

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响

高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 丝状菌引起的污泥膨胀或生物泡沫是活性污泥法污水处理厂运行管理中经常碰到的异常问题, 为确定丝状菌引起的污泥膨胀对脱氮除磷系统功能菌群的影响, 采用形态学鉴定和 Illumina MiSeq 高通量测序对 5 座城市污水处理厂非膨胀期和膨胀期活性污泥、生物泡沫中关键微生物菌群分布特征进行分析研究. 结果表明, 污泥膨胀和生物泡沫主要由微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 引起, 膨胀期污泥和生物泡沫中微丝菌最高比例达 6% 和 38%. 主要脱氮除磷菌属为亚硝化单胞菌 (*Nitrosomonas*)、硝化螺菌 (*Nitrospira*)、陶厄氏菌 (*Thauera*) 和 *Candidatus Accumulibacter phosphatis*. 膨胀期与非膨胀期相比 AOB 和聚磷菌相对丰度明显降低, 最大变化比例为 54% 和 47%, 反硝化菌相对丰度显著升高, 最大变化比例为 73%; 脱氮除磷菌群的波动变化受污泥膨胀的影响外, 还与处理工艺及菌群的生理特性相关.

关键词: 丝状菌膨胀; 城市污水; 活性污泥; 除磷脱氮; 功能菌群; MiSeq 测序

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2794-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201709138

Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria

GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, ZHENG Xing-can, SHANG Wei, ZHANG Wen-an

(North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: Activated sludge bulking or foaming caused by filamentous bacteria is a frequent problem in the operation and management of wastewater treatment plants. To clarify the effect of filamentous bacteria sludge bulking on the functional flora in the biological denitrification and phosphorus removal system, morphological identification and Illumina MiSeq sequencing were applied to investigate the distribution of key micro-flora from the non-bulking period, sludge bulking period, and biological foaming period in five municipal wastewater treatment plants. The results showed that the sludge bulking and biological foaming were caused by *Microthrix parvicella* when the maximum contents were 6% and 38%, respectively. The main bacteria for denitrification and phosphorus removal were *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Thauera*, and *Candidatus Accumulibacter phosphatis*. Compared to the non-bulking period, the relative abundance of AOB and PAO was significantly decreased when the maximum contents were 54% and 47%, respectively, during the bulking period. In addition, the relative abundance of denitrifying bacteria was significantly increased when the maximum content was 73%. The fluctuation of micro-flora for denitrification and phosphorus removal was affected by the activated sludge bulking and was related to the treatment process and physiological characteristics of the bacteria.

Key words: filamentous bulking; municipal wastewater; activated sludge; denitrification and phosphorus removal; function microorganism; Illumina MiSeq sequencing

对于采用活性污泥法处理工艺的城市污水处理厂, 污泥膨胀和生物泡沫是运行管理过程中普遍存在的主要难题之一, 特别是容易在强化营养物去除的污水处理工艺中发生^[1], 而 90% 以上的活性污泥膨胀都是由丝状菌过度繁殖引起的^[2~4]. 活性污泥法通过特定的功能微生物来完成有机物降解、生物硝化与反硝化、生物除磷等工艺过程, 这意味着微生物的菌群结构和数量分布在很大程度上决定或影响着污水处理厂的污染物去除能力及处理效果^[5, 6]. 以往对引起污泥膨胀的丝状菌类型的鉴定和不同环境条件下活性污泥微生物菌群的解析已有大量的研究^[7~10], 但是针对城市污水处理系统中丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群影响的研究还较少. 因此, 研究引起活性污泥膨胀

和生物泡沫的丝状菌类型, 从微生物生态学的角度探究脱氮除磷功能菌群分布的变化特征, 对把控城市污水处理厂污泥膨胀时期污水处理效果具有重要的指导意义.

本文基于传统形态学观察和 MiSeq 高通量测序技术对 5 座城市污水处理厂引发活性污泥膨胀和生物泡沫的丝状菌类型进行鉴定, 解析非膨胀期污泥、膨胀期污泥和生物泡沫中的脱氮除磷功能微生物群落结构的动态变化规律, 掌握其对污泥膨胀的影响机制, 通过控制污泥膨胀和生物泡沫的发生,

收稿日期: 2017-09-15; 修订日期: 2017-11-24

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07313-001)

作者简介: 高晨晨(1986~), 女, 硕士, 主要研究方向为污水生物处理, E-mail: hellogcc@126.com

以期为提高城市污水生物除磷脱氮系统的实际效能及运行稳定性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

调研选取近年来频繁发生污泥膨胀和生物泡沫的 5 座城市污水处理厂, 污泥膨胀和泡沫的发生期均为冬春低温季节。一般情况下, 将 $SVI > 150$

$\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 的活性污泥定义为污泥膨胀^[11], 因此, SVI 均值大于 $150 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 时划分为膨胀期, SVI 均值小于 $100 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 时划分为非膨胀期。本文取非膨胀期和膨胀期污泥进行对比研究, 污泥样品取自各厂生物反应池好氧区末端。膨胀期各厂生物池表面均有不同程度的生物泡沫漂浮, 泡沫样品直接取膨胀期生物池表面漂浮的泡沫进行测试。各厂的污水处理工艺、水质和污泥膨胀参数概况汇总于表 1。

表 1 5 座城市污水处理厂运行概况

Table 1 Performance of and conditions in five municipal wastewater treatment plants

水质指标	项目	水厂工艺类型					
		JN (AAO)	LCH (AAO + 填料)	TD (预缺氧池 + AAO + 填料)	HF (厌氧池 + 氧化沟)	ZS (AAO + 填料)	
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	非膨胀期	进水	422	484	820	274	393
		出水	44	18	25	16	32
	膨胀期	进水	408	590	836	270	287
		出水	46	19	27	18	34
BOD ₅ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	非膨胀期	进水	188	295	337	141	114
		出水	2	3	3	4	6
	膨胀期	进水	121	220	351	107	98
		出水	6	4	3	5	7
SS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	非膨胀期	进水	397	594	342	266	200
		出水	4	5	8	4	6
	膨胀期	进水	371	268	328	277	215
		出水	7	6	10	6	10
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	非膨胀期	进水	55.9	79.0	133.0	30.2	41.4
		出水	11.8	13.4	6.6	8.5	7.5
	膨胀期	进水	61.2	71.0	138.0	34.5	59.2
		出水	16.7	16.0	13.2	9.7	13.7
NH ₃ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	非膨胀期	进水	40.0	56.0	76.8	20.0	29.3
		出水	0.6	0.4	0.2	0.6	0.2
	膨胀期	进水	41.9	58.7	84.6	24.0	42.3
		出水	1.8	1.7	1.5	0.8	0.2
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	非膨胀期	进水	10.46	9.21	13.61	4.42	7.89
		出水	0.45	0.16	0.14	0.13	0.40
	膨胀期	进水	7.05	6.61	11.74	3.45	7.82
		出水	0.43	0.31	0.15	0.18	0.50
SVI/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	非膨胀期	/	40	25	79	50	73
	膨胀期	/	177	197	280	251	157

1.2 实验方法

1.2.1 污泥和泡沫样品染色与镜检方法

将活性污泥或泡沫混合均匀, 取约 $50 \mu\text{L}$ 样品, 滴放在洁净的载玻片中央并晾干, 经革兰氏染色后, 置于相差显微镜下进行样品观察, 对丝状菌的种类和丰度等进行评价。

1.2.2 DNA 提取与高通量测序

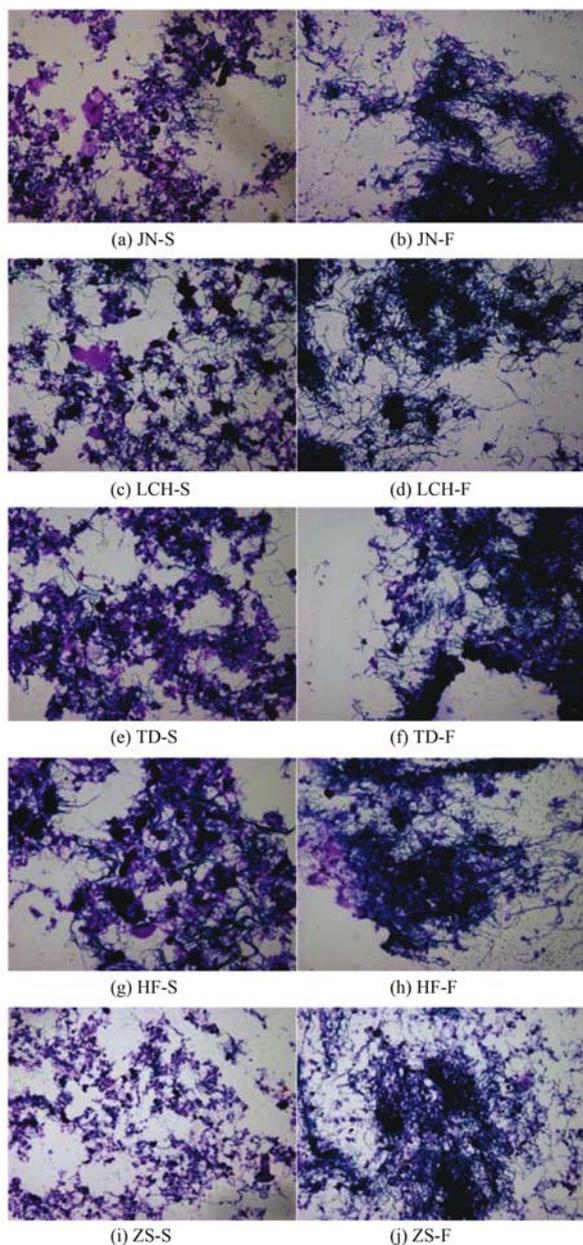
DNA 提取采用土壤 DNA 提取方法, 高通量测序通过 Illumina MiSeq 2000 体系完成, 后续通过 OTU 聚类分析和物种分类学分析, 并进行群落结构

和系统发育等深入的统计学数据分析。

2 结果与讨论

2.1 优势丝状菌的形态学鉴定

各厂膨胀期污泥和泡沫中丝状菌类型的形态学鉴定结果如图 1 和表 2。膨胀期污泥和泡沫中的丝状菌种类丰富, 共存在不少于 8 种类型丝状菌; 优势丝状菌主要以微丝菌 (*M. parvicella*) 为主, 仅 ZS 厂的活性污泥中优势丝状菌为 Type 0092, 但其与次优丝状菌微丝菌相比数量优势并不明显, 该厂泡



图片字母表示水厂名称-样品类型
样品类型:S代表膨胀期污泥,F代表生物泡沫

图1 膨胀期污泥和泡沫样品镜检(100×)

Fig. 1 Micrographs of activated sludge and foam during bulking period(100×)

沫中仍以微丝菌为主,由于镜检观察难以对微生物进行严格的量化比较,因此,本文2.2节将通过分子生物学手段对各厂优势丝状菌的种类和丰度做进一步验证.除JN厂外,其他厂均有少量的Type 0092丝状菌,Type 0041在样品中也有一定比例的存在.研究表明,在许多国家的污水处理厂中微丝菌都是引发污泥膨胀和泡沫的主要菌种之一,尤其在好氧/厌氧区交替的系统中较活性污泥中其他细菌具有更强的竞争优势^[12],目前大多数污水处理

厂为达到脱氮除磷目的,均采用AAO或厌氧池+氧化沟等厌氧区置于好氧区之前的处理工艺,这也是导致微丝菌成为优势菌的重要原因,另外微丝菌受温度和污泥负荷等条件的影响明显,通常在冬季低温季节和低负荷[$<0.1 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,以 BOD_5/MLSS 计]条件下具有比菌胶团细菌更强的繁殖优势^[13, 14].

借助美国Jenkins等提出的丝状菌丰度表和图判断污泥和泡沫中丝状菌丰度,结果表明,各厂泡沫中丝状菌丰度明显高于污泥.其中LCH厂泡沫、TD厂污泥和泡沫、HF厂泡沫中丝状菌均处于过度繁殖状态,几乎所有的絮体都能观察到丝状菌,其数量大于菌胶团的数量,丰度值为最大值6.结合镜检鉴定和各厂SVI值情况,LCH、TD、HF厂污泥膨胀相对严重,JN和ZS厂处于轻微膨胀状态.

2.2 优势丝状菌分子生物学鉴定

各厂活性污泥和泡沫中常见丝状菌的MiSeq高通量测序结果如表3.丝状菌相对丰度均呈现出非膨胀期污泥低于膨胀期污泥、低于泡沫的规律趋势.非膨胀期污泥的优势丝状菌类型多样,且5座厂之间各不相同,而膨胀期污泥和泡沫的优势丝状菌均为微丝菌,说明在非膨胀期丝状菌作为菌胶团细菌的骨架结构,其在活性污泥总细菌中并不占优势,各类型丝状菌数量相差不明显;由于某种环境因素导致丝状菌大量增值时,其占总细菌的质量分数增加,破坏了活性污泥菌群结构的平衡,导致活性污泥沉降性能变差,引发污泥膨胀和生物泡沫.ZS厂优势丝状菌的MiSeq测序结果与镜检结果有所差异,由于MiSeq测序可对微生物的丰度进行量化,且更加客观可靠^[15],因此,优势丝状菌类型以MiSeq测序结果为准.

从丝状菌的归属来看,*M. parvicella*、*N. limicola* I、*Gordonia*、*Skermania*、*Nocardioides*均属于放线菌门^[16, 17].各厂丝状菌的相对丰度排序为TD、HF、LCH、JN、ZS,与镜检丰度值和SVI值的排序基本一致.

2.3 门、纲水平微生物变化规律

考虑到大多数丝状菌属于放线菌门,而大多数功能菌属于变形菌门^[18].各厂不同时期变形菌门和放线菌门的相对丰度对比结果如图2,由非膨胀期转变到膨胀期,活性污泥中放线菌门微生物数量显著增加,且泡沫中放线菌数量明显高于污泥,与镜检对丝状菌丰度值的评估结果一致.而变形菌门微生物的数量变化并不明显,波动幅度低于5%.

表 2 丝状菌类型和丰度统计(镜检)

Table 2 Types and abundance of filamentous bacteria(microscope)

项目 ¹⁾	丝状菌丰度	<i>M. parvicella</i>	Type 0041	Type 0092	<i>N. limicola</i> II	Type 021N	Type 0675	<i>Nocardioides</i>	Type 0914
JN-S	3	优势	少量		少量	少量			
JN-F	5	优势							
LCH-S	4	优势	少量	少量					
LCH-F	6	优势		少量					
TD-S	6	优势	少量	少量					
TD-F	6	优势		少量				少量	
HF-S	5	优势	次优	少量			少量		
HF-F	6	优势		少量					
ZS-S	3	次优	少量	优势					
ZS-F	5	优势	少量	少量		少量			少量

1)厂名-样品名称, S 代表活性污泥, F 代表生物泡沫

表 3 常见丝状菌相对丰度 (MiSeq)

Table 3 Relative abundance of common filamentous bacteria (MiSeq)

丝状菌	JN		LCH			TD			HF			ZS			
	非膨胀期	膨胀期		非膨胀期	膨胀期		非膨胀期	膨胀期		非膨胀期	膨胀期		非膨胀期	膨胀期	
		污泥	泡沫		污泥	泡沫									
<i>M. parvicella</i>	0.23	4.95	24.10	0.11	5.04	38.26	0.03	6.04	30.04	0.11	5.76	33.60	0.03	2.32	6.69
Type 0092	0.00	0.00	0.00	0.01	0.24	0.05	0.02	0.25	0.01	0.05	0.17	0.09	0.01	0.92	0.04
<i>N. limicola</i> I	0.03	1.63	1.85	0.07	2.12	2.02	0.11	1.64	1.25	0.00	0.42	0.26	0.01	0.28	0.24
<i>Gordonia</i>	0.00	0.00	0.08	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.61
Type 021N	0.03	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.32	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00
<i>H. hydrossis</i>	0.01	0.01	0.01	0.02	0.12	0.01	0.02	0.02	0.00	0.07	0.06	0.01	0.05	0.08	0.02
<i>Anaerolinea</i>	0.00	0.00	0.00	0.25	0.18	0.06	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.23	0.22
<i>Skermania</i>	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	1.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
<i>Nocardioides</i>	0.00	0.01	0.00	0.01	0.11	0.02	0.03	0.02	0.06	0.00	0.05	0.01	0.04	0.41	0.12
合计	0.29	6.67	26.03	0.48	7.85	40.47	0.23	8.18	33.38	0.58	6.53	34.06	0.15	4.24	7.95

各厂不同时期变形菌纲的相对丰度对比结果如图 3, 主要脱氮除磷菌属分布在 β -Proteobacter、 γ -Proteobacter、 α -Proteobacter、 δ -Proteobacter. 其中 β -Proteobacter 仍为不同时期的优势变形菌, TD、HF、ZS、JN 厂膨胀期 β -Proteobacter 相对丰度较非膨胀期略微降低, 变化比例低于 5%, 泡沫中各厂 β -

Proteobacter 均大幅度低于非膨胀期. β -Proteobacter 是活性污泥在脱氮、除磷和其他许多污染物去除中起重要作用的菌群^[19], 其相对丰度在一定程度上决定着污水厂污染物的去除效果. γ -Proteobacter 在不同时期的变化趋势不明显. α -Proteobacter 在各厂膨胀期污泥中含量均最高, 高于泡沫和非膨胀期污泥, 而 α -Proteobacter 典型的功能菌常被认为是反硝

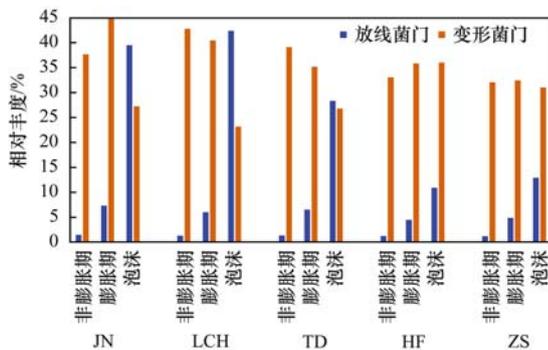


图 2 不同时期变形菌门和放线菌门的相对丰度
Fig. 2 Relative abundance of Proteobacteria and Actinobacteria during different periods

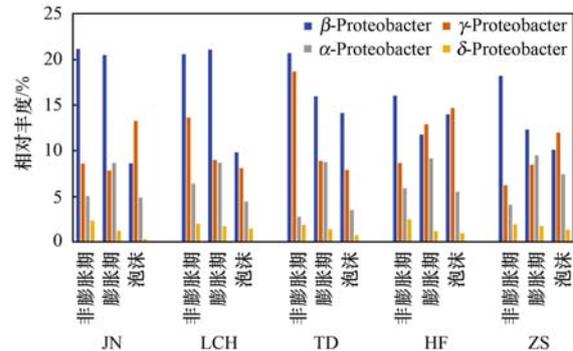


图 3 不同时期变形菌纲相对丰度
Fig. 3 Relative abundance of Proteobacter during different periods

化细菌^[20]. 各厂非膨胀期的 δ -Proteobacter 相对丰度高于膨胀期, 高于泡沫, 亚硝酸盐氧化菌中的 *Nitrospina* 属于 δ -Proteobacter.

从主要功能菌所在的门和纲水平的群落结构变化对污染物去除效果的影响来看, 丝状菌污泥膨胀对主要的功能菌变形菌门和变形菌纲微生物的丰度影响不明显, 而各厂膨胀期主要污染物的去除效果较非膨胀期略有降低, 但波动幅度不大, 均在出水达标范围内.

2.4 脱氮功能菌群变化规律

对不同时期氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂-Oxidizer)、反硝化菌的种属和分布比例变化情况进行对比分析.

脱氮菌属相对丰度统计结果如表 4, 各厂的

AOB 包括亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)和亚硝化球菌属(*Nitrosococcus*), 优势菌属为亚硝化单胞菌. 非膨胀期污泥、膨胀期污泥和泡沫中 AOB 相对丰度范围分别为 1.71% ~ 5.21%、0.50% ~ 2.57%、0.34% ~ 1.64%. 各厂的 NOB 包括硝化刺菌属(*Nitrospina*)和硝化螺菌属(*Nitrospira*)两种, 优势菌属为硝化螺菌. 非膨胀期污泥、膨胀期污泥和泡沫中 NOB 的相对丰度范围分别为 1.60% ~ 2.38%、1.44% ~ 2.77%、0.30% ~ 1.23%. 各厂反硝化菌包含陶厄氏菌属(*Thauera*)、生丝微菌属(*Hyphomicrobium*)等 12 个种属, 其中陶厄氏菌为各厂的优势反硝化菌, 生丝微菌次之. 非膨胀期污泥、膨胀期污泥和泡沫中反硝化菌相对丰度范围分别为 4.05% ~ 5.96%、2.20% ~ 9.21%、1.79% ~ 3.40%.

表 4 脱氮菌属相对丰度/%

Table 4 Relative abundance range of denitrification removal bacteria/%

项目	亚硝化球菌属 (<i>Nitrosococcus</i>)	亚硝化单胞菌属 (<i>Nitrosomonas</i>)	AOB 合计
非膨胀期	0 ~ 0.01	1.71 ~ 5.21	1.72 ~ 5.22
膨胀期	0 ~ 0.01	0.50 ~ 2.57	0.50 ~ 2.58
泡沫	0 ~ 0.01	0.34 ~ 1.64	0.34 ~ 1.65
项目	硝化刺菌属 (<i>Nitrospina</i>)	硝化螺菌属 (<i>Nitrospira</i>)	NOB 合计
非膨胀期	0 ~ 0.01	1.59 ~ 2.38	1.60 ~ 2.38
膨胀期	0	1.44 ~ 2.77	1.44 ~ 2.77
泡沫	0	0.30 ~ 1.23	0.30 ~ 1.23
项目	陶厄氏菌属 (<i>Thauera</i>)	其他	反硝化菌 合计
非膨胀期	3.12 ~ 5.88	0.08 ~ 1.02	4.05 ~ 5.96
膨胀期	4.07 ~ 7.49	1.11 ~ 2.16	2.20 ~ 9.21
泡沫	1.30 ~ 2.38	0.61 ~ 1.18	1.79 ~ 3.40

各厂不同时期脱氮菌属的对比情况如图 4~6, AOB 相对丰度除 ZS 厂膨胀期略有升高, 其余各厂均为非膨胀期高于膨胀期, 高于泡沫; 其中 JN、TD 和 LCH 厂膨胀期污泥中 AOB 相对丰度大幅度降低, JN 厂降低比例最大, 为 54%, 分析 JN 厂降低幅度较大的原因可能与工艺特征及水温有关. 从工艺来看, TD、LCH、ZS 厂生物池均有填料, 填料对 AOB 有较好的固定作用, 降低污泥膨胀对 AOB 菌群的影响; 从水温来看, 各厂一年中水温最低点均在膨胀期, 但 JN 厂最低水温为 11℃, 其他厂均不低于 12℃, 而 AOB 对水温的耐受力较差^[21], 受水温影响而大幅度降低. 与 AOB 相比, NOB 受污泥膨胀影响的变化规律并不明显. 大体分为两种变化趋势: JN、TD 厂 NOB 的相对丰度膨胀期低于非膨胀期, LCH、HF、ZS 厂膨胀期高于非膨胀期. 反硝化菌相对丰度在膨胀期普遍高于非膨胀期, 其中

JN、ZS 厂增加幅度较大, 增加比例分别为 73% 和 47%, 而 LCH 和 TD 厂略有增加. 各厂泡沫中均有一定比例的脱氮菌属存在.

AOB 和 NOB 都是自养型细菌, 生长缓慢, 对有机负荷、温度、pH、DO 等参数的冲击十分敏感, 与异养菌的竞争中处于劣势地位^[22]. 而反硝化菌大多是兼性菌, 其代谢途径丰富多样, 只要环境条件适宜, 反硝化过程就能顺利进行^[23]. 因此, 在底物竞争和不良环境条件下, 微丝菌为主导的丝状菌较菌胶团细菌有绝对优势而大量增殖, AOB 和 NOB 的相对丰度因竞争不利而降低, 反硝化菌因自身的适应能力较强而几乎不受影响.

膨胀期各厂 TN 和氨氮的去除率较非膨胀期有所降低, 波动幅度在 5% 左右. 城市污水处理厂属于较为复杂的系统, 脱氮菌的功能作用受制于多种环境因素的影响, 膨胀期 AOB 相对丰度的降低对

氨氮的去除率有一定影响，反硝化菌相对丰度的增加对 TN 去除效果的影响并不直观，主要由于反硝化作用还受碳源以及运行管理等因素的影响，因此，TN 在膨胀期的去除率有所降低。

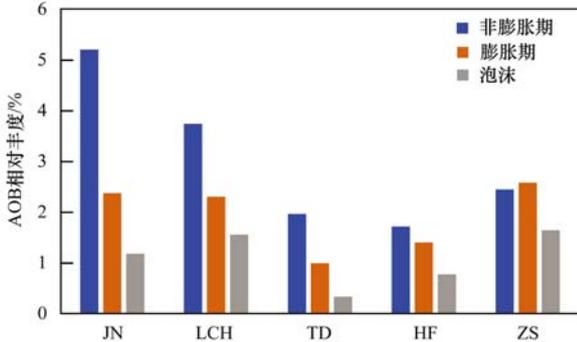


图 4 不同时期 AOB 相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of AOB during different periods

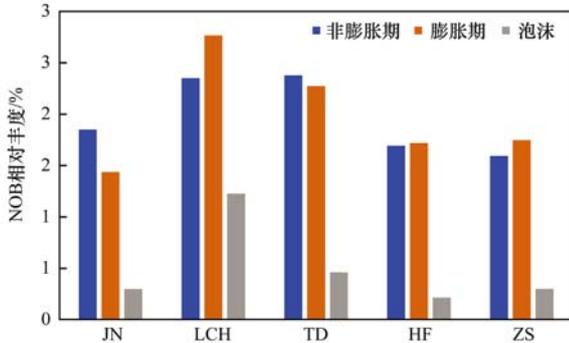


图 5 不同时期 NOB 相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of NOB during different periods

表 5 除磷菌属相对丰度范围/%

Table 5 Relative abundance range of PAO/%

项目	<i>Tetrasphaera</i>	<i>Candidatus Accumulibacter phosphatis</i>	<i>Dechloromonas</i>	PAO
非膨胀期	0.01 ~ 0.41	3.70 ~ 7.71	0.08 ~ 1.71	4.63 ~ 7.93
膨胀期	0.15 ~ 0.93	1.32 ~ 2.74	0.14 ~ 1.03	2.24 ~ 3.91
泡沫	0.04 ~ 0.51	0.86 ~ 1.88	0.04 ~ 1.11	0.97 ~ 2.59

泥中 *Candidatus Accumulibacter phosphatis* 时，其相对丰度一般在 4% ~ 24% 左右^[25, 26]，而本文测试结果中 *Candidatus Accumulibacter phosphatis* 在非膨胀期污泥中相对丰度均在该范围内，而在膨胀期污泥中低于范围最低值。

各厂不同时期聚磷菌的相对丰度变化规律比较明显，总体呈现出非膨胀期高于膨胀期，高于泡沫。从非膨胀期到膨胀期，降低比例范围为 15% ~ 47%，其中 JN 和 TD 厂的变化幅度较大，HF 厂的变化幅度最小，推测可能是由于该厂在氧化沟工艺之前设有厌氧池，对聚磷菌有一定的富集强化作用，使其在应对污泥膨胀时受到的影响相对较小。

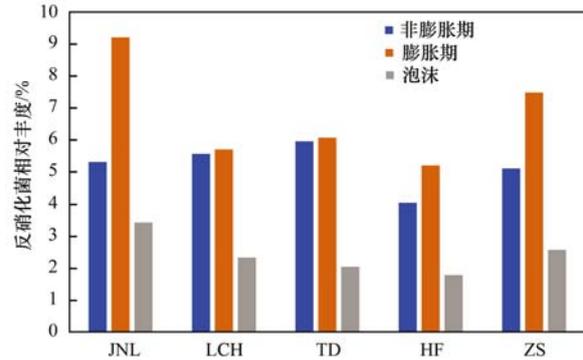


图 6 不同时期反硝化菌相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of denitrifying bacterium during different periods

2.5 除磷功能菌群变化规律

聚磷菌相对丰度统计结果如表 5 和图 7。其中 *Candidatus Accumulibacter phosphatis* 相对丰度分布在 0.86% ~ 7.71%，部分厂 *Dechloromonas* 菌属的相对丰度超过 1%，*Tetrasphaera* 菌属的相对丰度基本都在 1% 以下，而 *Tetrasphaera* 等菌属在活性污泥中占有较大比例(18% ~ 30%)时，才被认为是在除磷过程中起主要作用的聚磷菌^[24]。因此，各厂优势聚磷菌为 *Candidatus Accumulibacter phosphatis*。非膨胀期污泥、膨胀期污泥和泡沫中 PAO 相对丰度范围分别为 4.63% ~ 7.93%、2.24% ~ 3.91% 和 0.97% ~ 2.59%。研究表明，采用定量 PCR 和 FISH 等方法检测运行良好的污水处理系统活性污

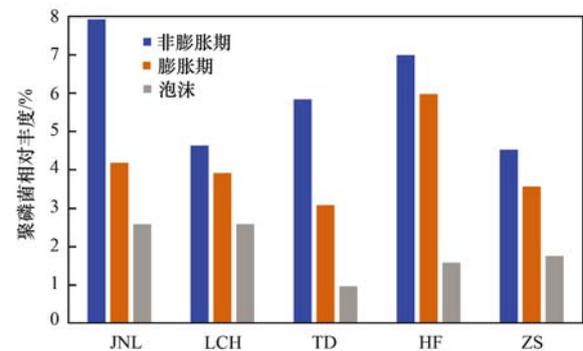


图 7 不同时期聚磷菌相对丰度对比

Fig. 7 Relative abundance of PAO during different periods

Wang 等^[27]在研究污泥膨胀对城市污水处理系统微

生物群落结构影响的研究中也发现 *Candidatus Accumulibacter phosphatis* 相对丰度在膨胀期大幅度降低. 膨胀期总磷去除率的降低与聚磷菌数量的减少有一定关系, 但影响并不明显, 总磷去除率的波动幅度在 3% 以内.

3 结论

(1) 结合形态学观察和 MiSeq 高通量测序得知 5 座城市污水处理厂发生的污泥膨胀均由丝状菌引起, 主要类型为微丝菌 (*Microthrix parvicella*).

(2) 5 座城市污水处理厂脱氮除磷优势菌属基本一致, 其中硝化细菌为亚硝化单胞菌 (*Nitrosomonas*) 和硝化螺菌 (*Nitrospira*), 反硝化菌为陶厄氏菌 (*Thauera*), 除磷菌为 *Candidatus Accumulibacter phosphatis*.

(3) 不同厂脱氮除磷功能菌受污泥膨胀的影响程度不同, 主要是处理工艺和水温的差异所致.

参考文献:

- [1] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming and other solids separation problems [M]. London UK: IWA Publishing, 2004.
- [2] Guo F, Zhang T. Profiling bulking and foaming bacteria in activated sludge by high throughput sequencing [J]. Water Research, 2012, **46**(8): 2772-2782.
- [3] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, *et al.* Filamentous bulking sludge—a critical review [J]. Water Research, 2004, **38**(4): 793-817.
- [4] 彭永臻, 郭建华. 活性污泥膨胀机理、成因及控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. 31-32.
- [5] 曾薇, 张丽敏, 王安其, 等. 污水处理系统中硝化菌的菌群结构和动态变化 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(11): 3257-3265.
- Zeng W, Zhang L M, Wang A Q, *et al.* Community structures and population dynamics of nitrifying bacteria in activated sludges of wastewater treatment plants [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(11): 3257-3265.
- [6] Gentile M E, Jessup C M, Nyman J L, *et al.* Correlation of functional instability and community dynamics in denitrifying dispersed-growth reactors [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(3): 680-690.
- [7] 陈燕, 刘国华, 范强, 等. 不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化 [J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2610-2616.
- Chen Y, Liu G H, Fan Q, *et al.* Carbon/nitrogen removal and bacterial community structure change in an A/O activated sludge system under different dissolved oxygen conditions [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2610-2616.
- [8] 张著, 高大文, 袁向娟, 等. 营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复 [J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3197-3201.
- Zhang Z, Gao D W, Yuan X J, *et al.* Aerobic granular sludge bulking due to the lack of nutrient and its recovery [J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3197-3201.
- [9] 高莎, 金德才, 赵志瑞, 等. A²O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性 [J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2912-2917.
- Gao S, Jin D C, Zhao Z R, *et al.* Diversity of culturable filamentous bacteria in the activated sludge from A²O wastewater treatment process [J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2912-2917.
- [10] 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 等. 低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 [J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1070-1074.
- Duan Z H, Pan L M, Chen X O, *et al.* Changes of microbial community structure in activated sludge bulking at low temperature [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1070-1074.
- [11] Palm J C, Jenkins D, Parker D S. Relationship between organic loading, dissolved oxygen concentration and sludge settleability in the completely-mixed activated sludge process [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1980, **52**(10): 2484-2506.
- [12] Nielsen P H, Roslev P, Dueholm T E, *et al.* *Microthrix parvicella*, a specialized lipid consumer in anaerobic-aerobic activated sludge plants [J]. Water Science and Technology, 2002, **46**(1-2): 73-80.
- [13] Knoop S, Kunst S. Influence of temperature and sludge loading on activated sludge settling, especially on *Microthrix parvicella* [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(4-5): 27-35.
- [14] 陈滢, 彭永臻, 刘敏, 等. 营养物质对污泥沉降性能的影响及污泥膨胀的控制 [J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 54-58.
- Chen Y, Peng Y Z, Liu M, *et al.* Effect of nutrient on sludge settling property and bulking controls [J]. Environmental Science, 2004, **25**(6): 54-58.
- [15] 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.
- [16] Levantesi C, Rossetti S, Thelen K, *et al.* Phylogeny, physiology and distribution of '*Candidatus Microthrix calida*', a new *Microthrix* species isolated from industrial activated sludge wastewater treatment plants [J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(9): 1552-1563.
- [17] Wang P, Yu Z S, Qi R, *et al.* Detailed comparison of bacterial communities during seasonal sludge bulking in a municipal wastewater treatment plant [J]. Water Research, 2016, **105**: 157-166.
- [18] Wagner M, Alexander L, Regina N, *et al.* Bacterial community composition and function in sewage treatment systems [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2002, **13**(3): 218-227.
- [19] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. Water Research, 2007, **41**(11): 2271-2300.
- [20] Nielsen P H, Mielczarek A T, Kragelund C, *et al.* A conceptual ecosystem model of microbial communities in enhanced biological phosphorus removal plants [J]. Water Research, 2010, **44**(17): 5070-5088.
- [21] Hallin S, Lydmark P, Kokalj S, *et al.* Community survey of ammonia-oxidizing bacteria in full-scale activated sludge processes with different solids retention time [J]. Journal of

- Applied Microbiology, 2005, **99**(3): 629-640.
- [22] Siripong S, Rittmann B E. Diversity study of nitrifying bacteria in full-scale municipal wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2007, **41**(5): 1110-1120.
- [23] Satoh H, Yamakawa T, Kindaichi T, *et al.* Community structures and activities of nitrifying and denitrifying bacteria in industrial wastewater-treating biofilms [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, **94**(4): 762-772.
- [24] Nguyen H T T, Le V Q, Hansen A A, *et al.* High diversity and abundance of putative polyphosphate-accumulating *Tetrasphaera*-related bacteria in activated sludge systems [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2011, **76**(2): 256-267.
- [25] Fukushima T, Uda N, Onuki M, *et al.* Development of the quantitative PCR method for *Candidatus* 'Accumulibacter phosphatis' and its application to activated sludge[J]. Journal of Water and Environment Technology, 2007, **5**(1): 37-43.
- [26] He S M, Gall D L, McMahon K D. "Candidatus Accumulibacter" population structure in enhanced biological phosphorus removal sludges as revealed by polyphosphate kinase genes[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(18): 5865-5874.
- [27] Wang J, Qi R, Liu M M, *et al.* The potential role of 'Candidatus Microthrix parvicella' in phosphorus removal during sludge bulking in two full-scale enhanced biological phosphorus removal plants[J]. Water Science & Technology, 2014, **70**(2): 367-375.



CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing; An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)