ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第6期
2017年6月15日

目 次

$PM_{2.5}$浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例 …… 吴健生, 王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化 …… 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响 …… 韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对$PM_{2.5}$浓度的影响 …… 董群, 赵普生, 王迎春, 苗世光, 高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征 …… 薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征 …… 吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O_3与SOA的生成潜势…… 邹宇,邓雪娇,李菲,殷长秦(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析 …… 王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 …… 王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性 …… 王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青躍,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估 …… 杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征 …… 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性 … 王鸿宇,黄成,胡磬遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性 …… 楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义 …… 许琦,李建鸿,孙平安, 何师意,于奭(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程…… 韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较 …… 姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征 …… 王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 …… 罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 … 张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成…… 齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用 …… 王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验 …… 金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚…… 张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H_2O_2/KI降解磺胺甲基嘧啶 …… 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同锆负载量锆改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比 … 姜博汇, 林建伟, 詹艳慧, 邢云青, 黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果 …… 郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析 …… 张世羊, 张胜花, 张翔凌, 王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响 …… 张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性 …… 冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析 …… 周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响 …… 周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制 …… 秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca^{2+}对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响 …… 任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析 …… 张崇淼,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析 …… 谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制 …… 李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征 …… 乔沙沙,周永娜, 柴宝峰,贾彤,李毳(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析 …… 陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例 …… 佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土砷释放的影响机制 …… 钟松雄,尹光彩, 陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系…… 陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果…… 陈立伟,杨文弢,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果 …… 田桃, 雷鸣, 周航, 杨文弢, 廖柏寒, 胡立琼, 曾敏(2553)
大豆和小麦根系对菲的吸持作用及其生物有效性 …… 王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响 …… 杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响 …… 罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N_2O排放的影响…… 郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径 …… 袁浩东,白瑶,李秋旭, 王英, 金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价 …… 王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响 …… 甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏芜,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 …… 王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)

反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析

谭阳[1,2],李激[1,3],徐巧[1,4],付磊[5],尤世界[2],王硕[1,3*]

(1. 江南大学环境与土木工程学院,江苏省厌氧生物技术重点实验室,无锡 214122; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室,哈尔滨 150090; 3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心,苏州 215009; 4. 宁波市城市排水有限公司,宁波 315000; 5. 大化集团有限责任公司,大连 116031)

摘要: 为研究温度及处理负荷对缺氧挂膜悬浮填料的活性恢复效果的影响,将填料分别置于低负荷、冲击负荷和低温环境中进行活性恢复适用性实验. 结果表明在填料活性恢复过程中起关键作用的是 EPS 中多糖的增加,冲击负荷和低温条件下多糖含量增加比蛋白质更为明显. 而低负荷下多糖和蛋白质含量均高于另外两者. 缺氧挂膜悬浮填料的活性恢复对冲击负荷条件的适用性较好,低温条件次之,对低负荷环境适用性较差. 另外,低负荷、冲击负荷和低温环境中 Proteobacteria 菌门的相对丰度分别由 15 d 时的 72.23%、78.66% 和 76.35% 上升至 25d 时的 83.17%、84.30% 和 80.46%, 15 d 时低负荷下 Proteobacteria 菌相对丰度低于其他反应器,缺氧悬浮填料不能作为污水处理厂低负荷下总氮快速达标的备选方案. 反硝化功能菌属 *Dechloromonas* 相对丰度的增加可能是引起填料生物膜反硝化脱氮能力提高的重要原因. *Flavobacterium* 菌属的存在可能促进了低温下填料生物膜反硝化脱氮能力的恢复. 不同恢复环境对缺氧生物膜恢复完成时的生物多样性影响较小.

关键词:悬浮填料;活性恢复;胞外聚合物;脱氮效能;微生物群落结构

中图分类号: X172; X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)06-2486-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201610110

Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers

TAN Yang[1,2], LI Ji[1,3], XU Qiao[1,4], FU Lei[5], YOU Shi-jie[2], WANG Shuo[1,3*]

(1. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, School of Environment and Civil Engineerin, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Jiangsu College of Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China; 4. Ningbo Municipal Drainage Co. Ltd., Ningbo 315000, China; 5. Dahua Group Co., Ltd., Dalian 116031, China)

Abstract: In order to investigate the effects of temperature and organic loading on the bioactivity reactivation of anoxic biofilm in suspended carriers, the experiment was carried out under low organic loading, shock loading and low temperature conditions. The experimental results showed that the increase of polysaccharide in extracellular polymeric substance (EPS) was important during bioactivity reactivation process, and polysaccharide content was higher than that of protein under shock loading and low temperature conditions, and the contents of both polysaccharide and protein were much higher under low organic loading condition. Anoxic biofilm achieved excellent applicability in shock loading condition, moreover anoxic biofilm reactivated under low organic loading had lowest denitrication capacity and anoxic biofilm recovered at low temperature was in between. In addition, the relative abundance of Proteobacteria under low organic loading, shock loading and low temperature conditions increased from 72.23%, 78.66% and 76.35% to 83.17%, 84.30% and 80.46% at the end of the reactivation process (25th day), respectively. However, the relative abundance of Proteobacteria under low organic loading was lower than those of other reactors, indicating that the anoxic suspended carriers were less suitable for total nitrogen removal in wastewater treatment plant. The increase in relative abundance of *Dechloromonas* was significant for enhancing total nitrogen removal, and anoxic biofilm possessed comparatively rich biodiversity when the denitrification capability was recovered. The presence of *Flavobacterium* could promote the denitrification capacity of biofilm at low temperature.

Key words: suspended carrier; bioactivity reactivation; extracellular polymeric substance; denitrification efficiency; microbial community structure

目前污水处理厂运行中存在出水总氮难以达标的现实问题,且其去除受低温,有机负荷和工业废水影响较大,是污水处理厂稳定运行所面对的巨大挑战. 对此,污水处理厂一般采用投加碳源和悬浮填料的方式以增强总氮去除效果. 在外加碳源充足的条件下,将悬浮填料从投加到挂好缺氧

收稿日期: 2016-10-17; **修订日期**: 2017-01-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07306-001);江苏省重点研发计划(社会发展)科技示范工程项目(BE2015622);江南大学国家级大学生创新创业训练计划项目(201410295048)

作者简介: 谭阳(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为污染控制与资源化,E-mail:tanyang523@163.com

* 通信作者,E-mail:shuowang@jiangnan.edu.com

生物膜至少需要 11 周时间[1]，周期相对较长，而且污水处理厂缺氧单元需要投加的填料数目相当巨大，无法满足短期内污水处理厂总氮迅速达标排放的要求. 因此，如果预先培养出大量缺氧生物膜填料，当需要填料时只要将其取出，经过短时间的活性恢复即可投入生产，可以有效解决总氮无法稳定达标排放的现实问题，同时可以提高污水处理厂生产效率.

投加悬浮填料到污水处理厂操作单元过程中可能遇到各种不同环境条件，如南方城市降水较多，排水体制采取合流制方式，排水管网渗漏[2]，均会对城镇污水产生稀释作用，导致进水有机负荷明显降低；上游工业废水水质波动较大，进水存在冲击负荷；冬季温度较低导致微生物代谢活性下降等，这些条件都会对填料的活性恢复效果产生影响. 因此，研究悬浮填料活性恢复过程在低负荷，冲击负荷及低温条件的适用性，对悬浮填料储存与活性恢复技术在实际工程中能否开展广泛应用具有重要的理论和现实意义.

环境微生物群落是由大量的具有不同遗传性状的微生物组成. 了解群落组成成分的变化有助于从宏观水平上认识群落的结构变化，从而帮助解析生理生化特性产生变化的原因. 随着分子生物学技术在污水生物处理领域的广泛应用，人们对环境微生物有了更多的认识. 王昊昱等[3]利用 454 高通量测序法对厌氧消化反应器污泥中的细菌及古细菌进行了群落结构分析. Martín 等[4]对 *Ca. Accumulibacter* 进行全基因组测序，检测到了亚硝氮还原至氮气的基因. 分子生物学技术已成为研究环境样品微生物群落结构的重要手段.

目前国内外的相关研究主要集中于填料材料开发[5,6]、污染物去除特性[7,8]及强化硝化反硝化[9~11]等，而对于缺氧生物膜填料的活性恢复及其适用性的研究相对较少. 因此，本文将已完成缺氧挂膜的悬浮填料作为研究对象，以正常负荷及常温下运行为对照，考察不同恢复环境（低负荷、冲击负荷、低温）条件下缺氧生物膜填料在活性恢复过程中物理特性、污染物去除过程及反硝化性能，解析悬浮填料反硝化活性恢复过程中微生物菌群结构，以期为缺氧悬浮填料技术在实际工程中的应用提供理论依据和技术支持.

1　材料与方法

1.1　实验装置

反应器由 4 个体积为 5 L 的有机玻璃容器组成，顶部设有搅拌装置，保证反应器内悬浮填料充分流化. 每个反应器分别填充等量悬浮填料，填充率为 30%（体积分数），实验装置如图 1 所示.

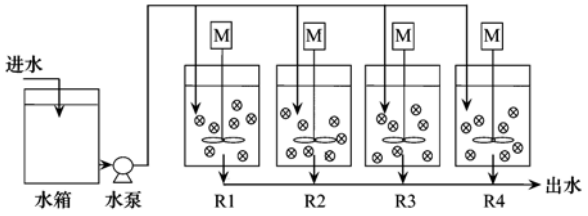

图 1　实验装置示意

Fig. 1　Schematic diagram of experimental set-up

1.2　实验条件

取缺氧挂膜悬浮填料若干，均分后分别置于 4 个反硝化反应器中，将反应器分别按如下情况编号并设置实验条件. R1：对照组、R2：低负荷组、R3：冲击负荷组、R4：低温组，具体进水水质及温度条件如表 1 所示. 实验均采用人工配水间歇进出水的方式，水力停留时间为 8 h.

表 1　人工配水水质[1)]

Table 1　Components and concentrations of synthetic wastewater

项目	COD /mg·L^{-1}	NH_4^+-N /mg·L^{-1}	NO_3^--N /mg·L^{-1}	TP /mg·L^{-1}	pH	水温/℃	DO /mg·L^{-1}
R1	200 ~ 300	0. 1 ~ 0. 5	10 ~ 15	2 ~ 4	6. 3 ~ 7. 5	15 ~ 20	0
R2	60 ~ 100	0. 1 ~ 0. 5	10 ~ 15	2 ~ 4	6. 3 ~ 7. 5	15 ~ 20	0
R3	200 ~ 1 200	0. 1 ~ 0. 5	10 ~ 15	2 ~ 4	6. 3 ~ 7. 5	15 ~ 20	0
R4	200 ~ 300	0. 1 ~ 0. 5	10 ~ 15	2 ~ 4	6. 3 ~ 7. 5	10	0

1）冲击负荷组的有机负荷条件设置为正常负荷（COD 为 200 ~ 300 mg·L^{-1}）与冲击负荷（COD 为 600 ~ 1 200 mg·L^{-1}）交替进水

1.3　分析指标与方法

（1）水质分析　实验过程中各项水质指标采用文献[12]的方法测定.

（2）附着生物量测定　实验用 SPR-1 型悬浮填料的材质为聚乙烯，温度超过 130℃ 时易变形分解，难以用常规灼烧法测其生物量. 故本实验结合 Douterelo 等[13]的测量方法并加以改进，采用低温烘干的方式进行填料有效生物量的测定. 具体步骤如下.

附着总生物膜量（TS，单位：以 TS/载体计，

$mg \cdot g^{-1}$)测定:TS = ($m_1 - m_2$)/取出填料总重量. 从反应器中取出 3 ~ 5 个填料在 70 ~ 80℃ 条件下烘干至恒重,称重记 m_1;用移液管刷将填料表面生物膜刷至烧杯中,并用 1 $mg \cdot L^{-1}$ NaOH 浸泡填料并用电磁炉煮沸并搅拌 60 min[11],取出超声 10 min,用蒸馏水冲洗后烘干至恒重,称重记为 m_2.

附着生物量(VS,单位:以 VS/载体计,$mg \cdot g^{-1}$)测定:

$$VS = TS \times W$$

式中,W:将填料表面刷下的生物膜置于坩埚内,于 105℃ 烘箱内烘干称重 m_3,再于 500℃ 马弗炉内灼烧后称重 m_4 及干锅重量 m_0,则 $W = (m_4 - m_0)/(m_3 - m_0)$.

(3)生物膜 EPS 提取与测量 EPS 是微生物代谢产生的位于细胞表面的高分子聚合物质,本实验采用甲酰胺-NaOH 的方法提取生物膜的 EPS[14],通过测试生物膜 EPS 中蛋白质和多糖的含量来反映生物膜 EPS 含量,样品采用蒽酮比色法测定多糖类物质的含量[15],考马斯亮蓝法测定蛋白质类物质的含量[16].

(4)填料微生物菌群分子生物学分析 取若干填料样品,用超纯水清洗后将生物膜刷于灭菌的 Eppendorf 离心管中,加入 2 mL 1 × PBS 混匀,在 5 000 $r \cdot min^{-1}$条件下离心 5 min,弃去上清液,如此清洗生物膜样品 2 ~ 3 次. 采用 ABigen 土壤 DNA 提取试剂盒(柱形)提取填料微生物总宏基因组,然后用 1% 琼脂糖凝胶电泳(电压 120 V,时间 15 min)来检测所提取 DNA 的浓度和纯度,最后置于 -20℃ 下保存备用. PCR 扩增及 HiSeq 建库委托上海晶能生物技术有限公司进行,测序平台为 Illumina HiSeq,采用 Trimmomatic 软件对序列进行去杂,采用 Qiime 软件进行群落丰度计算.

2 结果与讨论

2.1 附着生物量变化

如图 2 所示,4 组反应器的悬浮填料在活性恢复初期附着生物量均呈下降趋势,原因是填料在储存过程中缺乏营养物质,部分生物膜失活脱落. 随后 R1 ~ R4 生物量均有所恢复,最大值分别为 93.79、53.39、86.14 和 77.82 $mg \cdot g^{-1}$. 其中前 5 d 内 R2 和 R4 生物量下降更多,表明低温及低负荷条件对微生物活性恢复初期影响更大. 但随着恢复时间的增加,R4 生物量快速升高,说明填料附着微生物能够进行自我调节,提高自身对低温的适应性. 这种自我调节可能是通过改变自身代谢途径,建立一种新的低温代谢和种群结构来实现的[18]. 而 R2 生物量增加缓慢,至恢复周期结束其生物量仅比恢复过程启动时提高了 16.69%,表明微生物生长代谢受进水有机负荷限制,生物膜增殖速率缓慢,在长期饥饿条件下进行内源呼吸作用不利于其生物活性的恢复. 因此在低负荷条件下,缺氧挂膜填料不适用于短期降低出水总氮的情况.

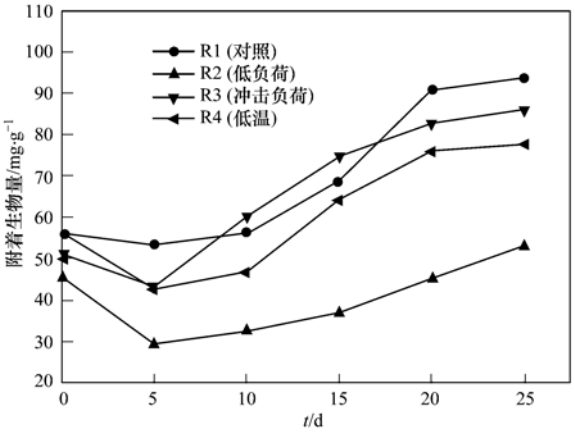

图 2 不同反应器填料附着生物量变化

Fig. 2 Biomass variations of suspended carriers of R1-R4

2.2 胞外聚合物含量变化

不同环境下微生物分泌的胞外聚合物化学组成不同,通过影响细胞间的黏附过程和生物膜内部结构对悬浮填料活性恢复起到重要作用[19]. 由图 3 可以看出,在恢复过程前 5 d 4 组反应器填料生物膜溶解性 EPS 中的蛋白质和多糖含量均呈明显下降趋势. 这是由于储存过程中营养物质和溶解氧缺乏,填料生物膜外层微生物处于饥饿条件下,会利用胞外聚合物以保持其生存能力和微生物活性[20]. 反应器开始运行后,外层微生物活性迅速恢复,为了维持生物膜内外微生物平衡,生物膜内部溶解性 EPS 被转化用来维持生物膜完整的结构. 生物膜溶解性 EPS 中的蛋白质和多糖含量与图 2 中 R1 ~ R4 填料附着生物量前 5 d 变化趋势一致,与 McSwain 等[21]所得的附着生物膜量与 EPS(即蛋白质和多糖)存在密切联系的研究结论相符. R1 中填料微生物对多糖的合成速率高于蛋白质,随着恢复时间的增加,生物膜性质、多糖和蛋白质类物质浓度均趋于稳定. 有研究表明[22,23],生物膜 EPS 中的蛋白质能够强化相邻细胞间相互交联作用,较高的 PN 浓度有利于维持生物膜内部结构和生物量,而较高的 PS 浓度能够有效提高细胞的黏附作用,维持生物膜外层结构的稳定. 本阶段采用的悬浮填料在储存之

前已经完成缺氧挂膜，其内部生物膜结构比较完整，而细胞间黏附性在储存过程中减弱，细胞膜外层结构遭到一定程度的破坏，因此在活性恢复过程中起关键作用的是 EPS 中多糖的增加.

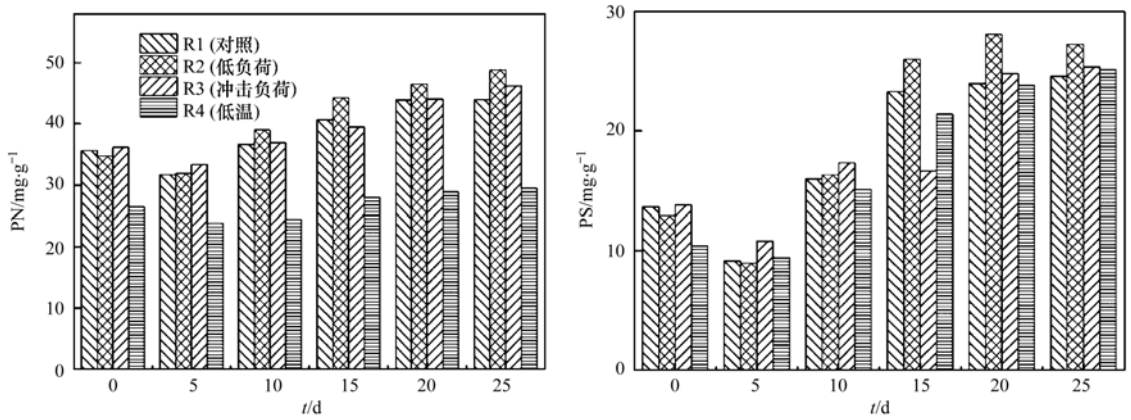

图 3　生物膜 EPS 中蛋白质和多糖含量的变化

Fig. 3　Changes in protein(PN) and polysaccharides(PS) contents of biofilm EPS during reactivation

R3 除了在受到负荷冲击时多糖含量有所波动之外，蛋白质含量及正常负荷状态下的多糖含量变化趋势与 R1 基本相同，这是因为在有机负荷较高时，微生物不能充分利用过量的碳源，而将其转变为多糖类物质储存在胞外[24]，使 EPS 中多糖含量升高. 而 R2 中多糖和蛋白质含量均比 R1 高，其原因是在高负荷条件能够满足微生物代谢所需的营养物质，因此微生物分泌的 EPS 含量相对稳定，而低负荷意味着进水中营养物质较少，微生物有较慢的生长速率和较高的内源代谢水平，部分细胞发生自溶，使 EPS 含量增加[25]. R4 的多糖含量增加比蛋白质更为明显，这是由于温度影响细胞的生理活动，随着温度的降低，酶促反应速度会降低[26]，细胞分泌蛋白质的过程受到一定抑制.

2.3　污染物去除特性

2.3.1　NO_3^--N的还原

由图 4 可知，随着恢复时间的增加，各反应器中填料对NO_3^--N的还原率均有所上升，其中 R1 在 3 d 时达到 90% 以上，R4 则在 5 d 时恢复到同等水平，并在之后的时间里分别保持平均 95.89% 和 95.18% 的稳定NO_3^--N还原能力，这与 2.1 节中 R4 在 5 d 后附着生物量快速升高相吻合. R3 在 3 d 时NO_3^--N还原率达到 95.58% 后，无论有机负荷如何变化，出水中硝酸盐始终保持很低的浓度，NO_3^--N还原率维持在 90% 以上，这表明较高的碳源浓度对硝酸盐的还原不会产生较大影响，冲击负荷不会干扰悬浮填料微生物硝酸盐还原能力的恢复. 相比之下，R2 的NO_3^--N还原率在 3 d 时仅为 56.4%，在悬浮填料恢复过程中，其NO_3^--N还原率最高仅为 74.36%，在 25 d 的恢复过程中反硝化一直不完全，与周娜[18]的研究结果较为一致. 主要原因在于微生物在低负荷下长时间处于内源代谢期，碳源首先部分贮存在体内以保持菌体生长，导致用于反硝化过程的碳源浓度进一步降低[27]. 但与活性污泥系统在低负荷条件下 59.4% 的NO_3^--N平均还原率[28]相比，悬浮填料系统(NO_3^--N平均还原率为 67.8%)更适用于低负荷条件.

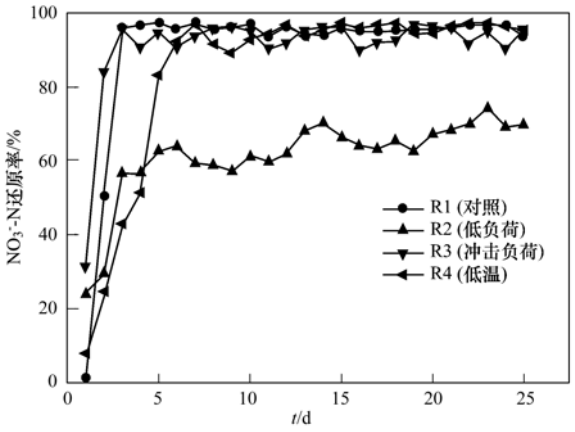

图 4　各反应器对NO_3^--N的还原率

Fig. 4　NO_3^--N reductive efficiencies of R1-R4 during the reactivation

2.3.2　NO_2^--N的积累

亚硝酸盐氮(NO_2^--N)是反硝化过程的中间产物，其积累会对反硝化菌产生毒害作用，抑制反硝化过程，进而对污水处理厂生物处理工艺的正常运行造成破坏. 此外，在常规脱氮工艺中，积累有大量NO_2^--N的废水离开缺氧池后会在之后的好氧池中重新被氧化为NO_3^--N，使得脱氮时需氧量增大，不但降

低处理效果,而且浪费了能源[29].

4 组反应器在活性恢复过程的NO_2^--N质量浓度变化如图 5 所示,R1 和 R3 仅在前 2 d 出现了NO_2^--N积累现象,之后出水NO_2^--N质量浓度均低于 0.03 mg·L^{-1}. R2 前 2 d 出水NO_2^--N较低,之后出现了严重的NO_2^--N积累,到 12 d 之后出水中才没有NO_2^--N检出. R2 中前 2 d 和 12 d 之后NO_2^--N质量浓度均较低但原因不同:在亚硝酸盐氮积累阶段,同时存在亚硝酸盐氮的增加(硝酸盐氮还原产生)和减少(亚硝酸盐氮还原为氮气),可认为亚硝酸盐氮积累是反硝化过程中两步反应速率差造成的[30],前 2 d 内 R2 中硝酸盐还原菌和亚硝酸盐还原菌活性均未恢复,结合图 4 中前 2 d 内NO_3^--N还原率较低,NO_3^--N 还原产生的NO_2^--N 本就较少,因此出水NO_2^--N质量浓度低;而 12 d 后随着硝酸盐还原菌和亚硝酸盐还原菌活性缓慢恢复,NO_3^--N还原产生的NO_2^--N均可以被进一步还原,因此没有出现NO_2^--N积累现象. R2 恢复前期NO_2^--N积累严重是由于在低负荷条件下碳源缺乏所致,与硝酸盐还原菌相比,亚硝酸盐还原菌在争夺电子受体时处于劣势[31]. 而 R4 恢复前期同样出现了NO_2^--N严重积累,这是由于亚硝酸盐还原菌比硝酸盐还原菌对温度更为敏感,受到低温抑制作用更大. 虽原因不同,但 R2 和 R4 两个反应器的亚硝酸盐还原菌活性恢复都受到了影响,导致硝酸盐还原为亚硝酸盐的速率大于亚硝酸盐还原为氮气的速率,表现出亚硝酸盐的积累. 经过时间不等的活性恢复过程后,4 个反应器的缺氧挂膜悬浮填料生物膜均已具有良好而稳定的降解亚硝酸盐的能力.

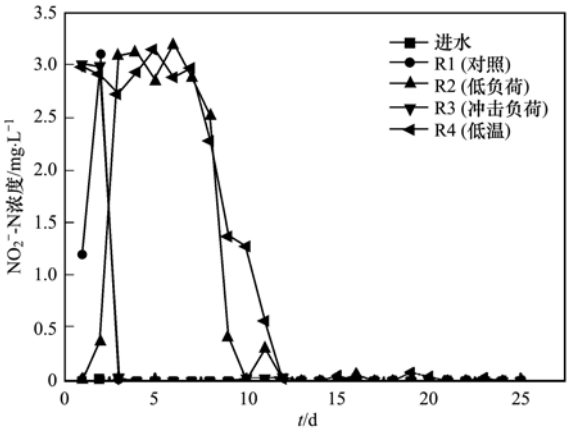

图 5 各反应器NO_2^--N质量浓度的变化

Fig. 5 Changes of NO_2^--N mass concentration of R1-R4 during the reactivation

2.3.3 脱氮效能

由图 6 可以看出,4 个反应器的反硝化效能均随恢复时间的增加有所恢复,其中 R1 和 R3 的恢复效果较明显,运行到 5 d 时反硝化速率(以NO_3^--N/

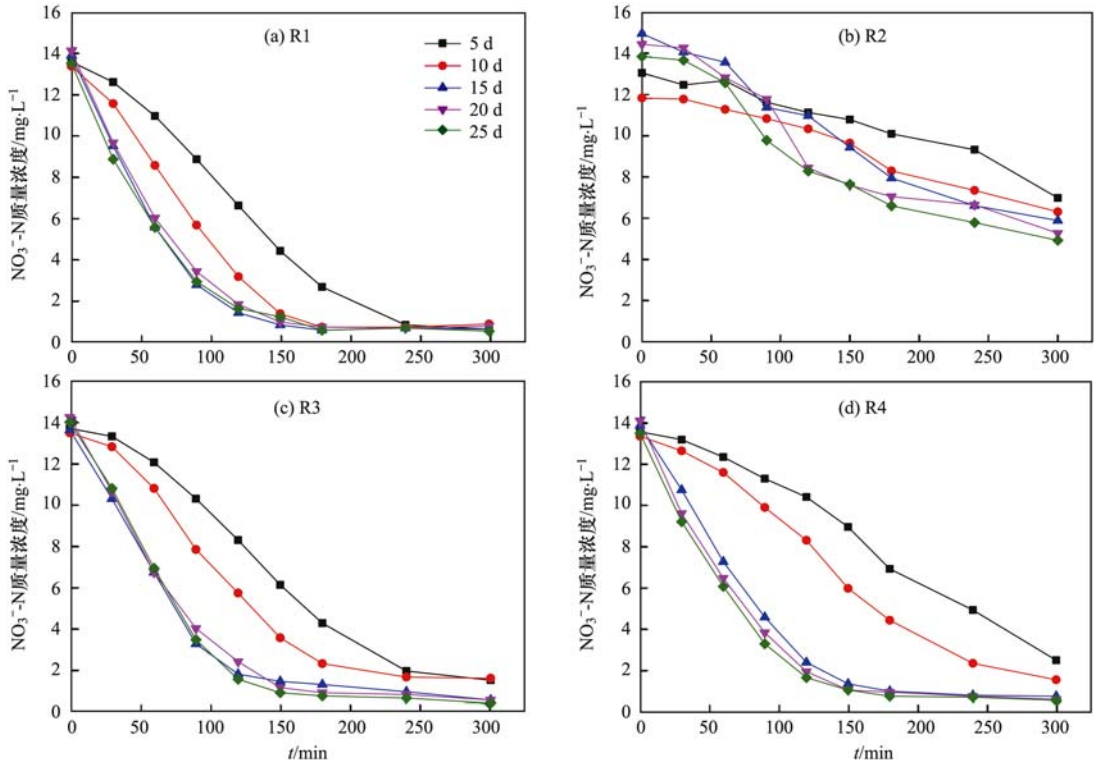

图 6 不同反应器硝酸盐还原特性

Fig. 6 Characteristics of nitrate reduction of R1-R4

VSS 计)均达到为 1.5 mg·(g·h)$^{-1}$左右,R4 达到相同水平需要 10 d. R1、R3 和 R4 反硝化速率均在 15 d 后逐渐恢复稳定,数值为 5.4 mg·(g·h)$^{-1}$左右,且均在 160 min 左右将NO_3^--N质量浓度降至 1 mg·L^{-1}以下. 而 R2 在 25 d 的活性恢复过程中均不能在 300 min 内实现完全反硝化,NO_3^--N 还原率仅由 46.68% 提高到 64.71%. 这是由于在低负荷状态下,反硝化异养菌将分别利用易降解有机物和内碳源,导致其反硝化能力大幅下降[32].

悬浮填料的脱氮过程包括硝酸盐氮还原为亚硝酸盐氮和亚硝酸盐氮还原为氮气两个步骤,因此评价其脱氮能力应当同时考虑硝酸盐的还原和亚硝酸盐的积累两个效果. 如图 7 所示,R1 及 R3 运行到 10 d 时即可实现 300 min 内NO_2^--N的全部还原,并且这一时间在 15 d 后减少为 180 min,R4 达到相同亚硝酸盐零积累能力分别需 15 d 和 20 d. 而 R2 运行到 20 d 时,300 min 内依然有 0.053 mg·L^{-1}的NO_2^--N积累,25 d 才可以用 250 min 的时间完成亚硝态氮零积累. 以上结果表明,缺氧悬浮填料的活性恢复对冲击负荷条件的适用性较好,低温条件次之,对低负荷环境适用性较差. 因此当应用缺氧悬浮填料的污水处理厂存在处理水质负荷较低的问题时,需要考虑通过额外投加碳源的方式提高脱氮能力.

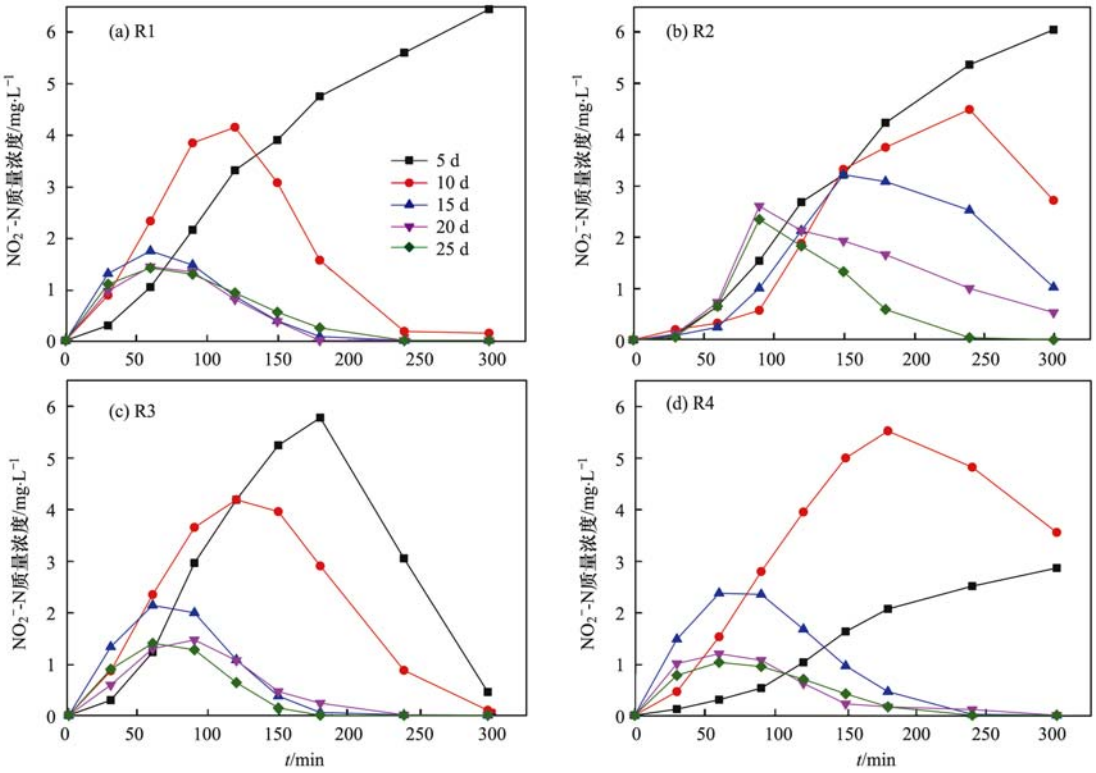

图 7　不同反应器亚硝酸盐积累特性

Fig. 7　Characteristics of nitrite accumulation in R1-R4

2.4　微生物种群生物多样性变化

本实验采用 Illumina HiSeq 3000 测序平台对各反应器内不同恢复时期的悬浮填料缺氧生物膜进行 16S rRNA 高通量测序,以表征恢复过程中的生物膜微生物群落结构变化. 根据测序报告中丰富度稀疏分析图的曲线趋于平缓可得出,本实验测序数据量合理,更多的数据只会产生少量新的操作分类单元,即所获实验测序数据准确可靠.

采用 Chao1 指数来分析不同运行阶段的缺氧生物膜微生物多样性的物种丰富度,用香农指数(Shannon)来分析其均匀度与丰富度综合特征(图 8). 运行第 15 d 时,R2 反应器微生物 Shannon 指数和 Chao1 指数分别为 3.67 和 385,均高于其他反应器. 可知低负荷下的缺氧挂膜悬浮填料的生物膜中物种较丰富,但由于其与氮类污染物还原有关的菌种含量较低,此时 R2 反应器的脱氮效果不理想. 当运行到 25 d 时,各组反应器的 Shannon 指数和 Chao1 指数基本相同,表明不同恢复环境对缺氧生物膜恢复完成时的生物多样性水平影响较小.

2.5　微生物群落结构变化

由图 9 可知,不同运行时期缺氧填料生物膜中,Proteobacteria 菌门和 Bacteroidetes 菌门是最占优势

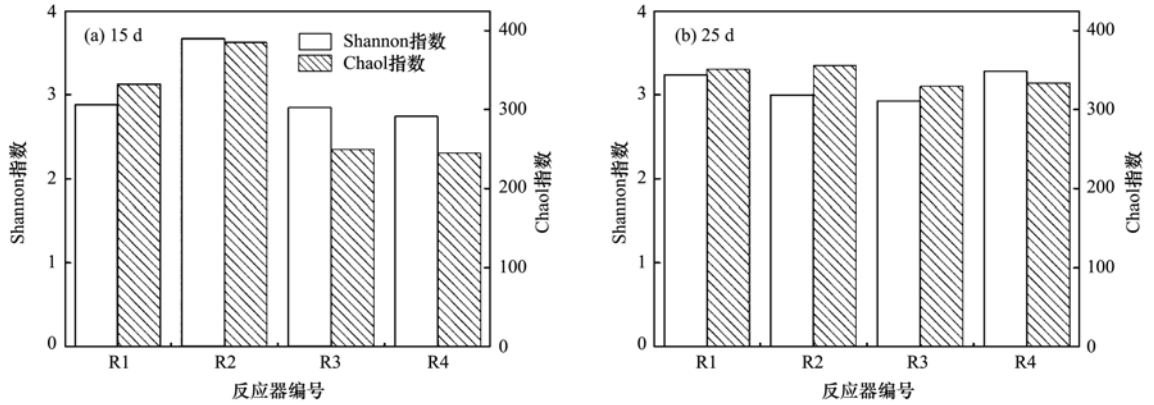

图 8 种群生物多样性指标变化

Fig. 8 Changes of community biodiversity index

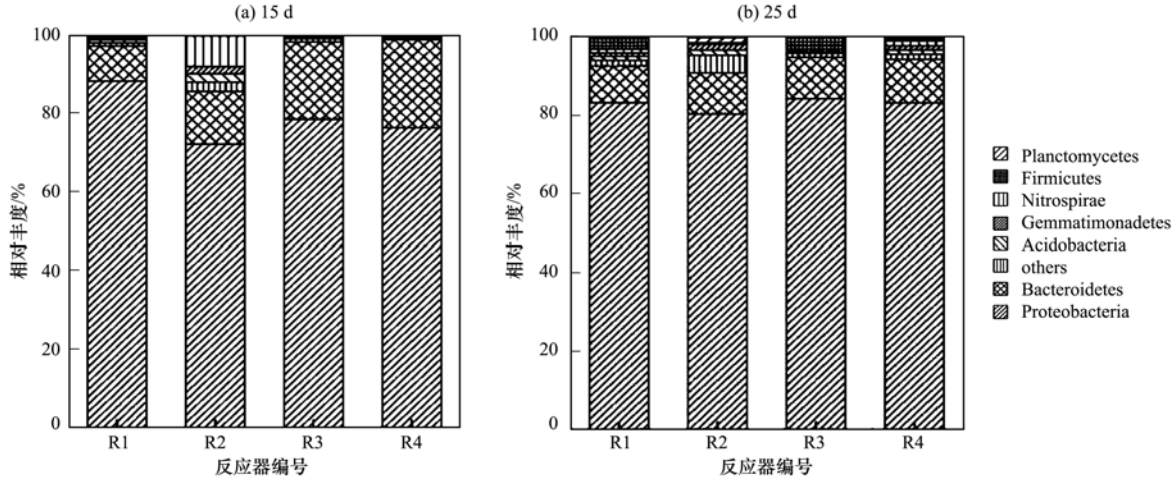

图 9 填料生物膜细菌菌门分布

Fig. 9 Distributions of bacterial strains at level of phylum

的两个细菌菌门. 生物膜中 Proteobacteria 菌门的相对丰度随着培养时间的延长除在 R1 中略微下降外,在 R2、R3 和 R4 反应器中均逐渐升高,分别由 15 d 时的 72.23%、78.66% 和 76.35% 上升至 25 d 时的 83.17%、84.30% 和 80.46%;Bacteroidetes 菌门除在 R1 中稍有上升外,在 R2、R3 和 R4 反应器中均呈相对下降的趋势,分别由 15 d 时的 13.46%、19.56% 和 32.57% 下降至 25 d 时的 7.63%、17.64% 和 13.23%. 对测序结果进一步分析可知,Proteobacteria 菌门中主要组分为 β-Proteobacteria,研究表明,β-Proteobacteria 广泛存在于污水处理过程中,是降解氮类污染物的重要菌群,其中有大部分菌属能够在厌/缺氧条件下降解有机物污染物进行生长和繁殖[33]. R2 的生物膜在第 15 d 时 Proteobacteria 菌相对丰度低于其他反应器,表明短期内低负荷下填料脱氮效果恢复不佳,不能作为污水处理厂低负荷条件下总氮快速达标的备选方案.

进一步将微生物菌群以属划分,结果如图 10 所示. 在 8 个样品中相对丰度最高的细菌菌属有:*Dechloromonas*、*Simplicispira*、*Pseudomonas*、*Flavobacterium*、*Zoogloea* 和 *Ferribacterium*,其相对丰度之和分别占 8 个样品总菌属的 83.16%、71.83%、49.02%、72.66%、46.36%、58.99%、60.22% 和 72.53%. 随着恢复时间的增加,填料生物膜中的细菌种类均出现了较大变化. 对照组 R1 反应器中生物膜微生物菌属中所占比例最大的为 *Dechloromonas* 菌属,占总菌属的 40% 以上,R2 中 *Dechloromonas* 菌属相对丰度仅为 10% 左右. R3 中最优势的菌种除 *Dechloromonas* 菌属外还有 *Pseudomonas* 菌属,且这两种菌属相对丰度之和由 15 d 时的 33.38% 增加到 25 d 时的 46.92%. 有研究表明,*Dechloromonas* 菌属是一类典型的具有反硝化功能的菌属[34],其中典型的菌种如 *D. agitate* 和 *D. denitrificans* 都具有一定的硝酸盐降解能力[35],而 *Pseudomonas* 菌属具有较高的脱氮除磷特性[36]. 这与 R1 和 R3 反应器脱氮效果较好的现象符合. 与

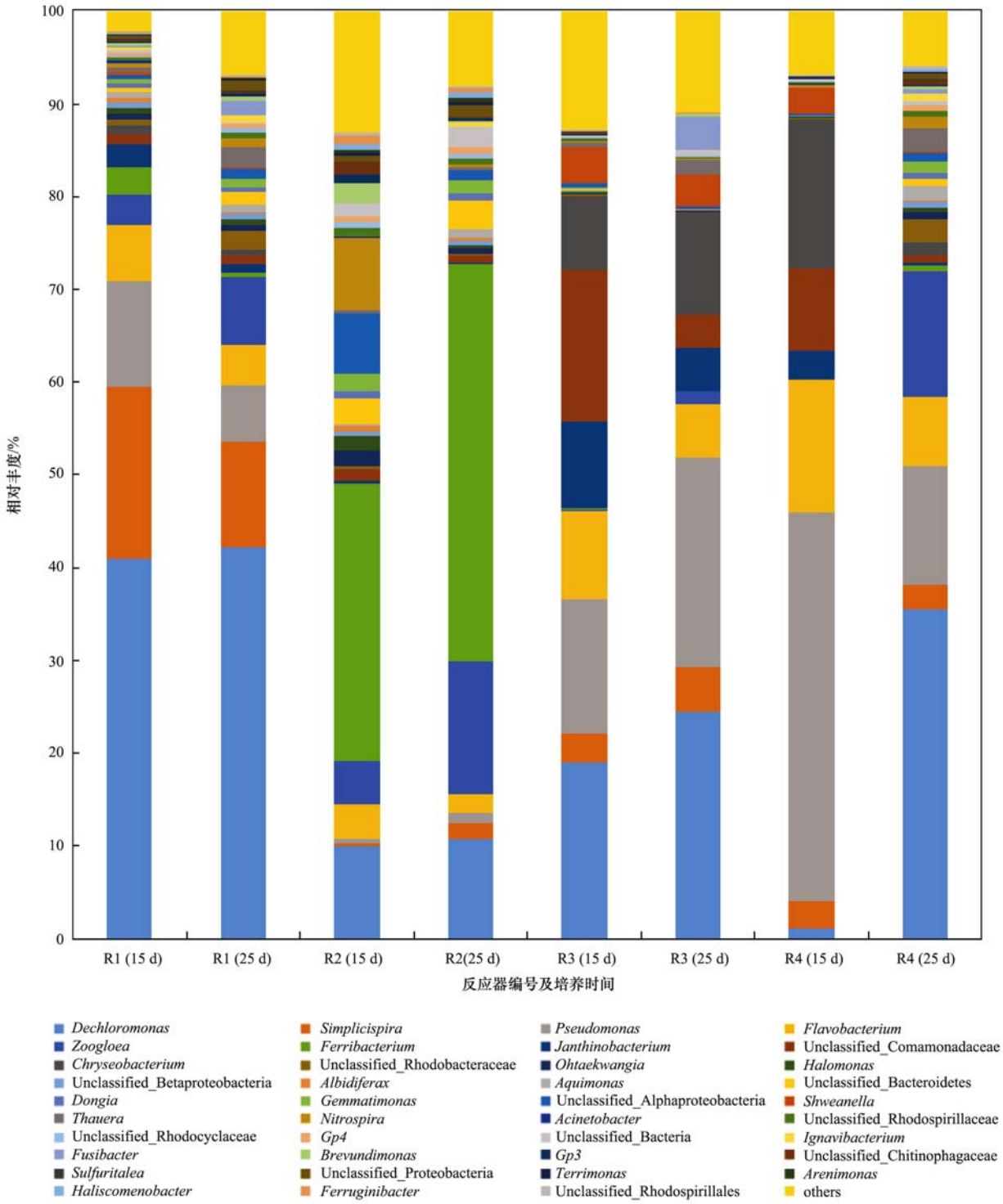

图 10　填料生物膜细菌菌属分布

Fig. 10　Distributions of bacterial strains at level of genus

对照组 R1 进行比较，R4 中 *Dechloromonas* 菌属的相对丰度由 15 d 时的 1.09% 增加到 25 d 时的 35.47%，*Pseudomonas* 菌属则由 41.91% 下降到 12.84%，而 R4 反应器依然能够较快且较好地恢复脱氮效果，因此反硝化功能菌属 *Dechloromonas* 相对丰度的增加可能是引起填料生物膜反硝化脱氮能力提高的重要原因. 另外，R4 反应器 *Flavobacterium* 菌属的相对丰度在 15 d 和 25 d 时分别为 14.30% 和 9.48%，均高于同时期的 R1 ~ R3 反应器. 有研究表明，*Flavobacterium* 菌属能够还原硝酸盐且适合在低温下生长[37]，因此 *Flavobacterium* 菌属的存在可能在一定程度上促进了低温条件下填料生物膜反

硝化脱氮能力的恢复.

3 结论

(1)冲击负荷对附着生物量恢复影响不大,低温及低负荷条件对微生物活性恢复初期影响较大.但随着恢复时间的增加,填料附着微生物能够进行自我调节,提高自身对低温的适应性. 低负荷下生物膜增殖速率缓慢,不利于其生物活性的恢复.

(2)在填料活性恢复过程中起关键作用的是EPS中多糖的增加. 冲击负荷和低温条件下多糖含量增加比蛋白质更为明显. 而低负荷下由于部分细胞自溶,导致多糖和蛋白质含量比另外两者要多.

(3)挂膜填料脱氮效能恢复在一定的负荷冲击范围内不会受其影响,低温条件对填料脱氮能力恢复的影响较小,低负荷下脱氮能力恢复有限. 因此缺氧挂膜悬浮填料的活性恢复对冲击负荷条件的适用性较好,低温条件次之,对低负荷环境适用性较差.

(4)缺氧悬浮填料不能作为污水处理厂低负荷下总氮快速达标的备选方案. 反硝化功能菌属*Dechloromonas*相对丰度的增加可能是引起填料生物膜反硝化脱氮能力提高的重要原因. *Flavobacterium*菌属的存在可能促进了低温下填料生物膜反硝化脱氮能力的恢复. 不同恢复环境对缺氧生物膜恢复完成时的生物多样性影响较小.

参考文献:

[1] 任彦强, 赵雪莲, 李宗慧, 等. MBBR悬浮填料低温处理生活污水对比实验研究[J]. 河北工业科技, 2014, **31**(3): 215-219.
Ren Y Q, Zhao X L, Li Z H, *et al*. Comparative research on MBBR suspended carriers for the municipal sewage treatment at low temperature[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2014, **31**(3): 215-219.

[2] 温荣平, 卢东昱, 郭伟, 等. 低负荷城市污水厂的运行问题与对策[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(18): 144-146, 150.
Wen R P, Lu D Y, Guo W, *et al*. Operation problems and countermeasures of municipal wastewater treatment plant at low organic loading[J]. China Water & Wastewater, 2010, **26**(18): 144-146, 150.

[3] 王昊昱, 陶彧, 任南琪. 底物类型对产甲烷效能及微生物群落结构的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, **48**(2): 9-14.
Wang H Y, Tao Y, Ren N Q. Impact of organic matter type on the efficiency and microbial community structure of an anaerobic digestion process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, **48**(2): 9-14.

[4] Martín H G, Ivanova N, Kunin V, *et al*. Metagenomic analysis of two enhanced biological phosphorus removal (EBPR) sludge communities[J]. Nature Biotechnology, 2006, **24**(10): 1263-1269.

[5] 海景, 黄尚东, 张凡, 等. 改性聚丙烯生物填料的制备与应用[J]. 化工环保, 2006, **26**(4): 333-336.
Hai J, Huang S D, Zhang F, *et al*. Preparation of modified polypropylene biofilm carrier and its application[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2006, **26**(4): 333-336.

[6] Ferrai M, Guglielmi G, Andreottola G. Modelling respirometric tests for the assessment of kinetic and stoichiometric parameters on MBBR biofilm for municipal wastewater treatment[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, **25**(5): 626-632.

[7] 荆洁颖. 移动床生物膜反应器对焦化废水脱碳除氮研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.

[8] Majone M, Aulenta F, Dionisi D, *et al*. High-rate anaerobic treatment of Fischer-Tropsch wastewater in a packed-bed biofilm reactor[J]. Water Research, 2010, **44**(9): 2745-2752.

[9] 郑敏, 杨波, 汪诚文, 等. 中试MBBR装置强化氨氮去除速率的影响条件研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(10): 1778-1783.
Zheng M, Yang B, Wang C W, *et al*. Enhanced ammonia removal rate in a pilot-scale MBBR[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(10): 1778-1783.

[10] 郑兰香, 鞠兴华. 温度和C/N比对生物膜反硝化速率的影响[J]. 西南给排水, 2005, **27**(2): 31-33.
Zheng L X, Ju X H. The effect of temperature and C/N radio on biofilm denitirification rate[J]. Southwest Water and Wastewater, 2005, **27**(2): 31-33.

[11] Mases M, Dimitrova I, Nyberg U, *et al*. Experiences from MBBR post-denitrification process in long-term operation at two WWTPs[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2010, **2010**(7): 458-471.

[12] 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. 210-276.

[13] Douterelo I, Boxall J B, Deines P, *et al*. Methodological approaches for studying the microbial ecology of drinking water distribution systems[J]. Water Research, 2014, **65**: 134-156.

[14] Liang Z W, Li W H, Yang S Y, *et al*. Extraction and structural characteristics of extracellular polymeric substances (EPS), pellets in autotrophic nitrifying biofilm and activated sludge[J]. Chemosphere, 2010, **81**(5): 626-632.

[15] Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **154**(1-3): 1120-1126.

[16] 刘美, 王湛. 胞外聚合物对膜污染的影响[J]. 水处理技术, 2007, **33**(10): 7-13.
Liu M, Wang Z. EPS extraction, chemical analyses and its effect on membrane fouling[J]. Technology of Water Treatment, 2007, **33**(10): 7-13.

[17] 王兴春, 杨致荣, 王敏, 等. 高通量测序技术及其应用[J]. 中国生物工程杂志, 2012, **32**(1): 109-114.
Wang X C, Yang Z R, Wang M, *et al*. High-throughput sequencing technology and its application[J]. China Biotechnology, 2012, **32**(1): 109-114.

[18] 周娜. 环境交替下污泥膨胀机理与控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
Zhou N. Study on mechanisms and control strategies of sludge

bulking in alternating anaerobic-aerobic-anoxic environment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.

[19] Costerton J W, Irvin R T, Cheng K J. The bacterial glycocalyx in nature and disease[J]. Annual Review of Microbiology, 1981, **35**(1): 299-324.

[20] Wang X H, Zhang H M, Yang F L, *et al*. Long-term storage and subsequent reactivation of aerobic granules[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(17): 8304-8309.

[21] McSwain B S, Irvine R L, Hausner M, *et al*. Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(2): 1051-1057.

[22] Miksch K, Kończak B. Distribution of extracellular polymeric substances and their role in aerobic granule formation[J]. Chemical and Process Engineering, 2012, **33**(4): 679-688.

[23] Zhu L, Zhou J, Lv M, *et al*. Specific component comparison of extracellular polymeric substances (EPS) in flocs and granular sludge using EEM and SDS-PAGE[J]. Chemosphere, 2014, **121**(5): 26-32.

[24] 常青. 活性污泥中胞外聚合物的组成及功能分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
Chang Q. Composition and function of extracellular polymeric substances in the activated sludge[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.

[25] 包常华. 污水生物处理过程中胞外聚合物的生成与控制[D]. 济南: 山东建筑大学, 2007.
Bao C H. Production and controlling of extracellular polymeric substances in wastewater treatment process[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2007.

[26] 曹秀芹, 赵自玲. 胞外聚合物(EPS)构成的影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(S2): 420-424, 471.
Cao X Q, Zhao Z L. Analysis of influencing factor on the component of extracellular polymeric substance (EPS)[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **33**(S2): 420-424, 471.

[27] 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.

[28] 金春姬, 佘宗莲, 高京淑, 等. 低 C/N 比污水生物脱氮所需外加碳源量的确定[J]. 环境科学研究, 2003, **16**(5): 37-40.
Jin C J, She Z L, Ko K S, *et al*. Determination of demand of external carbon source for biological nitrogen removal of wastewater with low C/N ratio[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, **16**(5): 37-40.

[29] 田建强. 反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响因素[J]. 有色冶金设计与研究, 2008, **29**(3): 42-44.
Tian J Q. Influencing factors of nitrite accumulation during denitrification[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2008, **29**(3): 42-44.

[30] 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.

[31] Oh J, Silverstein J A. Acetate limitation and nitrite accumulation during denitrification[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, **125**(3): 234-243.

[32] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹, 等. 不同碳源及投量对 SBR 法反硝化速率的影响[J]. 给水排水, 2001, **27**(5): 55-58.
Gao J F, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. Effects of carbon sources and dosages on the denitrification rate in SBR process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, **27**(5): 55-58.

[33] Kapley A, Prasad S, Purohit H J. Changes in microbial diversity in fed-batch reactor operation with wastewater containing nitroaromatic residues[J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(13): 2479-2484.

[34] 王硕. 低温好氧颗粒污泥形成过程及其特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Wang S. The study of aerobic garnular sludge on formation process and characteristics at low temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[35] Tan Z, Reinhold-Hurek B. Dechlorosoma suillum Achenbach *et al*. 2001 is a later subjective synonym of Azospira oryzae Reinhold-Hurek and Hurek 2000[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2003, **53**(Pt 4): 1139-1142.

[36] 洪武林, 谢学辉, 于文娟, 等. 假单胞菌 P1-1 脱氮除磷特性及其动力学研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(10): 29-33.
Hong W L, Xie X H, Yu W J, *et al*. Nitrogen and phosphorus removal characteristics and kinetics of *pseudomonas* sp. strain p1-1[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(10): 29-33.

[37] 魏清娟. 低温脱氮菌剂的制备及其强化人工湿地脱氮效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Wei Q J. Preparation of low temperature nitrogen removal agent and its bioaugmentation efficiency in the constructed wetland[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 6

Jun. 15, 2017

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of $PM_{2.5}$ Concentration: A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, *et al.* (2191)

Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years ····· GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, *et al.* (2202)

Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer ····· HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, *et al.* (2211)

Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing ····· DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, *et al.* (2218)

Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing ····· XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, *et al.* (2231)

Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers ····· WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, *et al.* (2238)

Effect of VOCs on O_3 and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station ····· ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, *et al.* (2246)

Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O_3 in Northern Suburb of Nanjing ····· WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, *et al.* (2256)

Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China ····· WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, *et al.* (2264)

Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential ····· WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, *et al.* (2273)

Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator ····· DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, *et al.* (2280)

Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing ····· ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, *et al.* (2287)

Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems ····· WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, *et al.* (2294)

Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel ····· LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, *et al.* (2301)

Spatial Variation and Environmental Significance of $\delta^{18}O$ and δD Isotope Composition in Xijiang River ····· XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, *et al.* (2308)

Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed ····· HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, *et al.* (2317)

Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir ····· JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, *et al.* (2326)

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake ····· WANG Yi-ru, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, *et al.* (2336)

Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River ····· LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, *et al.* (2345)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake ····· ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, *et al.* (2355)

Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination ····· QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, *et al.* (2364)

Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters ····· WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, *et al.* (2373)

Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level ····· JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)

Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron ····· ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, *et al.* (2385)

Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H_2O_2/KI System by Ultrasound and UVA Irradiation ····· WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, *et al.* (2393)

Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels ····· JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2400)

Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis ····· ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, *et al.* (2412)

Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater ····· ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, *et al.* (2419)

Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition ····· ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)

Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria ····· FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (2435)

Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater ····· ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, *et al.* (2444)

Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge ····· ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, *et al.* (2453)

Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress ····· QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-rui, *et al.* (2461)

Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors ····· REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)

Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge ····· ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, *et al.* (2477)

Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers ····· TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, *et al.* (2486)

Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of *Thiobacillus thioparus* and Its Mechanism ····· LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)

Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains ····· QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, *et al.* (2502)

Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics ····· CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)

Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method: A Case of PAHs ····· TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)

Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil ····· ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, *et al.* (2530)

Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice ····· CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, *et al.* (2538)

Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice ····· CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, *et al.* (2546)

Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As ····· TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, *et al.* (2553)

Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene ····· WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, *et al.* (2561)

Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil ····· YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)

Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions ····· LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cao, *et al.* (2577)

Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N_2O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain ····· HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, *et al.* (2586)

Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling ····· YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, *et al.* (2594)

Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi ····· WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, *et al.* (2600)

Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions ····· GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, *et al.* (2607)

Volatile Organic Compounds(VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions: A Review ····· WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)