

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)

卫星遥感在 NO_x 总量控制中的应用 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)

京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估 王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)

南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析 吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)

冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征 施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)

成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)

泉州市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)

2011~2012 年北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)

厦门海沧区 PM_{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析 赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲珍, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)

道路扬尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评价 张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)

福建九仙山大气 PM₁₀ 及部分化学组成的季节变化 魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)

北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征 李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)

2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析 石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)

廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)

人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响 赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)

岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源: 以桂林五里峡水库为例 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)

岩溶关键带微量元素运移的时空变化: 以豫西鸡冠洞为例 梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)

龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征 苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)

阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系 罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)

天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)

程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险 于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)

自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征 左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)

邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)

滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)

潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估 董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)

道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露 李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)

居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价 佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)

基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变 刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)

Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能 张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)

凤眼莲对富营养化水体中氨氧化和反硝化微生物的影响 李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)

利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水 熊晓敏, 吴夏芈, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)

生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态 宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)

细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响 涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)

污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除 刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)

AnMBR-A-MBR 和 A²-MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比 朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)

基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)

新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷 周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王丽莎 (4309)

连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升 朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)

基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征 阎刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)

两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响 王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)

醋糟高效厌氧消化体系构建 周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)

基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比: 以龙岩市适中镇为例 王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)

锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价 陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)

三峡库区典型消落带 CH₄ 排放的变化特征及影响因素 柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)

地膜覆盖对菜地生态系统 N₂O 排放的影响 冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)

不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响 向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)

半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉 陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)

猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化 温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)

堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用 吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)

微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响 安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)

冬小麦田 O₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估 徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)

中国西南酸雨区降水化学特征研究进展 周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)

《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)

新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷

周彦卿, 郝瑞霞*, 刘思远, 王丽沙

(北京工业大学建筑工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为强化再生水深度脱氮除磷的能力, 利用硫磺粉、海绵铁粉等制备出一种新型复合填料, 并在不同 HRT 和 C/N 条件下将其与同种物质组成的颗粒混合填料进行对比实验. 最后通过高通量测序技术对两填料表面的微生物种群结构进行了研究. 结果表明, 在不同条件下新型填料的脱氮除磷能力均优于颗粒混合填料; 当 HRT = 4 h、C/N = 1 时, 新型填料的总氮、总磷去除率均分别比颗粒填料高出 30% 以上. 根据高通量测序结果, 两反应器内的反硝化体系均由硫自养反硝化种群和异养反硝化种群构成, 且新型填料系统内的硫自养反硝化菌群所占比例更大, 两反应器内的优势种属分别为 *Sulfurimonas* 和 *Acinetobacter*.

关键词: 新型复合填料; 硫磺; 海绵铁; 复合反硝化; 化学除磷; 克隆文库

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4309-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201703241

Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler

ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia*, LIU Si-yuan, WANG Li-sha

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to improve the ability of denitrification and phosphorus removal from reclaimed water, a novel composite filler was prepared using sulfur powder and sponge iron powder, and a comparative experiment was constructed at different HRT (hydraulic retention time) and C/N (carbon-nitrogen ratio) conditions between the novel filler and the composite filler. The results showed that the efficiency of nitrogen and phosphorus removal on the novel filler was higher than that on the grain filler (more than 30% higher at HRT = 4 h and C/N = 1). Moreover, based on the 16S rRNA gene clone library, the denitrification system in the two reactors included sulfur autotrophic denitrification bacteria and heterotrophic denitrification bacteria, while the proportion of sulfur autotrophic denitrification bacteria in the novel filler system was higher. The dominant bacteria in the novel filler and composite filler were *Sulfurimonas* and *Acinetobacter*, respectively.

Key words: novel composite filler; sulfur; sponge iron; composite denitrification; chemical phosphorus removal; gene clone library

为保障水生态系统的安全, 将二级出水作为再生水回用时, 需对其进行脱氮除磷的深度处理^[1]. 由于二级出水具有低碳氮比的特点, 单纯依靠异养微生物进行脱氮往往难以达到理想效果^[2,3]. 另外, 在除磷方面, 传统的生物除磷工艺也不如化学除磷方法更为稳定有效^[4]. 因此, 在当前的再生水深度处理领域, 硫自养反硝化因其无需外加碳源等优点而被广泛地用于脱氮^[5-7]; 在深度除磷过程中, 一些高效的除磷填料如海绵铁, 也被研究人员广为使用^[8-10].

目前已有一些研究将硫磺与单质铁混合用于脱氮除磷, 研究人员分别用不同的工艺方法、从不同角度探究了硫铁复合填料的脱氮除磷效果^[11-14]. 这些研究在机制上大都是利用硫自养反硝化进行脱氮, 利用单质铁在失电子的氧化过程中释放的铁离子与磷酸盐结合形成沉淀进行除磷. 而有研究表明^[15,16], 硫自养反硝化为半级动力学模型, 其反应

速率与硫磺粒径的大小及表面积有关, 即粒径越小反应速率越大. 同时, 粒径越小也越有利于硫与铁的均匀混合, 提高填料的利用效率. 因此, 如果采用更小粒径的硫铁填料必将使得反应器的脱氮除磷能力得到大大提升.

综上, 本研究基于二级出水的水质特点, 以硫磺、海绵铁混合颗粒填料为基础进行改进, 采用硫磺粉、海绵铁粉作为有效成分制备出一种新型硫铁复合填料, 并将该种新型填料与颗粒混合填料进行对比运行, 探究其反硝化脱氮同步除磷性能; 同时结合高通量测序技术构建 16S rRNA 克隆文库, 对填料表面微生物种群结构进行深入分析, 以期在低碳氮比条件下污水处理厂二级出水的深度脱氮除磷

收稿日期: 2017-03-28; 修订日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378028)

作者简介: 周彦卿(1992~), 男, 硕士研究生, 主要方向为再生水深度脱氮技术, E-mail: 179138708@qq.com

* 通信作者, E-mail: haorui-xia@bjut.edu.cn

提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 填料的制备

以硫磺粉、海绵铁粉作为脱氮除磷的有效成分,辅以发泡剂和黏结剂等成分,采用二次黏附包裹的方法进行制备以延长填料的使用寿命.具体制备过程如下.

(1)取体积比为 6:1 硫磺粉、海绵铁粉与一定量的水泥混合均匀,加入一定量的水搅拌均匀,然后加入一定比例的发泡剂搅拌发泡,制备成粒径为 5~8 mm 颗粒待用;

(2)将硫粉,海绵铁粉按体积比 3:1 混合均匀平铺在托盘里,取上一步骤中制备出的颗粒放入托盘振荡,使其自然黏附混合粉末,停止黏附后取出,室温下静置 2 d,待其充分凝结硬化后使用,最终制备出粒径约为 6~10 mm 的复合填料.

1.2 实验装置

本实验采用 2 组结构完全相同的生物反硝化滤柱对比运行,反应器内径 80 cm,高度 110 cm,承托层厚度为 10 cm.两反应器内分别填装等质量的新型复合填料及体积比为 3:1 的硫磺颗粒、海绵铁颗粒的混合填料(粒径约 3~8 mm),有效容积分别为 3.2 L 和 2.7 L.实验装置见图 1.

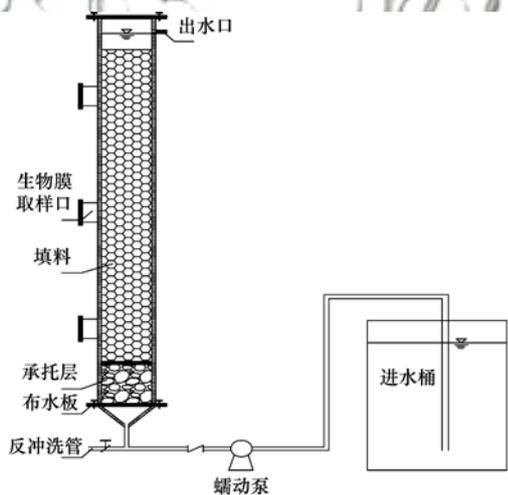


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental installation

1.3 实验水质与分析仪器

实验用水采用人工配水模拟污水厂尾水,即在自来水中加入一定量的 CH_3COONa 、 KNO_3 和 KH_2PO_4 ,进水水质特征为: $\text{pH} = 7.0 \sim 7.5$, $\rho(\text{TN}) = \rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) = 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} = 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在不同碳氮比条件下,分别保持进水 $\text{COD} : \text{TN} = 1.5$ 、

1.0 和 0.

分析仪器见表 1.

表 1 实验所有分析仪器

Table 1 Experiment analysis instruments	
项目	仪器
pH	PHS-3C 型 pH 计(上海三信)
$\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, SO_4^{2-}	Metrohm861 离子色谱仪(瑞士万通)
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TP, TFe	722 可见分光光度计(上海欣茂)
COD	COD 快速测定仪(北京连华科技)

1.4 实验设计

两组反应装置均按照接种、挂膜和驯化的顺序启动,接种污泥来自北京某污水处理厂污泥浓度约为 $5.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的回流污泥.具体启动方法参考文献 [17],待出水中各项污染指标达到稳定后,反应装置启动成功.

两反应器启动成功后在不同 HRT 和不同 C/N 条件下对比运行,确定新型复合填料的最佳运行特性.每天监测进出水的 pH、COD、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 SO_4^{2-} 、TP、TFe 指标,并保证各实验梯度稳定运行时间至少为 15 d,且每次改变条件都保证稳定 5 d 后再开始监测指标数据.

在 $\text{HRT} = 4 \text{ h}$, $\text{C}/\text{N} = 1$ 的条件下,稳定运行一个月后,分别于两反应器内中部填料上提取生物膜,采用高通量测序技术构建两种填料表面微生物种群的 16S rRNA 基因克隆文库,对两系统中的微生物菌群结构进行分析.

2 结果与讨论

2.1 HRT 的影响

HRT 作为一项表征工艺运行效率的重要指标,其大小也决定着工艺的运行成本的大小.因此,在保证较为理想处理效果的前提下,当碳氮比一定时,缩短 HRT 对于降低经济成本有着至关重要的意义.

2.1.1 HRT 对脱氮效果的影响

在 $\text{C}/\text{N} = 1.5$ 的条件下,探究 HRT 为 8、4 和 2 h 对两反应器内反硝化脱氮效果的影响,如图 2 (a)所示.

由图 2(a)可见,随着 HRT 的缩短,颗粒填料的脱氮能力出现了明显下降,而新型填料变化趋势则相对稳定.当 HRT 从 8 h 逐渐缩短至 2 h 时,颗粒填料的总氮去除率从 64.5% 降至 30% 左右,而新型填料的总氮去除率在 HRT 为 2 h 时仍然可达 85% 以上,且整个变化过程中它的总氮去除能力始

终明显优于颗粒填料. 此外还可以看到, 当 HRT 从 8 h 调至 4 h 时, 新型填料总氮去除率不仅没有降低反而出现上升的趋势, 这是由于该系统在 8 h 停留时间时氨氮积累较高所致, 如图 2(b) 所示: 两系统内均出现了亚氮和氨氮的积累, 且前者随 HRT 的减小而增大, 后者随 HRT 的缩短而减小. HRT 为 8 h 时新型填料系统内的氨氮积累较大, 达到了 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 而当 HRT 为 4 h 时, 系统内的氨氮迅速降至 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 最终造成 4 h 停留时间下系统总氮去除率相对更高. 出现氨氮积累的原因

推测与海绵铁的还原作用有关^[7], 由于新型填料内部的海绵铁粒径较小, 反应速率较高, 因此出现了较长停留时间下高浓度的氨氮积累.

硫酸盐积累量的大小可以直观地反映出硫自养反硝化作用的强弱. 从图 2(a) 可以看出, 两反应器内的硫酸盐积累量均随 HRT 的减小而呈现出下降的趋势, 但新型填料的硫酸盐积累量却明显高于颗粒填料. 这表明, 新型填料系统内的硫自养反硝化作用较强, 因此使得新型填料的脱氮能力明显地强于颗粒混合填料.

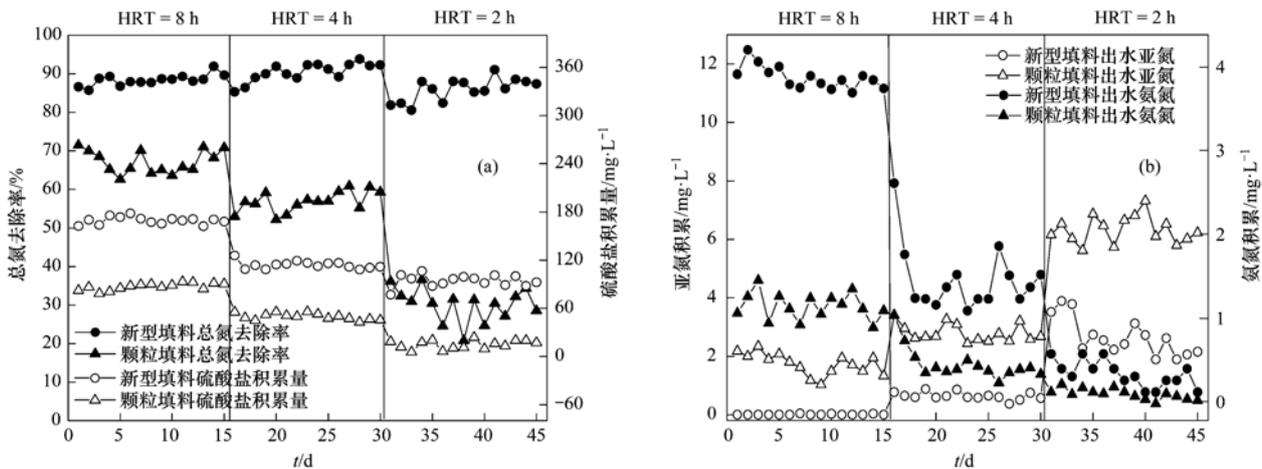


图 2 不同 HRT 条件下两反应器 TN 去除率变化和硫酸盐积累量及亚氮、氨氮浓度变化情况

Fig. 2 TN removal rate, SO_4^{2-} accumulation, and NO_2^- -N and NH_4^+ -N concentrations in two reactors at different HRT

袁莹等^[18]在考察不同硫源种类电子供体对硫自养反硝化脱氮效能的影响时发现, 采用单质硫作为电子供体时, 系统的脱氮效率受传质效率的影响较大. 另外, 有研究表明^[16,19], 硫磺粒径是影响硫自养反硝化速率的重要因素之一, 其粒径越小, 反硝化速率越大. 新型填料在制备过程中采用硫磺粉末, 与硫磺颗粒相比粒径大为减小, 使得系统内硫自养反硝化的速率得以有效提高, 从而显著地强化了新型填料的脱氮能力.

2.1.2 HRT 对除磷效果的影响

两反应器内总磷去除率随 HRT 变化情况见图 3.

由图 3 可见, 两种填料的除磷能力均随 HRT 的缩短而下降, 但新型填料的除磷能力始终优于颗粒混合填料. 在 HRT 从 8 h 减少到 2 h 的过程中, 新型填料的总磷去除率逐渐从 91% 降到了 69.4%, 分别比颗粒混合填料高出 17.6%、32.7% 和 26.3%. 可见, 与颗粒填料相比, 新型填料的除磷能力对 HRT 的缩短具有更好的适应能力.

根据相关研究^[13], 硫铁填料的除磷能力主要

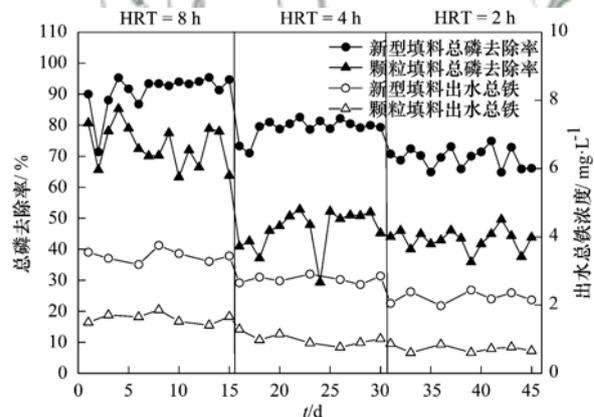


图 3 不同 HRT 条件下两反应器 TP 去除率及出水总铁变化情况

Fig. 3 TP removal efficiency and TFe concentration of the two reactors at different HRT

与海绵铁的腐蚀作用有关: 硫自养反硝化产酸促进海绵铁的腐蚀, 生成的 Fe^{2+} 为化学除磷提供反应物质, 从而使系统中的磷得以去除. 另外, 范军辉等^[14]的研究发现, 除上述过程外, 硫和铁通过化学反应生成的 FeS 可以先将磷酸盐吸附到表面, 再转化为 FePO_4 沉淀, 从而强化除磷效果. 因此, 出水总铁是表征除磷效果的一个关键因素.

根据图 3 中两反应器内的出水总铁变化情况, 新型填料的出水总铁明显高于颗粒复合填料. 分析其原因, 新型填料制备过程中使用的有效组分的物理状态均为粉末态, 这样既增大了硫磺和海绵铁的比表面积, 也使得两者之间混合更加均匀充分, 从而使海绵铁更易于被硫自养反硝化产生的 H^+ 腐蚀. 同时, 从图 2(a) 中可以看到, 新型填料系统内的硫自养反硝化作用强于颗粒填料系统, 这与图 3 中的出水总铁变化情况相一致. 综上, 采用该方法制备出的新型填料可使系统内的海绵铁腐蚀过程得以促进, 从而强化了填料的除磷能力.

2.2 C/N 的影响

C/N 是考察填料反硝化脱氮除磷效果的又一重要参数. 根据 2.1 节的相关结论, 随着 HRT 的缩减, 两种填料的脱氮除磷能力均有不同程度地减小. 为了探究填料脱氮除磷性能对低碳氮比条件下的适应性, 在 HRT = 4 h 的条件下, 对比探究了 C/N 分别为 1.5、1.0 和 0 时两种填料的脱氮除磷能力的变化情况.

2.2.1 C/N 对脱氮效果的影响

图 4 所示为 C/N 对两种填料脱氮效果的影响.

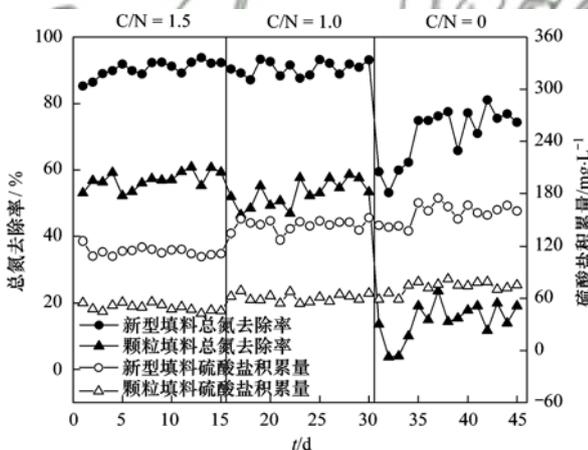


图 4 不同 C/N 条件下两反应器 TN 去除率变化及硫酸盐积累量变化情况

Fig. 4 TN removal efficiency and SO_4^{2-} accumulation of the two reactors at different C/N

由图 4 可知, 碳氮比的减小对颗粒混合填料系统的脱氮能力影响较大. 随着 C/N 的减小, 新型复合填料的总氮去除率逐渐从 90.5% 降低到 70.7%, 而颗粒填料系统的总氮去除率却从 59% 降到了 16.2%. 由此可见, 新型填料对不同碳氮比含氮废水的脱氮处理效果明显优于颗粒混合填料, 在低碳氮比时这种优势更加明显. 此外, 当 C/N 从 1.5 减小到 1.0 时, 新型填料总氮去除率未发生明显下

降, 其原因与亚氮积累、氨氮积累变化有关, 类似于 2.1.1 节分析, 在此不再赘述.

如图 4 所示, 伴随着碳氮比的减小, 两反应器内的硫酸盐积累量均呈现出增长的趋势, 且新型填料的硫酸盐积累量和增长趋势均始终高于颗粒填料系统. 这表明, 在低碳氮比的条件下, 新型填料系统内的硫自养反硝化效率仍然高于颗粒填料系统, 这进一步验证了 Koenig 等^[19]的结论. 此外, 当 C/N 从 1 减小到 0 时, 两反应器内的脱氮效率均出现了明显的下降, 但新型填料的脱氮效果仍始终优于颗粒混合填料. 这可能是由于系统中缺少有机碳源对生物膜产生了负面影响, 同时也表明反硝化过程中异养反硝化的作用不容忽视, 且混养型反硝化(异养反硝化和自养反硝化同时存在)的脱氮效率要高于单一自养反硝化, 这也与相关研究^[20]相一致.

2.2.2 C/N 对除磷效果的影响

在 HRT = 4 h 的条件下, 不同碳氮比对填料总磷去除效果的影响及两反应器内的出水总铁变化见图 5.

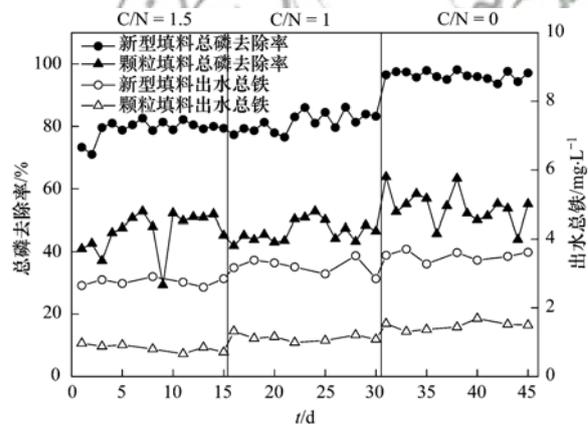


图 5 不同 C/N 条件下两反应器 TP 去除率及出水总铁变化情况

Fig. 5 TP removal efficiency and TFe concentration of the two reactors at different C/N

由图 5 可知, 在不同碳氮比条件下, 新型填料的除磷能力明显高于颗粒填料, 且两种填料的总磷去除率均伴随 C/N 的减小而增大. 其中, 当 C/N 从 1 降为 0 时, 新型填料的总磷去除率从 81.3% 增加到 96.3%, 而颗粒填料的总磷去除率从 46.4% 增长到了 54.1%. 与此同时, 两反应器内的出水总铁浓度分别从 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到了 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

根据 2.1.2 节的分析, 在两系统中, 硫自养反硝化作用和海绵铁除磷作用之间存在一定的协同作

用: 硫自养反硝化产酸的过程可以加速海绵铁腐蚀, 同时海绵铁对氢离子的消耗也保证了硫自养反硝化有利的反应条件. 由图 4 可见, 进水 C/N 减小, 两反应器内出水硫酸盐积累量均随之增多, 表明两系统硫自养反硝化作用得以增强. 此时海绵铁的腐蚀作用也必然随之增大, 致使出水总铁浓度增加, 填料的除磷能力得以提升. 此外, 两种填料的除磷效果对比也进一步表明新型填料可以在低碳氮比的条件下强化再生水的除磷效果.

2.3 反硝化微生物菌群分析

在 HRT = 4 h, C/N = 1 的条件下, 针对两反应器中部的生物膜样品构建了 16S rRNA 基因克隆文库, 对存在于两种填料表面的微生物菌群进行了多样性分析和分类学分析. 在 97% 的相似度水平下对两样本中的非重复序列进行操作样品单元 (OTU) 聚类, 最终新型填料和颗粒混合填料分别获得了 142 个和 473 个 OTU. 两样本的文库覆盖率 (C) 分别为 99.96% 和 99.99%, 表明两样本的克隆文库结果具有较高的置信度.

2.3.1 菌群物种多样性

群落生态学中研究微生物多样性, 一般通过单样品的多样性分析如 α 多样性反映微生物群落的物种丰度和多样性. α 多样性被称为生境内的多样性, 主要关注的是局域均匀生境下的物种数目, 通常用 Simpson 多样性指数和 Shannon 多样性指数表征. 其中, Simpson 指数反映样本中的物种种类分布均匀程度, 该数值一般在 0 ~ 1 之间, 值越大物种

种类分布越均匀^[21]; Shannon 指数反映样本中的物种量大小, 数值一般在 1.5 ~ 3.5 之间, 很少超过 4, 样本物种量越大对应的该指数值也越大^[22,23]. 本研究中新型复合填料和颗粒混合填料的 Simpson 指数值分别为 0.199 和 0.118, Shannon 指数分别为 2.69 和 3.77. 这表明, 新型复合填料表面的微生物物种种类分布相对较为均匀, 而颗粒混合填料表面的微生物物种量相对较大.

2.3.2 菌群结构组成分析

为研究两种填料表面的微生物种类及其相对丰度 (样本中各微生物的序列数), 对两样本进行分类学分析. 将各样本中代表序列与 Silva 数据库中的序列进行同源性比对, 作出属级分类水平菌群结构丰度图, 如图 6 所示. 然后将主要功能菌属及其所占比例列于表 2 中.

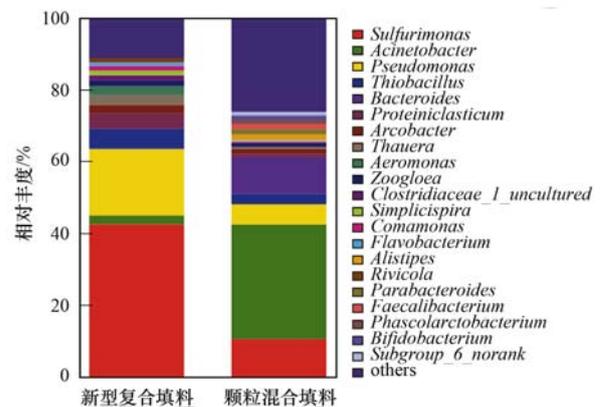


图 6 样本在属级水平的菌落丰度

Fig. 6 Relative abundance of species at the genera level of samples

表 2 样本中主要功能菌属及其所占比例

Table 2 Function and proportion of species at the genera level in samples

菌属名称	功能	菌属所占比例/%	
		新型复合填料	颗粒混合填料
<i>Sulfurimonas</i> (硫单胞菌属)	硫自养反硝化	42.66	10.66
<i>Thiobacillus</i> (硫杆菌属)	硫自养反硝化	5.59	2.92
<i>Pseudomonas</i> (假单胞菌属)	反硝化聚磷	18.57	5.65
<i>Thauera</i> (陶厄氏菌属)	异养反硝化	2.79	0.43
<i>Aeromonas</i> (气单胞菌属)	除磷功能	2.49	0.06
<i>Acinetobacter</i> (不动杆菌属)	除磷功能	2.40	31.91
<i>Zoogloea</i> (动胶菌属)	异养反硝化	1.58	0.98
<i>Comamonas</i> (毛单胞菌属)	异养反硝化	1.23	0.24
<i>Flavobacterium</i> (黄杆菌属)	异养反硝化	1.01	0.29
<i>Bacteroides</i> (拟杆菌属)	异养反硝化	0.03	10.29

由图 6 可见, 新型复合填料样本中相对丰度最大的菌属是 *Sulfurimonas*, 大约占 42.66%, 而它在颗粒混合填料中约占 10.66%. 该菌种是一种兼性厌氧的化能自养菌, 可将硫、硫化物或氢为电子供体, 以 CO_2 为碳源进行反硝化作用^[12,24]. 除

Sulfurimonas 外, 在两样本中与硫自养反硝化作用有关的菌属还有 *Thiobacillus*, 其所占比例分别为 5.59% 和 2.92%. 该菌属是一种专性自养兼性厌氧的革兰氏阴性菌, 可在厌氧条件下以硫或硫化物为电子供体进行反硝化作用^[22,25]. 此外, 由表 2 可

知,两反应器内反硝化种群由硫自养反硝化,异养反硝化及部分反硝化聚磷微生物组成.其中,硫自养反硝化菌群在两反硝化体系内均占有优势比例,它们在新型填料反硝化系统内所占的比例相对更大.这进一步表明,本研究制备出的新型复合填料可以使反硝化体系内的硫自养反硝化作用得以强化,从而提高系统的脱氮能力.

另外,由表2可见,两系统中与除磷作用有关的微生物有 *Pseudomonas*、*Aeromonas* 和 *Acinetobacter*.从两系统内具有除磷功能微生物的总量对比可以看出,颗粒混合填料反应器内的生物除磷作用大于新型复合填料,表明该系统内的生物除磷作用相对更多一些.同时根据2.2.2节的分析,新型填料系统内的化学除磷作用相对更强,这会使得系统内的总磷浓度得以迅速降低,因此推测新型填料表面不动杆菌属 *Acinetobacter* 的含量较小可能与之有关.此外,两系统内还存在着不同比例的可能具有反硝化聚磷功能的假单胞菌属,特别是新型填料,这也在一定程度上提高了系统的脱氮除磷能力.

3 结论

(1)本研究制备出的新型复合填料可以强化硝氮、总磷的去除效果.当 $HRT = 4\text{ h}$, $C/N = 1$ 时,该种新型填料的氮、磷去除率可达90%及81%以上,分别比颗粒填料高出38%和35%左右.

(2)新型填料对条件的变化具有更好的适应能力.在不同 HRT 及 C/N 条件下,其脱氮除磷的能力均强于颗粒混合填料,这与其内部硫自养反硝化和海绵铁腐蚀除磷二者之间较强的协同作用有关.

(3)两反应器内的反硝化功能微生物中均存在着硫自养反硝化种群和异养反硝化种群,且具有硫自养反硝化功能的菌群在新型填料系统内占有更大的比例,是该系统内的优势种属.

参考文献:

- [1] 胡洪营,吴乾元,黄晶晶,等.国家“水专项”研究课题——城市污水再生利用面临的重要科学问题与技术需求[J].建设科技,2010,(3):33-35.
Hu H Y, Wu Q Y, Huang J J, et al. Scientific issues and technological requirements of municipal sewage recycling[J]. Construction Science and Technology, 2010, (3): 33-35.
- [2] Lv X M, Shao M F, Li J, et al. Nitrate removal with lateral flow sulphur autotrophic denitrification reactor[J]. Environmental Technology, 2014, 35(21): 2692-2697.
- [3] 李彭,唐蕾,左剑恶,等.以PHAs为固体碳源的城镇二级出水深度脱氮研究[J].中国环境科学,2014,34(2):331-336.
- Li P, Tang L, Zuo J E, et al. Tertiary nitrogen removal of the municipal secondary effluent using PHAs as solid carbon sources[J]. China Environmental Science, 2014, 34(2): 331-336.
- [4] 李子富,云玉攀,曾灏,等.城市污水处理厂化学强化生物除磷的试验研究[J].中国环境科学,2014,34(12):3070-3077.
Li Z F, Yun Y P, Zeng H, et al. Experimental study on chemically enhanced biological phosphorus removal for municipal wastewater treatment plant[J]. China Environmental Science, 2014, 34(12): 3070-3077.
- [5] 孟成成,郝瑞霞,王建超,等.3BER-S耦合脱氮系统运行特性研究[J].中国环境科学,2014,34(11):2817-2823.
Meng C C, Hao R X, Wang J C, et al. Study on the performance for a coupled denitrifying system of 3BER-S[J]. China Environmental Science, 2014, 34(11): 2817-2823.
- [6] 郝瑞霞,王建超,孟成成,等.电流对三维电极生物膜耦合硫自养脱氮工艺的影响[J].北京工业大学学报,2015,41(6):919-925.
Hao R X, Wang J C, Meng C C, et al. Influence of electric current on coupling 3-dimensional biofilm-electrode with sulfur autotrophic denitrification[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(6): 919-925.
- [7] 王建超,郝瑞霞,周彦卿.电流对MEC-3DBER-S脱氮除磷效果的影响及机理分析[J].中国环境科学,2016,36(8):2388-2394.
Wang J C, Hao R X, Zhou Y Q. Influence of electric current for enhancing nitrogen and phosphorus removal efficiency and mechanism analysis on micro electrocoagulation combined 3-dimensional-biofilm-electrode with sulfur autotrophic denitrification technology[J]. China Environmental Science, 2016, 36(8): 2388-2394.
- [8] Rout P R, Bhumia P, Dash R R. Effective utilization of a sponge iron industry by-product for phosphate removal from aqueous solution: A statistical and kinetic modelling approach[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 46: 98-108.
- [9] Jiang C, Jia L Y, He Y L, et al. Adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution using sponge iron and zeolite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 402: 246-252.
- [10] 李杰,张艳梅,王亚娥.零价铁载体填料主料结合方式对生物强化效果的影响研究[J].水处理技术,2015,41(3):41-44.
Li J, Zhang Y M, Wang Y E. Effect of zero-valent iron filler combination mode on biochemical strengthening treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(3): 41-44.
- [11] 苏晓磊,刘雪洁,梁鹏,等.硫-硫铁复合床深度脱氮除磷[J].化学工业与工程,2015,32(4):63-67.
Su X L, Liu X J, Liang P, et al. Sulfur and sulfur-iron particles packed reactors for simultaneous advanced removal of nitrogen and phosphorus[J]. Chemical Industry and Engineering, 2015, 32(4): 63-67.
- [12] 徐忠强,郝瑞霞,徐鹏程,等.硫铁填料和微电流强化再生水脱氮除磷的研究[J].中国环境科学,2016,36(2):406-413.
Xu Z Q, Hao R X, Xu P C, et al. Research on enhanced denitrification and phosphorus removal from reclaimed water by

- using sponge iron/sulfur composite fillers and low electrical current[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 406-413.
- [13] 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 等. 硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2229-2234.
Zhou Y Q, Hao R X, Wang Z, *et al.* Effects of sulfur/sponge iron ratio for deep denitrification and phosphorus removal of reclaimed water[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2229-2234.
- [14] 范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 等. 基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4275-4281.
Fan J H, Hao R X, Li M, *et al.* Phosphorus removal mechanism of sulfur/sponge iron composite fillers based on denitrification[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4275-4281.
- [15] 张彦浩, 杨宁, 谢康, 等. 自养反硝化技术研究进展[J]. *化工环保*, 2010, **30**(3): 225-229.
Zhang Y H, Yang N, Xie K, *et al.* Research progresses in autotrophic denitrification technologies [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2010, **30**(3): 225-229.
- [16] Moon H S, Chang S W, Nam K, *et al.* Effect of reactive media composition and co-contaminants on sulfur-based autotrophic denitrification[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 802-807.
- [17] Hao R X, Li S M, Li J B, *et al.* Denitrification of simulated municipal wastewater treatment plant effluent using a three-dimensional biofilm-electrode reactor: Operating performance and bacterial community[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 178-186.
- [18] 袁莹, 周伟丽, 王晖, 等. 不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1835-1844.
Yuan Y, Zhou W L, Wang H, *et al.* Study on sulfur-based autotrophic denitrification with different electron donors [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1835-1844.
- [19] Koenig A, Liu L H. Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors[J]. *Water Research*, 2001, **35**(8): 1969-1978.
- [20] Zhao Y X, Zhang B G, Feng C P, *et al.* Behavior of autotrophic denitrification and heterotrophic denitrification in an intensified biofilm-electrode reactor for nitrate-contaminated drinking water treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **107**: 159-165.
- [21] Magurran A E. 生物多样性测度[M]. 张峰, 译. 北京: 科学出版社, 2011. 70-71.
- [22] Wang H Y, Zhou Y X, Yuan Q, *et al.* Bacteria morphology and diversity of the combined autotrophic nitrification and sulfur-carbon three-dimensional-electrode denitrification process[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2014, **49**(1): 39-51.
- [23] Vasiliadou I A, Pavlou S, Vayenas D V. Dynamics of a chemostat with three competitive hydrogen oxidizing denitrifying microbial populations and their efficiency for denitrification[J]. *Ecological Modelling*, 2009, **220**(8): 1169-1180.
- [24] 李军, 韩佳霖, 刘健, 等. 硫自养反硝化与厌氧氨氧化耦合工艺中微生物群落结构和多样性研究[J]. *环境工程*, 2015, **33**(S1): 55-59.
Li J, Han J L, Liu J, *et al.* Research on microbial community structure and diversity in the sulfur autotrophic denitrification and anaerobic ammonia oxidation coupled process[J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(S1): 55-59.
- [25] Okabe S, Odagiri M, Ito T, *et al.* Succession of sulfur-oxidizing bacteria in the microbial community on corroding concrete in sewer systems [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(3): 971-980.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)