, 29.
- Tang T H, Chen B F, Jin J M, *et al.* Post denitrification biofilter with reed carbon source for enhanced nitrogen removal in low C/N ratio polluted river water[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, **35**(5): 19-23, 29.
- [5] Feng L J, Yang J Y, Yu H, *et al.* Response of denitrifying community, denitrification genes and antibiotic resistance genes to oxytetracycline stress in polycaprolactone supported solid-phase denitrification reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2020, **308**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123274.
- [6] 唐义,马邕文,万金泉,等.外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3392-3399.
- Tang Y, Ma Y W, Wan J Q, *et al.* Two-stage denitrification process performance with solid slow-release carbon source[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3392-3399.
- [7] Carrey R, Rodríguez-Escobedo P, Soler A, *et al.* Tracing the role of endogenous carbon in denitrification using wine industry by-product as an external electron donor: coupling isotopic tools with mathematical modeling [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **207**: 105-115.
- [8] 陈宏来.高浓度有机工业废水补充反硝化碳源的试验研究[J]. *工业用水与废水*, 2016, **47**(4): 42-46.
- Chen H L. Experimental study of effect of additional carbon source on high concentration organic industrial wastewater treatment[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2016, **47**(4): 42-46.
- [9] Hu H D, Ma S J, Zhang X X, *et al.* Characteristics of dissolved organic nitrogen in effluent from a biological nitrogen removal process using sludge alkaline fermentation liquid as an external carbon source[J]. *Water Research*, 2020, **176**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115741.
- [10] 徐晨璐,尹志轩,李春雨,等.垃圾渗滤液补充反硝化碳源强化脱氮效果[J]. *环境工程学报*, 2019, **13**(5): 1106-1112.
- Xu C L, Yin Z X, Li C Y, *et al.* Nitrogen removal enhancement with landfill leachate as supplemental carbon source for denitrification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, **13**(5): 1106-1112.
- [11] 李梦露,蒋建国,张昊巍.餐厨垃圾水解酸化液作碳源的脱氮效果研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 917-923.
- Li M L, Jiang J G, Zhang H W. Effect of kitchen waste hydrolysis products on domestic wastewater denitrification [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 917-923.
- [12] 彭永臻,王鸣岐,彭轶,等.四种碳源条件下城市污水处理厂尾水深度脱氮的性能与微生物种群结构[J]. *北京工业大学学报*, 2021, **47**(10): 1158-1166.
- Peng Y Z, Wang M Q, Peng Y, *et al.* Effect of four different types of carbon sources on advanced nitrogen removal of secondary effluent: system performance and microbial communities[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, **47**(10): 1158-1166.
- [13] 王维奇,王秀杰,李军,等.不同驯化方式实现 SBR 中部分反硝化的对比研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(11): 4085-4093.
- Wang W Q, Wang X J, Li J, *et al.* Comparative study on achieving partial denitrification in a SBR by different acclimation methods[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(11): 4085-4093.
- [14] Kalyuzhnaya M G, Beck D A C, Vorobev A, *et al.* Novel methylotrophic isolates from lake sediment, description of *Methylotenera versatilis* sp. nov. and emended description of the genus *Methylotenera* [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, **62**(1): 106-111.
- [15] 高鑫华,朱婷,邹斌,等.氮源类型对甲烷氧化过程主要菌群的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2017, **36**(3): 966-975.
- Gao X H, Zhu T, Zou B, *et al.* Influence of nitrogen source types on major microbial populations in methane-oxidation process [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2017, **36**(3): 966-975.
- [16] 殷芳芳,王淑莹,昂雪野,等.碳源类型对低温条件下生物反硝化的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 108-113.
- Yin F F, Wang S Y, Ang X Y, *et al.* Effects of carbon source types on denitrification performance at low temperature [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 108-113.
- [17] Lu H J, Chandran K. Factors promoting emissions of nitrous oxide and nitric oxide from denitrifying sequencing batch reactors operated with methanol and ethanol as electron donors [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2010, **106**(3): 390-398.
- [18] 王洪贞,李毅.不同外碳源对生物反硝化影响的研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, **13**(19): 5728-5731.
- Wang H Z, Li Y. Effect of different carbon-sources on bio-denitrification[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, **13**(19): 5728-5731.
- [19] 曹相生,钱栋,孟雪征.乙酸钠为碳源时的污水反硝化规律研究[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(21): 76-79.
- Cao X S, Qian D, Meng X Z. Characteristics of denitrification process with sodium acetate as sole carbon source [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, **27**(21): 76-79.
- [20] 吴代顺,桂丽娟,陈晓志,等.不同类型碳源及其投加量对污泥反硝化的影响研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2012, **31**

- (3): 99-103.
- Wu D S, Gui L J, Chen X Z, *et al.* Effects of different types and dosages of carbon sources on denitrification of activated sludge [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2012, **31**(3): 99-103.
- [21] 赵庆彬, 毕学军, 臧海龙, 等. 不同碳源对活性污泥反硝化能力的影响研究[J]. *环境工程*, 2013, **31**(5): 127-131.
- Zhao Q B, Bi X J, Zang H L, *et al.* Effect of different carbon-sources on denitrification of the activated sludge system [J]. *Environmental Engineering*, 2013, **31**(5): 127-131.
- [22] 熊子康, 郑怀礼, 尚娟芳, 等. 污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, **43**(2): 168-181.
- Xiong Z K, Zheng H L, Shang J F, *et al.* State-of-the art review of adding extra carbon sources to denitrification of wastewater treatment [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, **43**(2): 168-181.
- [23] 胡小宇, 朱静平. 3 种单一及其混合碳源的生物反硝化脱氮效能[J]. *水处理技术*, 2020, **46**(1): 57-61.
- Hu X Y, Zhu J P. Biological denitrification efficiency of three single and mixed carbon sources [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, **46**(1): 57-61.
- [24] Shi L L, Du R, Peng Y Z. Achieving partial denitrification using carbon sources in domestic wastewater with waste-activated sludge as inoculum[J]. *Bioresource Technology*, 2019, **283**: 18-27.
- [25] 马思佳, 顾卓江, 丁丽丽, 等. 碳源对活性污泥微生物细胞膜特性和群落结构影响[J]. *微生物学通报*, 2017, **44**(3): 561-573.
- Ma S J, Gu Z J, Ding L L, *et al.* Effects of carbon sources on cell membrane properties and microbial community of activated sludge[J]. *Microbiology China*, 2017, **44**(3): 561-573.
- [26] 於蒙, 潘婷, 张森, 等. 乙酸钠丙酸钠配比对 A^2/O -BCO 反硝化除磷及菌群结构的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(10): 4178-4185.
- Yu M, Pan T, Zhang M, *et al.* Effect of the ratios of sodium acetate to sodium propionate on denitrifying phosphorus removal characteristics in the A^2/O -BCO process [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(10): 4178-4185.
- [27] Mokhayeri Y, Riffat R, Murthy S, *et al.* Balancing yield, kinetics and cost for three external carbon sources used for suspended growth post-denitrification [J]. *Water Science and Technology*, 2009, **60**(10): 2485-2491.
- [28] 侯红娟, 王洪洋, 周琪. 进水 COD 浓度及 C/N 值对脱氮效果的影响[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(12): 19-23.
- Hou H J, Wang H Y, Zhou Q. Effect of influent COD concentration and C/N ratio on denitrification [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, **21**(12): 19-23.
- [29] 龚本洲, 周炯, 刘石虎. C/N 值对短时曝气 SBR 高标准脱氮除磷效能的影响[J]. *中国给水排水*, 2020, **36**(15): 13-17.
- Gong B Z, Zhou J, Liu S H. Effect of C/N ratio on high-standard nitrogen and phosphorus removal efficiency of SBR with short-time aeration [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, **36**(15): 13-17.
- [30] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [31] 李彭. 不同电子供体深度脱氮工艺及微生物群落特征研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- Li P. A Study on processes and microbial communities of tertiary nitrogen removal with different electron donors [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [32] 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 等. 活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3886-3893.
- Ma Q Q, Yuan L J, Niu Z D, *et al.* Microbial community structure of activated sludge and its response to environmental factors [J]. *Environmental Science*, **42**(8): 3886-3893.
- [33] 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.
- [34] Kindaichi T, Yamaoka S, Uehara R, *et al.* Phylogenetic diversity and ecophysiology of candidate phylum saccharibacteria in activated sludge [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, **92**(6), doi: 10.1093/femsec/fiw078.
- [35] 李佳, 张亮, 刘杰, 等. 城市污水处理厂缺氧池短程反硝化现象及影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(1): 109-117.
- Li J, Zhang L, Liu J, *et al.* Investigation of the phenomenon and influencing factor of partial denitrification in anoxic zone of a municipal wastewater treatment plant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 109-117.
- [36] Zhao J G, Li Y H, Chen X R, *et al.* Effects of carbon sources on sludge performance and microbial community for 4-chlorophenol wastewater treatment in sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **255**: 22-28.
- [37] Ma X Y, Wang X C, Liu Y J, *et al.* Variations in toxicity of semi-coking wastewater treatment processes and their toxicity prediction [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **138**: 163-169.
- [38] Remmas N, Melidis P, Zerva I, *et al.* Dominance of candidate saccharibacteria in a membrane bioreactor treating medium age landfill leachate: effects of organic load on microbial communities, hydrolytic potential and extracellular polymeric substances [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **238**: 48-56.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Ito T, Yoshiguchi K, Ariesady H D, *et al.* Identification and quantification of key microbial trophic groups of methanogenic glucose degradation in an anaerobic digester sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 599-607.
- [42] 霍小爱. 缺氧-好氧 SBR 脱氮系统生物除磷特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- Huo X A. Study on the characteristics of biological phosphorus removal in anoxic-aerobic SBR system [D]. Xi'an: Xian University of Architecture and Technology, 2019.
- [43] Thomsen T R, Kong Y H, Nielsen P H. Ecophysiology of abundant denitrifying bacteria in activated sludge [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **60**(3): 370-382.
- [44] 魏小涵, 毕学军, 尹志轩, 等. 温度和 DO 对 MBBR 系统硝化和反硝化的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 612-618.
- Wei X H, Bi X J, Yin Z X, *et al.* Effects of temperature and dissolved oxygen on nitrification and denitrification in MBBR system [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 612-618.
- [45] Okunuki S, Kawaharasaki M, Tanaka H, *et al.* Changes in

- phosphorus removing performance and bacterial community structure in an enhanced biological phosphorus removal reactor [J]. *Water Research*, 2004, **38**(9): 2433-2439.
- [46] 吴云, 范丙全, 隋新华, 等. 适应菲胁迫的高效聚磷菌筛选及聚磷特性研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3172-3178. Wu Y, Fan B Q, Sui X H, *et al.* Screening of two phenanthrene-utilizing and high-effective phosphorus-accumulating bacteria and their effects on phosphorus-accumulating characteristics [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(11): 3172-3178.
- [47] Xie C H, Yokota A. *Zoogloea oryzae* sp. nov., a nitrogen-fixing bacterium isolated from rice paddy soil, and reclassification of the strain ATCC 19623 as *Crabtreeella saccharophila* gen. nov., sp. nov. [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2006, **56**(3): 619-624.
- [48] Gao P, Xu W L, Sontag P, *et al.* Correlating microbial community compositions with environmental factors in activated sludge from four full-scale municipal wastewater treatment plants in Shanghai, China [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(10): 4663-4673.
- [49] 李冬, 杨敬畏, 李悦, 等. 缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2385-2395. Li D, Yang J W, Li Y, *et al.* Aerobic granular sludge operation and nutrient removal mechanism from domestic sewage in an anaerobic/aerobic alternating continuous flow system [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2385-2395.
- [50] 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.
- [51] Du R, Cao S B, Li X C, *et al.* Efficient partial-denitrification/anammox (PD/A) process through gas-mixing strategy: system evaluation and microbial analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122675.
- [52] 陈翠忠, 李俊峰, 刘生宝, 等. 间歇式活性污泥法(SBR)系统碳氮比对同步硝化反硝化微生物群落分布及脱氮效能的影响[J]. *环境化学*, 2021, **40**(11): 3598-3607. Chen C Z, Li J F, Liu S B, *et al.* Effect of C/N ratio on the microbial community of simultaneous nitrification and denitrification (SND) and the biological nitrogen removal in sequencing batch reactor (SBR)[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(11): 3598-3607.
- [53] 陈恺, 任龙飞, 蔡浩东, 等. 新型生物强化 A²/O 系统在苯胺废水处理中的应用[J]. *环境工程学报*, 2020, **14**(7): 1808-1816. Chen K, Ren L F, Cai H D, *et al.* Application of a new biologically enhanced A²/O system in aniline wastewater treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(7): 1808-1816.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)