

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

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

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)	

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析

刘国新¹, 吴海珍^{1*}, 孙胜利¹, 胡肖怡¹, 吴晓英¹, 陈华勇¹, 范一文¹, 胡成生², 韦朝海³

(1. 华南理工大学生物科学与工程学院, 广州 510006; 2. 广州市市政工程维修处, 广州 510000; 3. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

摘要: 焦化废水是毒性很大的典型工业废水, 生物处理过程中需要微生物具备很强的适应能力。以探讨焦化废水对微生物的毒性抑制以及微生物对焦化废水的适应过程为目的, 通过于焦化废水原水中接种市政污泥, 在考察 COD、苯酚、氨氮和硫氰化物等主要污染物指标降解的基础上, 运用 Illumina 高通量测序平台分析降解过程微生物群落组成及多样性变化的响应关系。结果表明, 接种了市政污泥的焦化废水培养 16 h 后 COD 开始下降, 40 h 时苯酚降解了 97.14%, 72 h 时硫氰化物开始降解, 96 h 时硫氰化物浓度低于检测限, 氨氮浓度随着硫氰化物的降解而升高。群落测序分析表明, 不同培养阶段污泥中微生物表现出群落结构及丰度上的差异: 在苯酚降解阶段, 苯酚优势降解菌 *Acinetobacter*、*Pseudomonas* 的丰度增大, 48 h 总相对丰度为 13.04%; 在硫氰化物降解阶段, *Sphingobacterium*、*Brevundimonas*、*Lysobacter*、*Chryseobacterium* 为主导菌属, 96 h 时其总相对丰度为 16.13%; 在 144 h 阶段, 优势菌属则变为 *Fluviicola*、*Stenotrophomonas* 和 *Thiobacillus*, 总相对丰度为 22.45%。由此认为, 市政污泥克服了焦化废水中毒性成分的抑制作用之后能迅速适应环境, 表现出微生物群落结构随着废水降解成分的变化而改变, 环境因子和降解功能菌之间的竞争是群落结构演变的主要因素。

关键词: 焦化废水; 市政污泥; 微生物群落演变; 好氧降解

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3807-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702146

Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge

LIU Guo-xin¹, WU Hai-zhen^{1*}, SUN Sheng-li¹, HU Xiao-yi¹, WU Xiao-ying¹, CHEN Hua-yong¹, FAN Yi-wen¹, HU Cheng-sheng², WEI Chao-hai³

(1. School of Bioscience and Bioengineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangzhou Municipal Engineering Maintenance Department, Guangzhou 510000, China; 3. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Coking wastewater is a typical industrial wastewater with high toxicity. Its treatment with biological processes is often challenging because it contains constituents inhibiting microbial activity. To study the inhibitory effect and possible acclimation of microbes in coking wastewater treatment, municipal sludge was inoculated into coking wastewater. Time-dependent concentrations of COD, phenol, ammonia nitrogen, and thiocyanide in coking wastewater were analyzed. The microbial community structure was investigated by the Illumina high-throughput sequencing technology during inoculation. The results showed that COD began to decrease after 16 h and 97.1% of phenol disappeared after 40 h. Thiocyanide began to degrade at 72 h and was undetectable after 96 h. Accordingly, the concentration of ammonia increased as the thiocyanide concentrations decreased. High-throughput pyrosequencing analysis showed that the microbial community structure and species richness varied at different culture stages. In the stage of phenol degradation, the abundance of *Acinetobacter* and *Pseudomonas* increased rapidly; the species richness was 13.04% of the community at 48 h. In the stage of thiocyanate degradation, *Sphingobacterium*, *Brevundimonas*, *Lysobacter*, and *Chryseobacterium* were the dominant bacteria and were 16.13% of the community at 96 h. At 144 h, *Fluviicola*, *Stenotrophomonas*, and *Thiobacillus* became the dominant species and were 22.45% of the community abundance. The results showed that municipal sludge can rapidly overcome the toxicity of coking wastewater because the pollutants are degraded rapidly. The microbial community structure changed as wastewater components were degraded. Environmental factors and the competition among bacteria played a key role in microbial community succession.

Key words: coking wastewater; municipal sludge; microbial community succession; aerobic degradation

收稿日期: 2017-02-23; 修订日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(21377040); 广东省省级科技计划项目(2015A020215008); 广东省应用型科技研发专项(2015B020235005)

作者简介: 刘国新(1991~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境生物工程, E-mail: 214233952@qq.com

* 通信作者, E-mail: hzhwu2@scut.edu.cn

生物法一直是工业有机废水处理重点研究的领域,是处理有机废水最常用、最经济的方法之一,随着微生物检测技术的不断发展,高通量测序技术的成熟与普及^[1,2],近几年,探究有机污染物的降解效率与微生物间的联系、微生物群落结构及功能和废水处理的相关性成为研究的热点.有研究表明^[3-9],微生物群落具有很高的敏感性以及对多变环境的适应性,群落结构在不同的废水处理系统以及在同一废水处理系统的不同运行时期、不同的运行工艺中都表现着差异,环境参数改变时,细菌群落的多样性也会随之变化.

焦化废水中含有有毒/难降解物,成分复杂,可生化性较差,被世界公认为目前最难治理的工业废水,如何提高焦化废水的可生化性,提高焦化废水处理系统微生物的稳定性和降解效率,一直是领域中的难点^[10,11].过去的十年间,焦化废水处理工艺大部分采用 A/O、A/H/O 或者 A/O² 等先经过厌氧过程再到好氧过程的处理方法^[12-14].相对于厌氧过程,好氧过程有机物的分解比较彻底,释放的能量多,有机物转化速率快,废水能在较短的停留时间内获得高的 COD 去除率.近几年,焦化废水处理也开始直接从好氧阶段开始,形成了新的好氧-水解-好氧的新工艺^[15].

在实际工程运行的启动阶段,生物系统的微生物需要通过其他废水处理工程提供大量的污泥进行培养,因为市政污水处理厂污泥的生成量大,相对容易获取,大部分焦化废水处理工程的启动阶段都要部分或者全部接种市政污泥.李秀艳^[16]将市政污泥接种于焦化废水中,经过 32 d 的驯化使活性污泥对焦化废水中酚和 COD 的去除率分别为 99.8% 及 60.0%,; 笔者的团队曾经设计了新建的 4 个焦化废水处理工程^[17,18],全部采用市政污泥调试运行成功.目前对于焦化污泥驯化的研究^[19,20]大多只关注驯化后污泥对废水的降解能力,没有涉及到微生物菌落的结构分析,深入研究微生物群落的变化才能从本质上揭示整个驯化过程活性污泥降解性能改变的原因,指导工程的调试与运行.本研究采集焦化废水原水置于好氧反应罐中,接种市政污泥,检测好氧降解过程中废水成分的变化,采用 Illumina 高通量测序平台从种群和群落水平分析微生物群落的进化和演替过程,讨论环境因子和微生物菌群间竞争分别的作用机制.本研究工作的结果可以指导实际工程进水水质条件、工艺设计参数确定以及优化运行的决策.

1 材料与方法

1.1 焦化废水与市政污泥的采集

实验所用的焦化废水(原水)采自宝钢集团广东韶关钢铁焦化厂酚氰废水处理站隔油池进水口,焦化废水主要污染指标为 COD 3857.26 mg·L⁻¹、氨氮 43.23 mg·L⁻¹、硫氰化物 480.25 mg·L⁻¹、氰化物 17.28 mg·L⁻¹、挥发酚 691.45 mg·L⁻¹、pH = 9.87.实验所用的市政污泥采自广州市沥滘城市污水处理厂二沉池,采集到的市政污泥先用尼龙纱网去除泥水混合物内的砂石等物质.

1.2 反应体系的构建及运行参数

实验装置如图 1 所示.

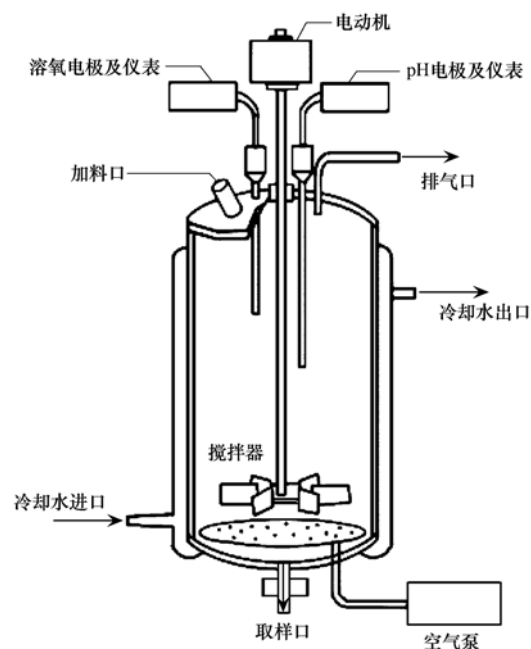


图 1 搅拌反应釜示意

Fig. 1 Stirred reactor

用 1 mg·L⁻¹ 盐酸溶液将焦化废水的 pH 调节至 7. 往反应器中加入适量处理后的焦化废水,将市政污泥接种于反应器中,使泥水混合物的总体积为 4 L(反应器总体积为 5 L),污泥的接种量为反应体系体积的 20%,实际测得接种污泥 SV = 21.0%、SVI = 37.3 mL·g⁻¹、MLSS = 5 634.0 mg·L⁻¹、MLVSS = 3 562.0 mg·L⁻¹、MLSS/MLVSS = 0.63. 投加 0.25 g·L⁻¹ K₂HPO₄ 作为磷源. 反应器运行的温度为 30℃、pH 控制在 7~7.5、DO 控制在 2~5 mg·L⁻¹. 反应过程中不添加任何辅助碳源,共运行 144 h.

1.3 主要指标的检测方法

1.3.1 运行参数及污染物浓度的检测

驯化过程中每间隔 8 h 对反应体系中的 COD、

苯酚、氨氮和硫氰化物的浓度进行测定,以此来初步观察污泥中微生物对废水的适应状态. 其中, COD 采用重铬酸钾微波消解法测定、苯酚采用液相色谱法测定、氨氮采用纳氏试剂比色法测定、硫氰化物采用铁离子显色分光光度法测定^[21]. 用电极法测定运行过程中的 pH 和 DO. 用重量法测定 MLSS.

1.3.2 微生物群落结构检测

实验使用 Ezup 柱式土壤基因组 DNA 抽提试剂盒(上海生工)提取污泥样品 DNA. 称取 200 mg 污泥样品,通过 Buffer SCL 裂解污泥样品,释放出基因组 DNA,然后通过 Buffer SP 和氯仿去除蛋白质等杂质,Buffer SB 去除样品中腐殖酸,避免对后续实验的干扰. 最后将所得 DNA 溶液置于 -20°C 保存,用于后续实验.

将上一步提取的样品 DNA 进行 PCR 扩增,扩增后的 DNA 样品用 1.5% 琼脂糖凝胶进行检测,以确定污泥样品的 DNA 是否被提取出来. 实验所使用的通用引物为 341f-GC(5'-CGCCCGCCGCGCGCGCGCGGGCGGGGCGGGGGCACGGGGGGCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和 534r(5'-ATT ACC GCG GCT GCT GG-3'). PCR 体系的组成为:25 μL 的 Taq PCR Master Mix、2 μL 的 DNA 模板、2 μL 的 Primer 357f-GC、2 μL 的 Primer 518r、19 μL 的 Nuclease-free ddH₂O,共 50 μL 的体系. PCR 扩增的条件为 94°C 预变性 4 min, 94°C 变性 30 s, 60°C 退火 30 s, 72°C 延伸 1 min, 32 个循环, 72°C 最终延伸 10 min, 最后温度降至 4°C 保存.

将经过检测的样品 DNA 送至广州美格生物科技有限公司,用 Illumina 高通量测序平台进行微生物群落组成和多样性检测,将驯化过程微生物群落的演变与污染物浓度变化建立对应分析.

2 结果与讨论

2.1 污泥对焦化废水的降解

投加市政污泥后,反应器中焦化废水的 COD、苯酚、硫氰化物和氨氮浓度随时间的变化分别如图 2 及图 3 所示.

该反应器中焦化废水主要污染物质的起始浓度为 COD $3432.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、苯酚 $469.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、硫氰化物 $450.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮 $41.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经过 144 h 的反应后各物质的浓度变为 COD $376.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、苯酚 $0.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮 $203.66\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硫氰化物在反应 96 h 时其浓度已低于检测下限

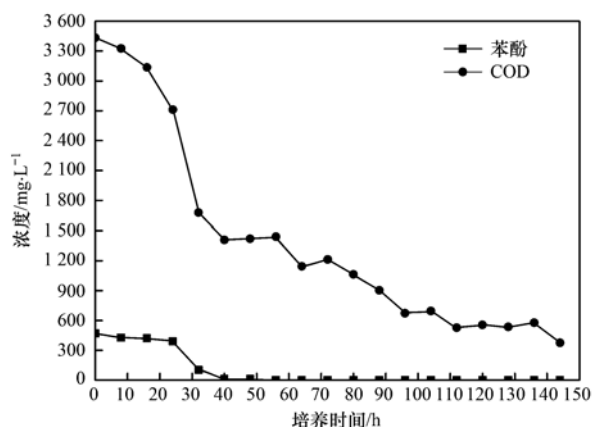


图2 COD和苯酚随时间的变化趋势

Fig. 2 Time evolution of COD and phenol

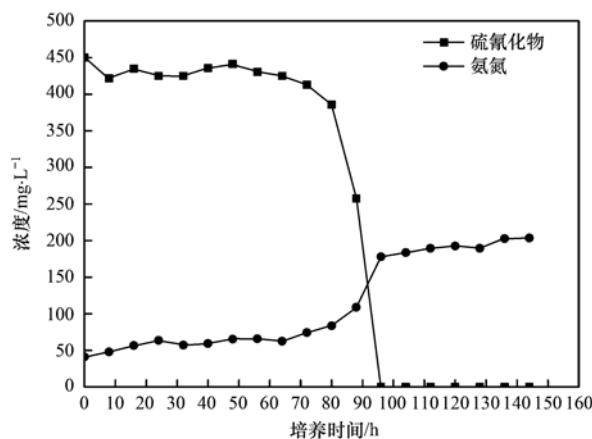


图3 氨氮和硫氰化物随时间的变化趋势

Fig. 3 Time evolution of ammonia and thiocyanide

($0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 这次反应中, COD 的去除率为 89.04%, 其中苯酚、硫氰化物的去除率更是高达 99.92%、100%. 由此可见, 市政污泥能在较短的时间内适应焦化废水的剧毒环境, 并迅速降解废水中苯酚、硫氰化物等污染物质.

从图 2 可以看出, 污泥对焦化废水有一定的适应时间, 16 h 前, COD、苯酚、硫氰化物和氨氮的浓度变化都不大, 16 h 后, COD 开始出现大幅度的降解, 24 h 前降解了 20.99%, 苯酚则在 24 h 仍然没有变化, 24 ~ 40 h 之间有一个很明显的快速降解, 40 h 苯酚已经降解了 97.14%, 这个时候的 COD 降解和苯酚的降解趋势相近, COD 降解了 58.95%. 从图 3 可知, 硫氰化物和氨氮在 72 h 前的变化很小, 在 72 h 后硫氰化物开始迅速降解, 96 h 时硫氰化物的浓度已经低于检测限, 氨氮浓度则在 72 h 和 96 h 之间有较大上升, 随后趋于稳定.

反应前 16 h 废水的 COD 浓度并没有出现较大的变化, 而且刚投加的市政污泥中微生物大多为异

养型,由此可推断,在这段时间内微生物群落还没完全适应焦化废水的环境,无法利用废水中的大部分碳源. 经过 16 h 的适应期,市政污泥内的微生物群落对 COD 的利用率逐渐增加,但此时苯酚浓度仍然没有变化,说明此时的 COD 降低是微生物降解苯酚以外的污染物引起,在 24 h 时苯酚的浓度也开始下降,可初步推测在此实验中污泥对苯酚的适应期是 24 h,反应器运行了 72 h,硫氰化物浓度才出现明显的下降,由于硫氰化物对污泥中部分微生物具有毒性抑制,适应时间比较长,此时 COD 和苯酚的浓度分别为 $1\,144.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.96\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明硫氰化物的降解是以苯酚基本被利用完作为条件. 潘霞霞等^[22]研究了反应体系中苯酚浓度对硫氰化物降解的影响,发现随着苯酚浓度的增大,硫氰化物被完全降解的时间增长,证明了上述观点. 另外,氨氮浓度随着硫氰化物的降解开始显著地升高,理解为废水中的氰化物、硫氰化物和有机氮等物质被氧化后释放出氨氮,表现出明显的氨化过程特征.

2.2 污泥中微生物群落结构的变化

市政污泥在焦化废水的环境中驯化,其微生物菌落结构会发生相应的变化从而适应新的废水环境. 通过 Illumina 高通量测序对污泥中微生物菌落进行初步分析. 其中 A、B、C、D、E、F 分别表示培养时间为 0、16、40、72、96、144 h 的活性污泥样品.

从表 1 中样品的序列组成及 OTU 组成可知,市政污泥投入焦化废水中后,运行 16 h 的污泥样品序列和 OTU 组成从 31 985、8 070 下降至 28 304、7 225,说明焦化废水对市政污泥的微生物群落表现出一定的毒性,培养起始阶段部分微生物死亡,DNA 溶解. 从表 2 的 Shannon 指数和 Simpson 指数可知,0 h 和 16 h 的数值相差很小,说明微生物群落多样性几乎没有变化. 40 h 的 Shannon 指数和 Simpson 指数有所下降,即此时微生物多样性比 0 h 和 16 h 略低. 72 h 的 OTU 数、Shannon 指数和 Simpson 指数又有所提升,表明污泥在适应焦化废水后,微生物利用焦化废水的污染物为营养物质生长,造成序列数、OTU 数比 40 h 时提高了,同时 Shannon 指数和 Simpson 指数也同样升高,多样性回复到 0 h 及 16 h 的水平. 随后的 96 h,污泥虽然适应了焦化废水的环境,焦化废水中的大部分碳源已被利用,微生物处在缺营养状态,氨氮的浓度快速上升,C/N 比严重失衡,高的氨氮浓度也会抑制微生物的生长,部分微生物因不适应此环境而死亡,故此时的序列数、

OTU 数开始下降,微生物多样性指数有较明显的降低. 如图 4 所示,样品的 PCoA 分析图中两个物种在坐标轴之间的距离越近,表示两个样品的物种组成越相似,从中可知:A 和 B 组成相似,C 和 D 组成相似,E 和 F 组成相似,这 3 组间的组成差异大,与该 3 个时间段相对应的废水污染物的组成成分也存在较大的差异,表明微生物群落的结构变化是随着废水成分的改变及污染物成分的降解而相应改变.

表 1 各样品所含 OTU 数及序列分析

Table 1 OTU number and sequence analysis of each sample			
样品	培养时间/h	序列数量	OTU 数量
A	0	31 985	8 070
B	16	30 725	7 997
C	40	28 304	7 225
D	72	33 651	8 784
E	96	57 149	10 270
F	144	43 836	8 753

表 2 各阶段泥样 α 多样性参数结果统计

Table 2 The α diversity parameter statistics of sludge samples at each stage				
样品	培养时间/h	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
A	0	14 359.93	10.764 71	0.995 343
B	16	14 914.61	10.766 97	0.995 723
C	40	14 781.18	10.423 96	0.993 734
D	72	17 277.17	10.796 98	0.995 903
E	96	14 525.29	9.983 22	0.986 295
F	144	13 837.44	10.094 50	0.990 168

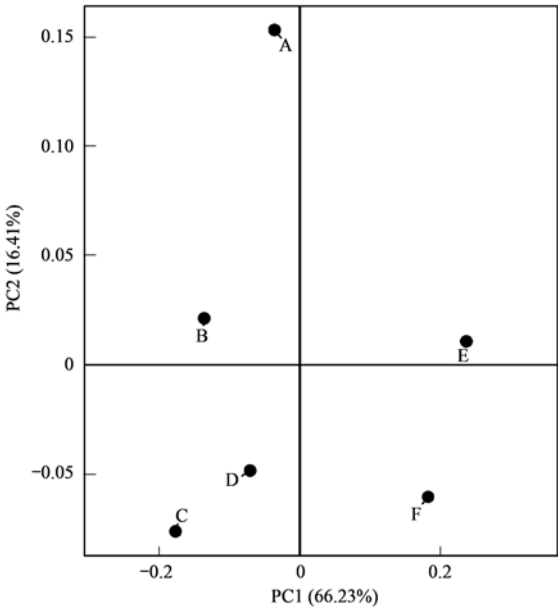


图 4 样品的 PCoA (weighted unifrac) 分析

Fig. 4 PCoA (weighted unifrac) of microbial community structures

面对新环境带来的冲击,活性污泥中的微生物通过群落的演变与更替来逐步适应. 从图 5 中可

知,活性污泥在整个反应过程中其微生物群落 90% 以上是由 6 种 phylum 水平的菌群构成,分别是 Firmicutes、Verrucomicrobia、Actinobacteria、Planctomycetes、Chloroflexi、Acidobacteria、Bacteroidetes、Proteobacteria,其中 Proteobacteria 及 Bacteroidetes 占主导地位,丰度分别为 53.52% 及 38.57% (表 3),与文献[23,24]的研究结果相似.整个反应过程中菌群在门水平上没有很大的变化,但是活性污泥中的优势菌属随着废水环境的改变而更替.从图6的污泥微生物群落的genus水平可以

观察到,起始时污泥中的优势菌属为 *Dechloromonas*、*Thermomonas*, 相对丰度分别为 6.04%、4.73% (表 4); 在 144 h 的反应过程中,其优势菌属在不断地变化,先是演变为 *Acinetobacter*、*Pseudomonas*,相对丰度分别为 7.67%、5.37%; 然后演变为 *Brevundimonas*、*Sphingobacterium*, 相对丰度分别为 4.16%、7.19%; 最后演变为 *Fluviicola*、*Stenotrophomonas*、*Thiobacillus*, 相对丰度分别为 9.88%、4.46%、8.11%. 可见,在不断变化的废水环境中,微生物群落会受到不同程度的冲击,群落中的优势菌群发生变化,活性污泥适应新的废水环境并有效利用废水中的残余物质,存在某种作用使降解与菌群之间建立了响应关系.

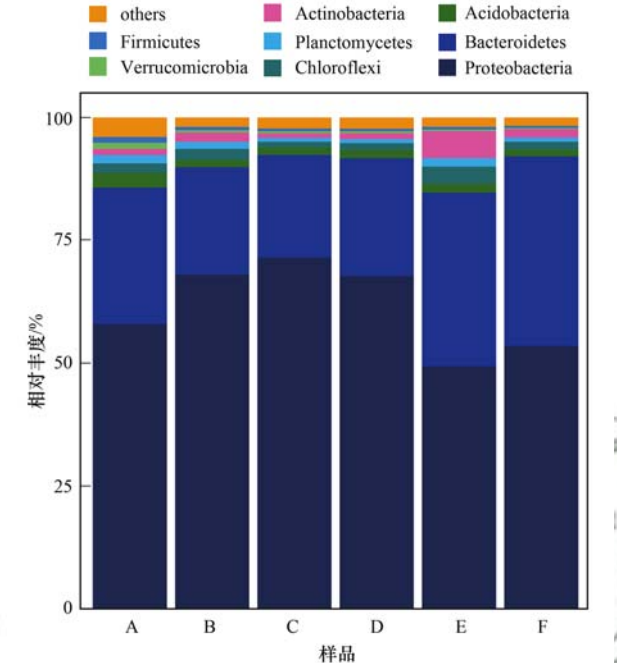


图5 phylum 水平各样品相对丰度分布
Fig. 5 Relative abundance of different phylum of each sludge sample

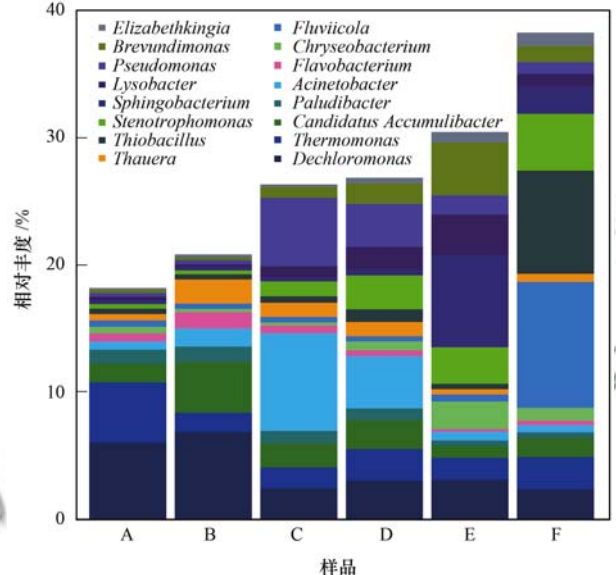


图6 genus 水平各样品相对丰度分布
Fig. 6 Relative abundance of different genus of each sludge samples

表 3 微生物菌落结构门水平上的组成/%
Table 3 Microbial community composition at the phylum level/%

门	样品					
	A	B	C	D	E	F
Acidobacteria	2.97	1.49	1.56	1.70	1.81	1.38
Actinobacteria	1.27	1.91	0.92	1.21	5.45	1.68
Bacteroidetes	27.80	21.90	20.91	23.96	35.29	38.57
Chloroflexi	1.98	2.27	1.13	1.37	3.53	1.59
Firmicutes	1.17	0.67	0.52	0.47	0.57	0.40
Planctomycetes	1.66	1.41	0.81	0.82	1.74	0.86
Proteobacteria	57.93	67.96	71.45	67.75	49.38	53.52
Verrucomicrobia	1.25	0.48	0.45	0.43	0.32	0.29
others	3.98	1.90	2.26	2.30	1.90	1.70

2.3 污染物降解与微生物群落演变的联系

结合 4 种环境因子的降解情况发现,反应器运行在 16 ~ 40 h 之间, COD 的浓度从 3 135.59 mg·L⁻¹降至 1 408.90 mg·L⁻¹, 苯酚浓度从 469.04

mg·L⁻¹降至 13.42 mg·L⁻¹,与此同时,污泥样品则是从样品 B 演变到了样品 C; 再结合 genus 水平物种相对丰度热图的分析,又可发现,经过了 40 h 的反应, *Acinetobacter*、*Pseudomonas* 两种菌属的丰度明

显增大;从表4中可知,*Acinetobacter*和*Pseudomonas*的相对丰度分别从开始的时的0.64%、0.27%增加到7.67%、5.37%,*Acinetobacter*和

Pseudomonas^[25~28]是两种较为常见的酚类降解菌,能降解焦化废水中苯酚和间甲酚等结构较为简单的酚类物质.上述现象均表明了演变的存在.

表4 微生物菌落结构属水平上的组成/%
Table 4 Microbial community composition at the genus level/%

属	样品					
	A	B	C	D	E	F
<i>Acinetobacter</i>	0.64	1.43	7.67	4.11	0.70	0.55
<i>Brevundimonas</i>	0.27	0.22	0.86	1.60	4.16	1.25
<i>Candidatus Accumulibacter</i>	1.46	3.99	1.88	2.28	0.92	1.51
<i>Chryseobacterium</i>	0.52	0.26	0.24	0.70	2.16	1.01
<i>Dechloromonas</i>	6.04	6.88	2.45	3.06	3.11	2.37
<i>Elizabethkingia</i>	0.14	0.23	0.19	0.44	0.81	1.05
<i>Flavobacterium</i>	0.63	1.29	0.60	0.45	0.20	0.35
<i>Fluviicola</i>	0.51	0.41	0.43	0.40	0.55	9.88
<i>Lysobacter</i>	0.28	0.22	0.90	1.80	3.22	0.97
<i>Paludibacter</i>	1.11	1.21	1.00	0.92	0.43	0.44
<i>Pseudomonas</i>	0.27	0.32	5.37	3.38	1.51	0.93
<i>Sphingobacterium</i>	0.30	0.27	0.31	0.44	7.19	2.16
<i>Stenotrophomonas</i>	0.35	0.31	1.16	2.66	2.88	4.46
<i>Thauera</i>	0.50	1.89	1.11	1.11	0.41	0.64
<i>Thermomonas</i>	4.73	1.50	1.63	2.46	1.73	2.54
<i>Thiobacillus</i>	0.43	0.40	0.52	1.00	0.42	8.11

反应器运行在72~96 h之间,硫氧化物的浓度从450.00 mg·L⁻¹降至0.1 mg·L⁻¹以下,氨氮浓度从41.10 mg·L⁻¹升至178.01 mg·L⁻¹,此阶段是SCN⁻的降解阶段及氨氮的积累阶段.从图7可以看出,从72~96 h,T78、WCHB1-05、*Sphingobacterium*、*Longilinea*、*Brevundimonas*、*Lysobacter*、*Phenylobacterium*、*Chryseobacterium*、*Luteimonas*等菌属的丰度明显增大.从表4可以看出,其中的*Sphingobacterium*、*Brevundimonas*、*Lysobacter*、*Chryseobacterium*增长最多,所占的丰度最大,分别从72 h的0.31%、0.86%、0.90%、0.24%增加到96 h时的7.19%、4.16%、3.22%、2.16%,说明这几种菌属参与了硫氧化物的利用.*Sphingobacterium*、*Brevundimonas*^[29,30]菌属也可以利用复杂的烃类物质作为碳源,如喹啉、菲等焦化废水常见的难降解有机物.黄会静^[31]的研究表明*Chryseobacterium*为焦化废水中可高效降解硫氧化物的菌属,即菌种丰度的变化受污染物或营养成分的诱导.

随着苯酚、硫氧化物等主要能量物质的用尽,废水中的微生物结构也随之变化,到144 h的测试发现,优势菌属变为*Fluviicola*、*Stenotrophomonas*及*Thiobacillus*,丰度从96 h的0.55%、2.88%、0.42%增长为9.88%、4.46%、8.11%.*Thiobacillus*是硫化细菌,氧化还原态硫化物或单质

硫为硫酸,表现为专性化能自养.硫氧化物在降解的过程中会生成NH₃、NO₂⁻和S²⁻等代谢产物^[32],*Thiobacillus*利用这些代谢产物繁殖并成为主要菌属^[33,34].*Stenotrophomonas*、*Fluviicola*分别属于变形菌门的γ-Proteobacteria纲、拟杆菌门的Flavobacteria纲,γ-Proteobacteria和Flavobacteria普遍存在于含硝态氮的废水中且γ-Proteobacteria纲和Flavobacteria纲^[35,36]的菌属对硝态氮具有较好的利用能力.

从测序结果可知,整个反应过程硝化细菌和亚硝化细菌没有占到优势,在各种相对丰度热图(图7)中没有被统计出来,图3的实验结果也反映了体系中的氨氮浓度没有下降.在反应的起始阶段,焦化废水对市政污泥中的微生物具有较强的毒性抑制,如氰化物对硝化细菌的强的抑制作用存在,同时起始时的氨氮浓度较低,使得硝化细菌在培养起始阶段无法快速繁殖.到了反应的中后期,虽然氨氮浓度较高,但此时废水中的碳/氮比较小,在后期,*Thiobacillus*成为优势菌,氧化硫为硫酸,反应液的pH值下降,而硝化菌适合在弱碱性的环境中生长,解析了本实验的中后期,在没有调节碳/氮比和pH的情况下,硝化细菌和亚硝化细菌不能快速繁殖的现象.

从上述的结果及分析可知,污染物成分和浓度的变化直接改变污泥中微生物所处的生存环境,从

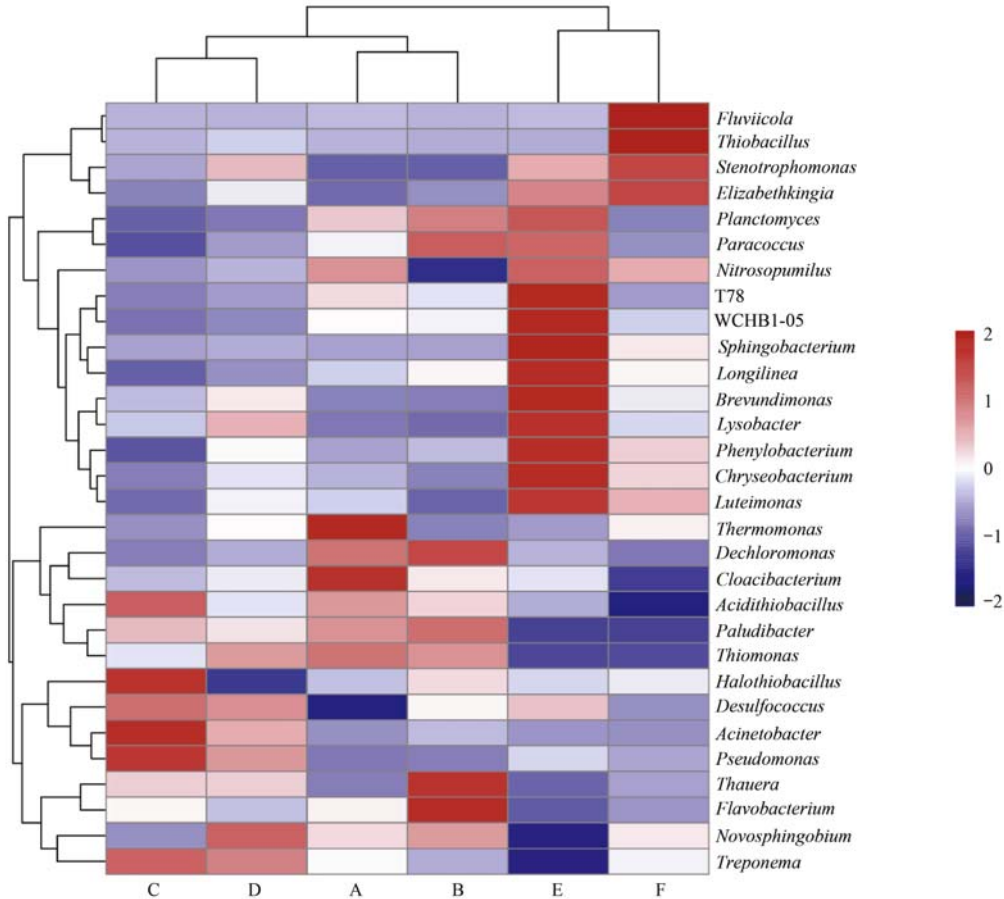


图7 genus 水平的前 30 个物种相对丰度热图

Fig. 7 Top 30 bacterial genus heatmap figure based on higher expressive abundance of each sample at the phylum level

而使得污泥中各个菌群的竞争力发生改变,高浓度污染物质会促进适应该环境的降解菌生长繁殖,这些菌群逐渐成为污泥微生物群落中的优势菌群. 废水浓度变化带来的环境改变可以促进活性污泥不同优势菌群的构建,即发生了微生物群落的演变.

3 结论

- (1)接种的市政污泥在克服焦化废水毒性抑制并适应环境之后,能够有效降解废水中的污染物质,其中 40 h 时降解 97.14% 的苯酚,96 h 时的硫氰化物浓度已低于检测限.
- (2)从苯酚降解到硫氰化物降解的不同阶段中,优势菌群从 *Acinetobacter*、*Pseudomonas* 逐渐转变为 *Sphingobacterium*、*Brevundimonas*, *Lysobacter* 及 *Chryseobacterium*,表明存在微生物群落演替受废水组成的诱导作用,其响应还涉及废水的环境条件如 pH 值等.
- (3)在焦化废水处理工程的调试及微生物驯化过程中,客观存在基于废水环境的改变促使微生物菌群间的竞争关系加以适应,从而导致污泥中优势

菌群的演变,通过认识环境因子和微生物菌群间竞争对群落结构演变影响的规律,可以成为工程启动运行和稳态管理的科学工具.

参考文献:

[1] del Campo J, Mallo D, Massana R, *et al.* Diversity and distribution of unicellular opisthokonts along the European coast analysed using high-throughput sequencing[J]. *Environmental Microbiology*, 2015, **17**(9): 3195-3207.

[2] 王绍祥,杨洲祥,孙真,等. 高通量测序技术在水环境微生物群落多样性中的应用[J]. *化学通报*, 2014, **77**(3): 196-203.

Wang S X, Yang Z X, Sun Z, *et al.* Application of high throughput sequencing in the diversity of water microbial communities[J]. *Chemistry*, 2014, **77**(3): 196-203.

[3] Molina-Muñoz M, Poyatos J M, Sánchez-Peinado M, *et al.* Microbial community structure and dynamics in a pilot-scale submerged membrane bioreactor aerobically treating domestic wastewater under real operation conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(13): 3994-4003.

[4] Wang X H, Wen X H, Yan H J, *et al.* Bacterial community dynamics in a functionally stable pilot-scale wastewater treatment plant[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2352-2357.

[5] Hu M, Wang X H, Wen X H, *et al.* Microbial community structures in different wastewater treatment plants as revealed by 454-pyrosequencing analysis [J]. *Bioresource Technology*,

- 2012, **117**: 72-79.
- [6] Tocchi C, Federici E, Fidati L, *et al.* Aerobic treatment of dairy wastewater in an industrial three-reactor plant: Effect of aeration regime on performances and on protozoan and bacterial communities[J]. *Water Research*, 2012, **46**(10): 3334-3344.
- [7] Rowan A K, Snape J R, Fearnside D, *et al.* Composition and diversity of ammonia-oxidising bacterial communities in wastewater treatment reactors of different design treating identical wastewater[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, **43**(2): 195-206.
- [8] Liao X B, Chen C, Wang Z, *et al.* Pyrosequencing analysis of bacterial communities in drinking water biofilters receiving influents of different types[J]. *Process Biochemistry*, 2013, **48**(4): 703-707.
- [9] Im W T, Kim D H, Kim K H, *et al.* Bacterial community analyses by pyrosequencing in dark fermentative H₂-producing reactor using organic wastes as a feedstock[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(10): 8330-8337.
- [10] Zhao J L, Jiang Y X, Yan B, *et al.* Multispecies acute toxicity evaluation of wastewaters from different treatment stages in a coking wastewater-treatment plant[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, **33**(9): 1967-1975.
- [11] Zhang W H, Wei C H, Feng C H, *et al.* Coking wastewater treatment plant as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to the atmosphere and health-risk assessment for workers[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **432**: 396-403.
- [12] 赖鹏, 赵华章, 叶正芳, 等. 生物滤池 A/O 工艺处理焦化废水研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2727-2733.
- [13] Lai P, Zhao H Z, Ye Z F, *et al.* Study on treatment of coking wastewater by A/O process of biological filter[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(12): 2727-2733.
- [13] 李咏梅, 顾国维, 仇雁翎, 等. 厌氧酸化在焦化废水脱氮和毒性削减中的作用[J]. *环境科学*, 2001, **22**(4): 86-90.
- [14] Li Y M, Gu G W, Qiu Y L, *et al.* Effect of anaerobic acidification treatment on nitrogen removal and toxicity reduction of coke plant wastewater[J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(4): 86-90.
- [14] 赵文涛, 黄霞, 李笃中, 等. 无排泥条件下的膜-生物反应器系统处理焦化废水可行性研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3316-3323.
- [15] Zhao W T, Huang X, Lee D J, *et al.* Feasibility study on coke wastewater treatment using membrane bioreactor (MBR) system with complete sludge retention[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3316-3323.
- [15] 范丹, 廖建波, 韦聪, 等. 焦化废水处理工程运行能耗的单元解析模型——以 OHO 流化床工艺为例[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(10): 3709-3719.
- [16] Fan D, Liao J B, Wei C, *et al.* Unit analytical model of energy consumption during the operation of coking wastewater treatment plant: a case study of OHO fluidized bed process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3709-3719.
- [16] 李秀艳. 生活污水用于焦化废水处理的培养驯化[J]. *山东冶金*, 2010, **32**(2): 21-23, 27.
- [17] Li X Y. Culture and acclimation of domestic sludge used for coking wastewater treatment[J]. *Shandong Metallurgy*, 2010, **32**(2): 21-23, 27.
- [17] 易欣怡, 韦朝海, 吴超飞, 等. O/H/O 生物工艺中焦化废水含氮化合物的识别与转化[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2190-2198.
- [18] Yi X Y, Wei C H, Wu C F, *et al.* Identification and transformation of nitrogen compounds in coking wastewater during O/H/O biological treatment process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2190-2198.
- [18] Zhu S, Wu H Z, Wei C H, *et al.* Contrasting microbial community composition and function perspective in sections of a full-scale coking wastewater treatment system[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(2): 949-960.
- [19] 周丽辉, 韩颖, 张怀玉, 等. 焦化废水预处理系统中高效好氧污泥的培养驯化[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(1): 195-199.
- [20] Zhou L Y, Han Y, Zhang H Y, *et al.* Cultivation of activated aerobic sludge in coking wastewater pretreatment system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(1): 195-199.
- [20] 王海会. 处理焦化废水 EGSB 反应器的启动运行[D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [21] Wang H H. Start-up operation of EGSB reactor treating coking wastewater[D]. Taiyuan: North University of China, 2010.
- [21] 潘霞霞, 黄会静, 冯春华, 等. 焦化废水中硫氰化物的快速检测方法[J]. *煤化工*, 2011, **39**(1): 15-18.
- [22] Pan X X, Huang H J, Feng C H, *et al.* Rapid determination of thiocyanate in coking wastewater[J]. *Coal Chemical Industry*, 2011, **39**(1): 15-18.
- [22] 潘霞霞, 李媛媛, 黄会静, 等. 焦化废水中硫氰化物的生物降解及其与苯酚、氨氮的交互影响[J]. *化工学报*, 2009, **60**(12): 3089-3096.
- [23] Pan X X, Li Y Y, Huang H J, *et al.* Biodegradation of thiocyanate and inhibitory interaction with phenol, ammonia in coking wastewater[J]. *CIESC Journal*, 2009, **60**(12): 3089-3096.
- [23] Ma Q, Qu Y Y, Shen W L, *et al.* Bacterial community compositions of coking wastewater treatment plants in steel industry revealed by Illumina high-throughput sequencing[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 436-443.
- [24] 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 等. 焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3923-3930.
- [25] Meng X J, Li H B, Cao H B, *et al.* Bacterial community composition of activated sludge from coking wastewater[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3923-3930.
- [25] Shiri Z, Kermanshahi R K, Soudi M R, *et al.* Isolation and characterization of an *n*-hexadecane degrading *Acinetobacter baumannii* KSS1060 from a petrochemical wastewater treatment plant[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, **12**(2): 455-464.
- [26] 陈春, 李文英, 吴静文, 等. 焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1652-1656.
- [27] Chen C, Li W Y, Wu J W, *et al.* Screening and characterization of phenol degrading bacteria for the coking wastewater treatment[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1652-1656.
- [27] Shen R, Cai L W, Meng D C, *et al.* Benzene containing polyhydroxyalkanoates homo-and copolymers synthesized by genome edited *Pseudomonas entomophila*[J]. *Science China Life Sciences*, 2014, **57**(1): 4-10.
- [28] 曹军伟, 董纯明, 曹宏斌, 等. 焦化废水中酚降解菌及其降

- 解基因的研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 560-566.
- Cao J W, Dong C M, Cao H B, *et al.* Isolation of phenol-degrading bacteria from coking wastewater and their degradation gene[J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 560-566.
- [29] Mohd-Kamil N A F, Hussain N H, Mizad M B, *et al.* Enhancing performance of *Sphingobacterium spiritivorum* in bioremediation phenanthrene contaminated sand [J]. Remediation Journal, 2014, **24**(3): 119-128.
- [30] Wang C R, Zhang M R, Cheng F L, *et al.* Biodegradation characterization and immobilized strains' potential for quinoline degradation by *Brevundimonas* sp. K4 isolated from activated sludge of coking wastewater[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2015, **79**(1): 164-170.
- [31] 黄会静. 焦化废水处理的硫氰化物降解功能菌特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- Huang H J. Study on characteristics of thiocyanate degrading bacteria in coking wastewater treatment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [32] 张玉秀, 尹莉, 李海波, 等. 焦化废水处理厂活性污泥对硫氰化物的降解机制[J]. 环境化学, 2016, **35**(1): 118-124.
- Zhang Y X, Yin L, Li H B, *et al.* Biodegradation mechanism of thiocyanate by activated sludge from coking wastewater treatment plant[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(1): 118-124.
- [33] 武鑫, 赵晋忠. 脱氮硫杆菌对废水中硫氮的脱除[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(1): 175-178.
- Wu X, Zhao J Z. Removal of nitrate and sulfide from wastewater by *Thiobacillus denitrificans*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2013, **19**(1): 175-178.
- [34] 于皓. 同步脱硫脱氮工艺中微生物群落结构及其功能解析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Yu H. Characterization of microbial community structure and function in simultaneous desulfurization and denitrification process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [35] 廖润华. 胁迫条件下EGSB反应器处理高硝态氮废水及其微生物群落与功能研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- Liao R H. Research on microbial communities, function and performances for high nitrate nitrogen wastewater treatment in an EGSB reactor under stress conditions [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [36] 纪树兰, 崔丹红, 周明璟, 等. 基于城市污水好氧颗粒污泥脱氮除磷系统种群多样性研究[J]. 北京工业大学学报, 2013, **39**(7): 1100-1108.
- Ji S L, Cui D H, Zhou M J, *et al.* Bacteria diversity analysis of aerobic granular sludge for nitrogen and phosphorus removal in municipal wastewater treatment system [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, **39**(7): 1100-1108.



CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3451)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)