

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



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O₃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,王青耀,米持真一,吕森林(2273)

垃圾焚烧厂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,胡馨遥,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,于爽(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 王晨焱,姜括,谢文龙,汪磊(2373)

高地下水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H₂O₂/KI降解磺胺甲基嘧啶 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)

不同铅负载量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,周徽(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Ca²⁺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 张崇森,牛全睿,徐雨梅,王院梅,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,李磊(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,杨文骏,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,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)

大豆和小麦根系对非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N₂O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,吴夏莞,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)

温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响

张玲, 彭党聪*, 常蝶

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 本研究以 30℃ 高温条件下稳定运行的强化生物除磷 (EBPR) 反应器的污泥为对象, 探讨温度对高温聚磷菌 (PAO_{HT}) 活性及基质竞争能力的影响. 结果表明, 在 15~30℃ 温度范围内, PAO_{HT} 的活性以及对基质的竞争能力随温度升高不断增强, 当温度为 30℃ 时, PAO_{HT} 的厌氧释磷 (以 P/VSS 计)、好氧吸磷 (以 P/VSS 计) 以及乙酸吸收速率 (以 HA_c/VSS 计) 分别为 239.46、79.90、357.47 mg·(g·h)⁻¹, 对应的 ΔP/ΔHA_c 为 0.628, 均高于常温 PAO. 利用简化的阿伦尼乌斯公式对不同温度下试验污泥的厌氧释磷、好氧吸磷和乙酸吸收速率进行拟合, 得出其温度系数分别为 1.08、1.07 和 1.05.

关键词: 强化生物除磷 (EBPR); 聚磷菌 (PAO); 荧光原位杂交技术 (FISH); ΔP/ΔHA_c; 温度系数

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2429-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201609214

Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition

ZHANG Ling, PENG Dang-cong*, CHANG Die

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To investigate the effect of temperature on the activity of high-temperature phosphate accumulating organisms (PAO_{HT}) and their competitive ability for the substrate, the sludge from an enhanced biological phosphorus removal (EBPR) reactor stably operated at the high temperature of 30℃ was used. The results showed that PAO_{HT} activity and their competitive ability for the substrate increased with temperature increasing from 15℃ to 30℃. When the temperature was as higher as 30℃, the rates of anaerobic phosphorus release, aerobic phosphorus uptake and acetate uptake of PAO_{HT} were 239.46 mg·(g·h)⁻¹, 79.90 mg·(g·h)⁻¹, 357.47 mg·(g·h)⁻¹, respectively. The corresponding value of ΔP/ΔHA_c was 0.628, which was considerably higher than that of PAO reported in literatures. A simplified Arrhenius equation was used to describe the effect of temperature on the rates of anaerobic phosphorus release, aerobic phosphorus uptake and acetate uptake, and the temperature coefficients were 1.08, 1.07 and 1.05, respectively.

Key words: enhanced biological phosphorus removal (EBPR); phosphorus accumulating organisms (PAOs); fluorescence in situ hybridization (FISH); ΔP/ΔHA_c; temperature coefficient

强化生物除磷 (EBPR) 是目前应用最为广泛的生物除磷工艺. 该工艺利用聚磷菌 (PAO) 在厌氧条件下将储存于体内的聚磷酸盐 (Poly-P)^[1] 水解获取能量, 用以吸收水中的挥发性脂肪酸 (VFA), 并以聚羟基烷酸酯 (PHAs) 的形式储存在细胞内; 在好氧条件下 PAO 以储存于细胞内的 PHAs 作为碳源和能源, 吸收水中的磷并将其合成为 Poly-P 进行细胞增殖, 最终通过排除富磷污泥达到污水除磷的目的^[2]. 在 EBPR 系统中, 还存在与 PAO 代谢机制相似的聚糖菌 (GAO), 在厌氧条件下 GAO 与 PAO 竞争基质 (VFA), 但在好氧条件下并不摄取磷^[3], 因此, 如何提高 PAO 的活性和强化其与 GAO 对基质的竞争能力是保证 EBPR 工艺稳定运行的重要内容.

有研究表明^[4~8], 影响 EBPR 系统稳定运行的因素主要有碳源、pH、温度、DO 等, 其中, 温度的影响一直存在争议. 一般认为, 当温度低于 20℃ 时, 有利于 PAO 的竞争, 从而提升 EBPR 系统的性能^[9];

当温度高于 20℃ 时, GAO 占据竞争优势, 导致污泥中 PAO 的份额逐渐减少, 除磷效率逐渐降低, 甚至 EBPR 系统的崩溃^[10]. 然而, 最新的研究表明, EBPR 系统在高温条件下仍可高效除磷. Freitas 等^[11] 在 SBR 中采用短期循环 (厌氧 20 min, 好氧 10 min, 静置 1 min) 实现了 30℃ 高温条件下 EBPR 的稳定运行. Winkler 等^[12] 利用 PAO 颗粒污泥与 GAO 颗粒污泥密度的差异, 通过排除污泥床上部密度较小的 GAO, 在 USB 反应器内富集可以适应高温的 PAO, 在 30℃ 条件下实现了较好的除磷效果. Ong 等^[13,14] 研究表明, 在 28~32℃ 的条件下, 长期运行的 EBPR 反应器可以实现 95% 的磷的去除率, qPCR 检测结果表明污泥中的 PAO 为 *Accumulibacter* 的亚种 Clade IIF. 但是目前关于温度对 EBPR 系统中 PAO 的活性以及与 GAO 关

收稿日期: 2016-09-26; 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50878178)

作者简介: 张玲 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水厌氧生物处理理论及技术, E-mail: liana1013@163.com

* 通信作者, E-mail: dcpeng@xauat.edu.cn

于基质的竞争能力的影响尚无定论,因此需要开展相同试验条件下不同温度对 PAO 与 GAO 之间的竞争影响研究,尤其是高温条件下对其竞争过程的具体研究显得更加重要。

为了更好地理解高温条件下 EBPR 系统中 PAO_{HT} 的活性及基质竞争的影响,本研究以实验室中 30℃ 高温条件下长期运行的具有较好除磷功能的 SBR 反应器中的污泥为对象,结合 FISH 技术,探讨 15~30℃ (基于南方全年污水温度范围约为 10~30℃) 温度条件下高温聚磷菌 (PAO_{HT}) 的释磷、吸磷以及乙酸吸收速率,以期为温度变化幅度较大的地区和接收较高温工业废水的生物除磷系统的稳定运行提供依据。

1 材料与方 法

1.1 污泥来源

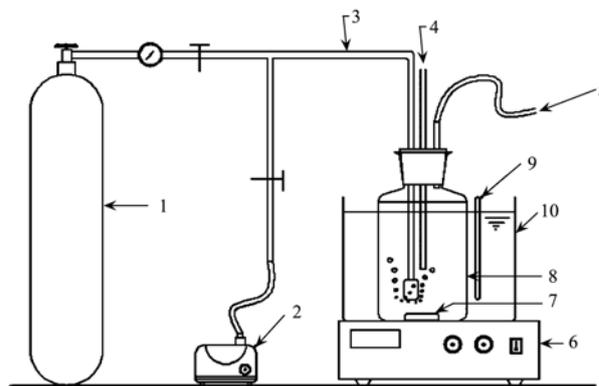
试验污泥取自实验室 30℃ 高温条件下长期运行 (430 d) 的 SBR 反应器^[15]。该反应器采用 A/O 方式运行,每天 6 个周期,每个周期为 4 h,其中,进水 7 min,厌氧 1 h,好氧 2 h,沉淀 40 min,排水 10 min,闲置 3 min。控制水力停留时间 (HRT) 为 8 h,污泥停留时间 (SRT) 为 8 d。反应器温度一直维持在 30℃。进水 COD (乙酸) 浓度为 300 mg·L⁻¹,磷 (PO₄³⁻-P) 浓度 10 mg·L⁻¹,而出水磷 (PO₄³⁻-P) 始终小于 0.1 mg·L⁻¹,磷的去除率高达 99% 以上。反应器中的悬浮固体 (SS) 和挥发性悬浮固体 (VSS) 浓度分别稳定在 2.36 g·L⁻¹ 和 1.63 g·L⁻¹,运行高效稳定。

1.2 活性污泥释磷吸磷速率测定

活性污泥释磷吸磷速率测定采用间歇试验法。试验装置见图 1。试验开始前,先采用经脱氧处理的自来水对污泥进行陶洗,然后将其倒入反应瓶中,加入配制好的基质溶液 (与 SBR 反应器进水水质保持一致),反应瓶底部置有磁力转子保证完全混合状态,反应过程中的温度利用水浴槽进行控制。在厌氧阶段,通入氮气隔绝空气,确保反应瓶处于厌氧状态;在好氧阶段,以 60 L·h⁻¹ 的速率通入空气,保证混合液中的溶解氧 (DO) 大于 2 mg·L⁻¹。在不同反应时间点取样,测定相应的磷及乙酸浓度,试验结束时测定混合液的 SS 和 VSS,用于计算厌氧释磷速率 [以 P/VSS 计, mg·(g·h)⁻¹,下同]、好氧吸磷速率 [以 P/VSS 计, mg·(g·h)⁻¹,下同] 和乙酸吸收速率 [以 HAc/VSS 计, mg·(g·h)⁻¹,下同]。

1.3 分析方法

磷 (PO₄³⁻-P) 采用钼锑抗分光光度法;悬浮固体



1. 氮气瓶;2. 曝气机;3. 进水管;4. 取样管;5. 排气管;
6. 磁力搅拌器;7. 转子;8. 反应瓶;9. 温度计;10. 水浴槽

图 1 间歇试验装置示意

Fig. 1 Diagram of batch experiment device

(SS) 和挥发性悬浮固体 (VSS) 采用重量法;化学需氧量 (COD) 采用重铬酸钾法;pH 采用玻璃电极法。挥发性脂肪酸 (VFAs) 采用气相色谱法 (型号:安捷伦 6890N),检测器为氢火焰离子 (FID) 检测器,色谱柱型号为 DB-FFAP。

1.4 FISH 分析方法

样品预处理:取好氧末污泥混合液离上清液,加入 1 mL 的 1×PBS 缓冲溶液重悬,重复操作两次后,加入 1 mL 的 4% 的多聚甲醛溶液重悬,置于 4℃ 条件下固定 2 h,然后离上清液,加入 1×PBS 缓冲溶液离心,重复 3 次,以洗去多余的多聚甲醛溶液,分别加入 0.5 mL 的 1×PBS 缓冲溶液和无水乙醇,摇匀置于 -20℃ 下保存。

脱水和杂交:将涂好的载玻片放置于培养箱中干燥,干燥好的载玻片依次放于 75%、95%、100% 的乙醇溶液中脱水 3 min,取出后风干。将事先配好的杂交缓冲液和探针使用液以体积比 8:1 的比例混合,避光,涂于载玻片的样品上,将载玻片迅速移回到杂接管中,于 46℃ 条件下杂交 2~4 h,杂交完成后取出载玻片进行洗脱处理并立即风干封片。

样品观测及分析方法:采用激光共聚焦显微镜 (德国莱卡 SP8) 观察样品和图像采集,用 Image-ProPlus 6.0 软件对所采集的图像进行统计分析,从而确定样品中 PAO、GAO 和 EUB 所占比例。

有关荧光探针和杂交的详细操作参见文献 [16~18]。

2 结果与讨论

2.1 试验污泥的活性

图 2 为试验污泥在 30℃ 下的活性测定结果。该

污泥在厌氧段的最大释磷速率为 $239.46 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 好氧段的最大吸磷速率为 $79.90 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 厌氧段的乙酸吸收速率为 $357.47 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 对应的吸收单位乙酸释磷量 ($\Delta P / \Delta \text{HAc}$) 为 0.628. 说明该污泥中的聚磷菌在高温下具有较好的释磷、吸磷以及对基质的吸收能力.

Brdjanovic 等^[19]关于温度对生物除磷的影响性研究表明, 在 30°C 时其污泥最大释磷速率为 $68 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 好氧最大吸磷速率为 $57 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 乙酸吸收速率为 $180 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, $\Delta P / \Delta \text{HAc}$ 为 0.376. 相较之下, 本研究的试验污泥在 30°C 高温条件下运行长达一年多, 有更好的释磷和吸磷能力, 属于已经适应高温的 PAO, $\Delta P / \Delta \text{HAc}$ 的值达到了 0.628, 即每吸收 1 mol 的乙酸, 释放 0.628 mol 的磷, 这也就进一步表明了 PAO 为试验污泥中的优势菌群, 且具有更强的基质竞争能力.

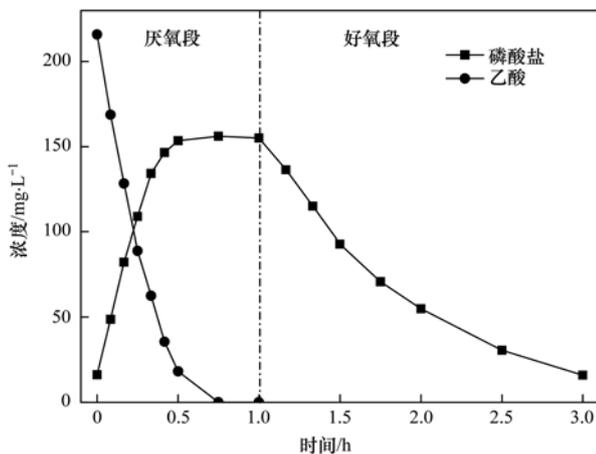


图2 试验污泥 30°C 时厌氧释磷、乙酸吸收及好氧吸磷的变化

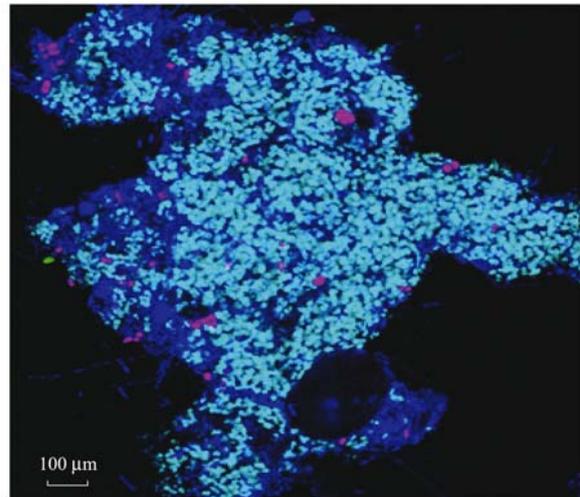
Fig. 2 Changes of anaerobic phosphorus release, acetate uptake and aerobic phosphorus uptake at 30°C

2.2 试验污泥中聚磷菌及其份额

图3为利用目前普遍采用的 PAOMIX 探针^[20]对试验活性污泥的 FISH 检测结果. 从中可见, 试验污泥中的聚磷菌属于 *Accumulibacter*. He 等^[21]采用宏基因分析对 12 个具有除磷功能的城市污水处理厂污泥种群结构进行测定, 结果表明 *Accumulibacter* 下存在 5 个亚种, 分别为 clade I、II A、II B、II C 和 II D, 不同的污水处理厂由于水质和运行条件不同存在着不同种属的 PAO. Ong 等^[14]研究了高温条件下 ($28 \sim 32^\circ\text{C}$) 以乙酸为基质的 EBPR 系统除磷效率, 结果表明, 即使温度高达 32°C , EBPR 仍获得了较好的处理效果, 利用 qPCR 技术分析得出, 污泥中聚磷菌的优势菌属为 *Accumulibacter* 的亚种 clade IIF. 而 Peterson 等^[22]发现 *Accumulibacter* 的不

同亚种具有不同的生态生理学特性. 由此说明本系统出现的适应高温的聚磷菌为 *Accumulibacter* 的亚种.

表1为试验活性污泥中 PAOs 和 GAOs 份额以及与 Ong 等^[14]结果的比较. 从中可见, 试验污泥中 PAO 份额高达 86%, 远高于 Ong 等培养的污泥, 说明本研究试验污泥在高温条件下具备更好的增殖和基质竞争能力. 以上结果说明, 试验污泥中的优势菌为 PAO, 这与活性试验结果相印证, 进一步证明了试验污泥具有较好的释磷和吸磷能力, 为温度试验奠定了良好的基础.



探针颜色: 绿色为 PAO; 红色为 GAO; 蓝色为 EUB

图3 试验活性污泥中微生物的群落结构

Fig. 3 Microbial community structure in activated sludge

表1 试验活性污泥与 Ong 等采用的污泥中 PAOs 和 GAOs 份额比较

Table 1 Comparison of PAOs and GAOs in the sludge used in the experiment of activated sludge and Ong

温度/ $^\circ\text{C}$	PAOs/%	GAOs/%	备注
28	33 ± 5	7 ± 2	[14]
32	12 ± 1	40 ± 4	[14]
30	86 ± 1	5 ± 2	本研究

2.3 温度对活性的影响

不同温度下污泥的厌氧释磷和好氧吸磷试验结果见图4, 相应的反应速率见表2. 从数据可知, 随着温度的升高, PAO_{HT} 的厌氧释磷和好氧吸磷速率逐渐增大, 当温度为 15 、 20 、 23 、 25 、 27 、 30°C 时, 厌氧段最大释磷速率分别为 76.50 、 95.86 、 150.69 、 150.78 、 171.74 、 $239.46 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 好氧段最大吸磷速率分别为 27.36 、 44.72 、 49.61 、 51.52 、 61.73 、 $79.90 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 现有研究表明^[23~25], 常温 PAO 在温度低于 20°C 时, 厌氧释磷和好氧吸磷速

率随温度的增加而增大,高于 20℃ 时,反应速率不再随温度的增加而变化. 而本研究中的高温聚磷菌 (PAO_{HT}) 在 15 ~ 30℃ 温度范围内,活性随温度的升高而增强.

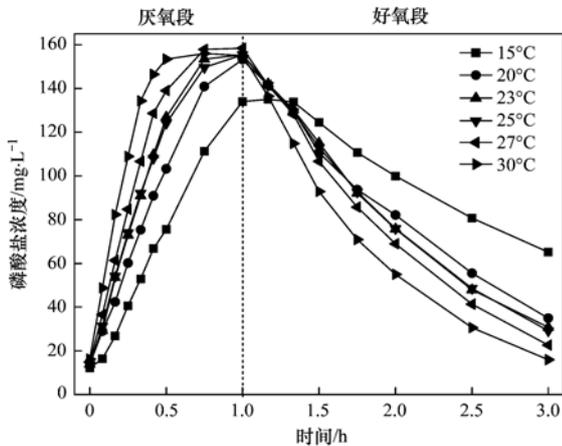


图 4 不同温度下试验污泥的厌氧释磷和好氧吸磷历时变化

Fig. 4 Changes of anaerobic phosphorus release and aerobic phosphorus uptake at different temperatures

表 2 不同温度下的释磷吸磷速率

Table 2 Rates of phosphorus release and uptake at different temperatures

序号	温度 /℃	厌氧释磷速率 /mg·(g·h) ⁻¹	好氧吸磷速率 /mg·(g·h) ⁻¹	乙酸摄取速率 /mg·(g·h) ⁻¹	ΔP/ΔHAc
1	15	76.50	27.36	176.70	0.502
2	20	95.86	44.72	233.14	0.549
3	23	150.69	49.61	241.59	0.577
4	25	150.78	51.52	247.22	0.596
5	27	171.74	61.73	313.37	0.615
6	30	239.46	79.90	357.47	0.628

2.4 温度系数的确定

温度对化学反应速率常数的影响常用简化的阿伦尼乌斯公式进行描述^[24],具体表达式为:

$$q_i = q_{i(30)} \cdot \theta_i^{T-30} \quad (1)$$

式中, q_i 为反应速率 ($i = 1, 2, 3$, 分别代表厌氧释磷、

在 15 ~ 30℃ 温度范围内, PAO_{HT} 对乙酸的最大吸收速率分别为 176.70、233.14、241.59、247.22、313.37、357.47 mg·(g·h)⁻¹, 乙酸的最大吸收速率随温度的升高而增大. 该试验结果与 Brdjanovic 等^[19,26] 关于温度对最大乙酸利用速率的影响所得出的结论有所不同, 其认为当温度超过 20℃ 时, PAO 和 GAO 对乙酸的最大吸收速率不再随温度变化, 其值为常数, 并且 Lopez-Vazquez 等^[24] 研究表明当温度为 30℃ 时, PAO 在厌氧状态下对乙酸的最大吸收速率为 0.20 mol·(mol·h)⁻¹, 而本研究的 PAO_{HT} 在厌氧状态下对乙酸的最大吸收速率为 0.357 g·(g·h)⁻¹, 其中 VSS (以 C₅H₇NO₂ 计) 的摩尔质量为 113 g·mol⁻¹, 对应的碳摩尔质量为 22.6 g·mol⁻¹, 同理可得乙酸的摩尔质量为 30 g·mol⁻¹, 则对应的以碳摩尔质量计量的最大乙酸利用速率为 0.269 mol·(mol·h)⁻¹, 结果高于 Lopez-Vazquez 等得出的数据, 这也就说明了本系统培养的 PAO_{HT} 对乙酸具有较高的吸收和竞争能力.

好氧吸磷和乙酸吸收速率); $q_{i(30)}$ 为 30℃ 时的反应速率; T 为水温 (℃); θ_i 为温度系数.

利用式 (1) 对 15 ~ 30℃ 温度范围内相应的反应速率进行拟合 (图 5 ~ 6), 得出 PAO_{HT} 的厌氧释磷速率、好氧吸磷速率以及乙酸吸收速率的温度系数分

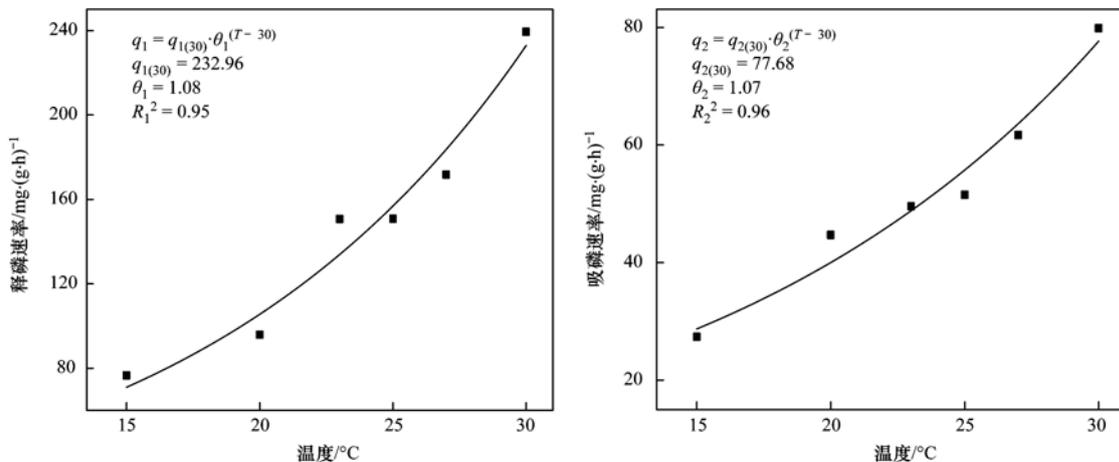


图 5 不同温度下试验污泥厌氧释磷速率和好氧吸磷速率

Fig. 5 Rates of anaerobic phosphorus release and aerobic phosphorus uptake at different temperatures

别为 1.08、1.07 和 1.05。Brdjanovic 等^[27] 利用 20℃ 下富集培养的除磷污泥, 对其在不同温度条件下的变化特性进行了拟合, 厌氧释磷和好氧吸磷速率的温度系数分别为 1.078 ($5^{\circ}\text{C} < T < 20^{\circ}\text{C}$) 和 1.057 ($5^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$)。Lopez-Vazquez 等^[28] 对 PAO 的代谢研究得出, 当温度小于 20℃ 时, 不同温度下 PAO 对乙酸吸收速率的温度系数为 1.095。而本研究在 15~30℃ 温度范围内, 无论是厌氧释磷、好氧吸磷还是乙酸的吸收速率, 其数值都随温度的升高而升高, 故而温度系数的确定都是以 30℃ 为基准进行拟合的, 与前人研究得出的结果相比较, 两者数值相差较小。

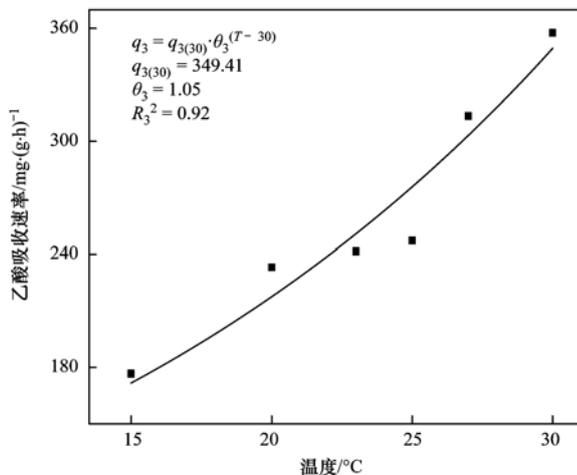


图 6 不同温度下试验污泥乙酸吸收速率

Fig. 6 Rates of acetate uptake in the experiment sludge at different temperatures

3 结论

(1) 反应器长期在 30℃ 高温条件下运行时, 磷的去除率高达 99% 以上, 此时污泥的释磷、吸磷速率分别为 $239.46 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $79.90 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, $\Delta\text{P}/\Delta\text{HAc}$ 为 0.628, PAO 占总细菌的比例高达 $86\% \pm 1\%$, 而 GAO 的比例仅占 5% 左右, 反应器运行高效稳定, 出现了适应高温的 PAO_{HT}。

(2) 在 15~30℃ 温度范围内, PAO_{HT} 的活性以其对基质的竞争能力随温度升高不断增强, 当温度为 30℃ 时, PAO_{HT} 的最大乙酸利用速率高于前人研究的数值, 其值约为 $0.269 \text{ mmol} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

(3) 利用简化的阿伦尼乌斯公式对 15~30℃ 温度范围内 PAO_{HT} 的反应速率进行拟合, 得出厌氧释磷速率、好氧吸磷速率和乙酸的吸收速率的温度系数分别为 1.08、1.07 和 1.05。

参考文献:

[1] Mino T, van Loosdrecht, M C M, Heijnen J J. Microbiology and

biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process[J]. Water Research, 1998, 32(11): 3193-3207.

- [2] Oehmen A, Saunders A M, Vives M T, et al. Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources [J]. Journal of Biotechnology, 2006, 123(1): 22-32.
- [3] Lopez-Vazquez C M, Song Y I, Hooijmans C M, et al. Temperature effects on the aerobic metabolism of glycogen-accumulating organisms[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 101(2): 295-306.
- [4] Seviour R J, Mino T, Onuki M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2003, 27(1): 99-127.
- [5] Gu A Z, Saunders A, Neethling J B, et al. Investigation of PAOs and GAOs and their effects on EBPR performance at full-scale wastewater treatment plants in U. S. [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2005, 2005(14): 1985-1998.
- [6] Gebremariam S Y, Beutel M W, Christian D, et al. Effects of glucose on the performance of enhanced biological phosphorus removal activated sludge enriched with acetate [J]. Bioresource Technology, 2012, 121: 19-24.
- [7] Carvalheira M, Oehmen A, Carvalho G, et al. The impact of aeration on the competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms [J]. Water Research, 2014, 66: 296-307.
- [8] Carvalheira M, Oehmen A, Carvalho G, et al. The effect of substrate competition on the metabolism of polyphosphate accumulating organisms (PAOs) [J]. Water Research, 2014, 64: 149-159.
- [9] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, et al. Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. Water Research, 2007, 41(11): 2271-2300.
- [10] Lopez-Vazquez C M, Hooijmans C M, Brdjanovic D, et al. Temperature effects on glycogen accumulating organisms [J]. Water Research, 2009, 43(11): 2852-2864.
- [11] Freitas F, Temudo M F, Carvalho G, et al. Robustness of sludge enriched with short SBR cycles for biological nutrient removal [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(6): 1969-1976.
- [12] Winkler M K H, Bassin J P, Kleerebezem R, et al. Selective sludge removal in a segregated aerobic granular biomass system as a strategy to control PAO-GAO competition at high temperature [J]. Water Research, 2011, 45(11): 3291-3299.
- [13] Ong Y H, Chua A S M, Lee B P, et al. Long-term performance evaluation of EBPR process in tropical climate; start-up, process stability, and the effect of operational pH and influent C: P ratio [J]. Water Science and Technology, 2013, 67(2): 340-346.
- [14] Ong Y H, Chua A S M, Fukushima T, et al. High-temperature EBPR process: the performance, analysis of PAOs and GAOs and fine-scale population study of Candidatus "Accumulibacter phosphatis" [J]. Water Research, 2014, 64: 102-112.
- [15] 樊珍妮. 温度对强化生物除磷(EBPR)系统处理性能及种群关系的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016. 1-54.
- Fan X N. The effect of temperature on the performance and microbial community structure of enhanced biological phosphorus removal (EBPR) system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. 1-54.

- [16] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic and environmental studies in microbiology [J]. *Journal of Bacteriology*, 1990, **172**(2): 762-770.
- [17] Daims H, Brühl A, Amman R, *et al.* The domain-specific probe EUB 338 is insufficient for the detection of all *bacteria*; development and evaluation of a more comprehensive probe set [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, **22**(3): 434-444.
- [18] Crocetti G R, Hugenholz P, Bond P L, *et al.* Identification of polyphosphate-accumulating organisms and design of 16S rRNA-directed probes for their detection and quantitation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(3): 1175-1182.
- [19] Brdjanovic D, Logemann S, van Loosdrecht M C M, *et al.* Influence of temperature on biological phosphorus removal; process and molecular ecological studies[J]. *Water Research*, 1998, **32**(4): 1035-1048.
- [20] López-Vázquez C M, Hooijmans C M, Brdjanovic D, *et al.* Factors affecting the microbial populations at full-scale enhanced biological phosphorus removal (EBPR) wastewater treatment plants in The Netherlands[J]. *Water Research*, 2008, **42**(10-11): 2349-2360.
- [21] He S M, Gall L D, McMahon K D. “Candidatus *Accumulibacter*” population structure in enhanced biological phosphorus removal sludges as revealed by polyphosphate kinase genes[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(18): 5865-5874.
- [22] Peterson S B, Warnecke F, Madejska J, *et al.* Environmental distribution and population biology of *Candidatus Accumulibacter*, a primary agent of biological phosphorus removal [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(10): 2692-2703.
- [23] 姜涛. 温度与碳源对生物除磷系统中 PAO 和 GAO 的影响及除磷效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. 1-124.
- Jiang T. Effects of temperature and carbon source on phosphate accumulating and glycogen accumulating organisms and phosphorus removal efficiency in biological phosphorus removal process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. 1-124.
- [24] Lopez-Vazquez C M, Oehmen A, Hooijmans C M, *et al.* Modeling the PAO-GAO competition; effects of carbon source, pH and temperature[J]. *Water Research*, 2009, **43**(2): 450-462.
- [25] Whang L M, Park J K. Competition between polyphosphate-and glycogen-accumulating organisms in biological phosphorus removal systems-effect of temperature[J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(1-2): 191-194.
- [26] Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M, Hooijmans C M, *et al.* Minimal aerobic sludge retention time in biological phosphorus removal systems[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1998, **60**(3): 326-332.
- [27] Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M, Hooijmans C M, *et al.* Temperature effects on physiology of biological phosphorus removal[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, **123**(2): 144-153.
- [28] Lopez-Vazquez C M, Song Y I, Hooijmans C M, *et al.* Short-term temperature effects on the anaerobic metabolism of glycogen accumulating organisms[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, **97**(3): 483-495.

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, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-ni, <i>et al.</i> (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-ru, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> 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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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)