

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文烨, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	《环境科学》征稿简则(5039)
信息(4782, 4979, 5056)	

污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响

李冬¹, 刘博¹, 王文琪¹, 曹美忠¹, 李帅², 张杰^{1,2}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 以低 C/N 比生活污水为研究对象, 接种成熟除磷颗粒污泥, 探究泥龄对中低温下 (14 ~ 21℃) 除磷亚硝化颗粒污泥的影响。结果表明, 常温下 (20℃ ± 1℃), 泥龄为 30 d, 曝气量为 5 L·(h·L)⁻¹ 可实现除磷颗粒污泥中 AOB 的富集, NAR 达到 90% 以上。当温度降低到 15℃, 泥龄为 40 d 时除磷性能恶化, 颗粒结构变松散并伴有丝状菌生成。相对充足的氧气使亚硝化失稳, NAR 下降至 22.4%。NOB 不具备迅速适应环境变化的能力, 采取 12 d 厌氧饥饿加排泥的策略, 削弱了 NOB 的相对活性, 迅速恢复了除磷亚硝化性能。批次实验显示温度从 20℃ 下降到 15℃, 聚磷菌仍能保持较高的氧利用率, 但 AOB 的 SOUR 下降了 18%, 此时是温度而不是溶解氧浓度制约了氨氧化能力。控制泥龄为 30 d, 同时降低曝气量为 4 L·(h·L)⁻¹, 实现了低温下 (15℃ ± 1℃) 除磷亚硝化颗粒污泥系统的稳定运行。

关键词: 除磷亚硝化颗粒污泥; 污泥龄; 亚硝化积累率; 比耗氧速率; 溶解氧

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-5048-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201905089

Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System

LI Dong¹, LIU Bo¹, WANG Wen-qi¹, CAO Mei-zhong¹, LI Shuai², ZHANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In this paper, the low C/N ratio of domestic sewage was studied, and mature phosphorus removal granules were inoculated to investigate the effect of solid retention time (SRT) on phosphorus removal and nitrification granular sludge at middle-low temperatures (14-21℃). The test showed that at room temperature (20℃ ± 1℃), the enrichment of AOB in the phosphorus removal granules can be achieved with 30 d SRT and 5 L·(h·L)⁻¹ aeration intensity, while the NAR was over 90%. When the temperature was lowered to 15℃ and the SRT was 40 d, the phosphorus removal performance deteriorated, and the granule structure became loose with the formation of filamentous bacteria. Relatively sufficient oxygen destabilized nitrosation and the NAR dropped by 22.4%. NOB does not have the ability to quickly adapt to environmental changes. The 12 d anaerobic starvation and sludge removal strategy weakened the relative activity of NOB and quickly restored the performance of phosphorus removal and nitrosation. Batch experiments showed that the temperature dropped from 20℃ to 15℃, and the PAOs still maintained a high oxygen utilization rate, but the SOUR of the AOB decreased by 18%. At this time, the temperature, not the dissolved oxygen concentration, restricted the ammonia oxidation ability. Controlling the sludge age to 30 d, while reducing the aeration intensity to 4 L·(h·L)⁻¹, achieved stable operation of phosphorus removal and nitrosation at a low temperature (15℃ ± 1℃).

Key words: phosphorus removal and nitrosation granules; solid retention time (SRT); nitrite accumulation rate; specific oxygen uptake rate; dissolved oxygen

短程硝化可以节约 25% 的能源与 40% 的碳源, 是低碳氮比废水脱氮除磷工艺中重要的工艺。目前短程硝化工艺已经成功应用于污泥消化液、垃圾渗滤液等高氨氮污水的处理, 但是低氨氮生活污水短程硝化的运行尚存在问题, 如何取得稳定的亚硝酸盐积累仍是实验中的难点。强化生物除磷工艺与亚硝化工艺具有一定协同性, A/O 不断交替地运行方式以及较长的厌氧段不利于 NOB 的增殖, 所以在同一个反应器内实现除磷与亚硝化是技术可行的, 值得研究与探索。已有研究大多针对絮状污泥^[1,2], 如果将颗粒污泥工艺与除磷亚硝化结合起来, 则系统具有微生物含量高, 抗冲击能力强, 避

免二次释磷的优点, 对处理实际污水有极大意义。

泥龄是除磷亚硝化颗粒污泥系统的重要参数, 既要通过排出富磷污泥达到除磷目的, 又要考虑到硝化菌较长的世代时间。泥龄的选择还和温度密切相关, 温度会影响系统的处理性能, 合适的泥龄既可保证功能菌群的数量, 最大限度地维持系统生物活性, 也降低了污泥处置费用。绝大部分微生物适宜生长的温度区间为 20 ~ 30℃,

收稿日期: 2019-05-13; 修订日期: 2019-06-13

基金项目: 北京市青年拔尖团队项目 (2014000026833TD02)

作者简介: 李冬 (1976 ~), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

但在寒冷地区或冬季温度明显低于此水平, 故确保系统在低温下稳定运行尤为重要. 根据秋冬季室温变化特点, 本文探究了不同泥龄 (20、30 和 40 d) 对中低温度下 (14 ~ 21℃) 除磷亚硝化颗粒污泥的影响. 运行过程中对系统处理性能、颗粒物理性能变化、典型周期等进行测量和分析, 以期工程实际应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方法

本实验采用有机玻璃制成的 SBR 反应器, 有效容积为 6 L, 换水比为 2/3. 每天运行 4 个周期, 每周进水 5 min, 厌氧 2 h, 好氧 3 h, 沉淀 3 min, 排水 5 min, 其余时间闲置, 每周期末排出一定体积的泥水混合物. 阶段Ⅲ第 98 ~ 109 d 不进水, 颗粒经历 12 d 的厌氧饥饿期, 期间每 8 h 曝气 10 min,

去除厌氧环境产生的 H_2S 气体. 根据泥龄的不同划分实验阶段, 具体参数见表 1.

表 1 反应器运行工况

Table 1 Operational conditions of the reactor				
阶段	时间/d	$G_s^{1)}$ /L·(h·L) ⁻¹	SRT/d	t/℃
I	1 ~ 43	5	30	20 ± 1
II	44 ~ 87	5	40	15 ± 1
	88 ~ 97	4		
III	98 ~ 109	0	不排泥 20	15 ± 1
	110 ~ 140	4		
IV	141 ~ 189	4	30	15 ± 1

1) G_s 表示单位时间单位体积内的曝气量

1.2 接种污泥与实验用水

接种污泥是以去除 P 和 COD 为主的除磷颗粒污泥, 污泥浓度为 3 300 mg·L⁻¹, 实验用水取自北京某大学家属区化粪池. 具体水质指标如表 2.

表 2 生活污水水质情况

Table 2 Water quality of domestic sewage						
项目	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹	pH
范围	150 ~ 300	40 ~ 60	< 1	0 ~ 2	4 ~ 8	7.0 ~ 8.0

1.3 分析项目与检测方法

NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法; NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO₃⁻-N 采用麝香草酚紫外分光光度法; COD 和 TP 的测定采用 5B-3B 型 COD 多参数快速测定仪, 每两天对上述参数进行测量; pH、DO 和温度的测定均采用 WTW-pH/Oxi 340i 便携式多参数测定仪监测. MLSS、MLVSS、SV30 和 SVI 等指标均采用国家规定的标准方法^[3]. 颗粒的粒径采用 Mastersize 2000 激光粒度仪测定.

1.4 衰减实验速率测定

AOB 和 NOB 的活性用比氨氧化速率 (SAOR) 和比亚硝酸盐氧化速率 (SNOR) 表示, PAOs 活性则依靠衰减过程中最大比释磷速率 (SPRR) 来确定. 测试方法如下: 从洗去杂质的反应器中取 1.5 L 泥水混合物, 平均分成 3 份, 用来测量 SAOR、SNOR 和 SPRR. 测 SAOR、SNOR 时, 分别加入 NH₄Cl、NaNO₂, 使 NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 初始浓度为 50 mg·L⁻¹, 调节 pH 为 7.5 ± 0.1, DO 控制在 4.0 mg·L⁻¹. 测 SPRR 时加入丙酸钠, 使 COD 浓度为 200 mg·L⁻¹, 保持厌氧环境, 每 30 min 取样, 直至浓度不再变化. 采用 Origin 9.0 对 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 P 浓度随时间的变化进行拟合, 拟合直线的斜率分别为 SAOR、SNOR 和 SPRR. 衰减速率的计算公式如下:

$$k = -\ln\left(\frac{R_t}{R_0}\right) / t_d$$

式中, R_0 和 R_t 分别表示饥饿衰减前后的 SAOR、SNOR 和 SPRR; t_d 表示饥饿时间 (d).

2 结果与讨论

2.1 阶段 I 和 II 除磷亚硝化颗粒污染物处理性能

2.1.1 COD 及 TP 去除性能

图 1 为阶段 I 和阶段 II 运行过程中系统对 COD 和 P 的去除情况. 阶段 I 接种的除磷颗粒污泥, 具有良好的去除 COD 和 P 的性能, 为了加快 AOB 的富集, 控制泥龄为 30 d. 延长的污泥龄并未对 P 的去除产生不利影响, 出水 P 浓度一直小于 0.50 mg·L⁻¹, 去除率保持在 90% 以上, 除磷效果达到稳定. 厌氧段聚磷菌吸收 VFA 储存在体内, 绝大部分 COD 在厌氧段被吸收, 以保证后续好氧段 PHAs 氧化分解释放的能量充分摄取水中的 P. 阶段 I 接近 90% 的 COD 在厌氧段去除, 出水浓度小于 50 mg·L⁻¹.

阶段 II 随着温度的降低, 调整泥龄为 40 d, 第 65 d 之后出水 P 浓度呈升高趋势, 阶段末去除率跌至 65.68%. Brdjanovic 等^[4] 发现过高的 SRT 导致了内源呼吸, 氧转移的需求量降低, 过量曝气降低了生物除磷的效率. 40d 的长泥龄下, 污泥处于老化状态, 部分聚磷菌吸附值达到饱和, 对磷的吸附能力有限, 聚磷菌活性下降影响了吸磷与释磷能力. 聚磷作为重要的能量转换器, 释磷量降低影响

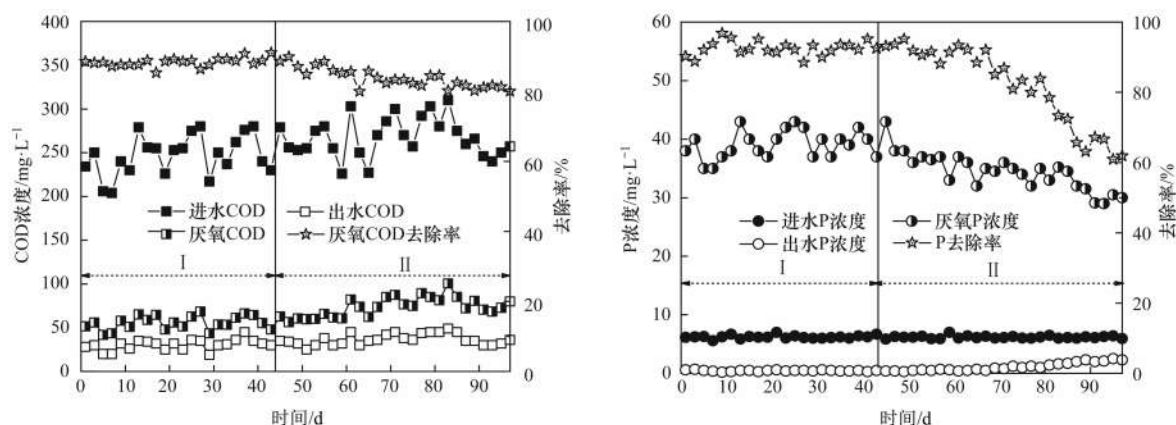


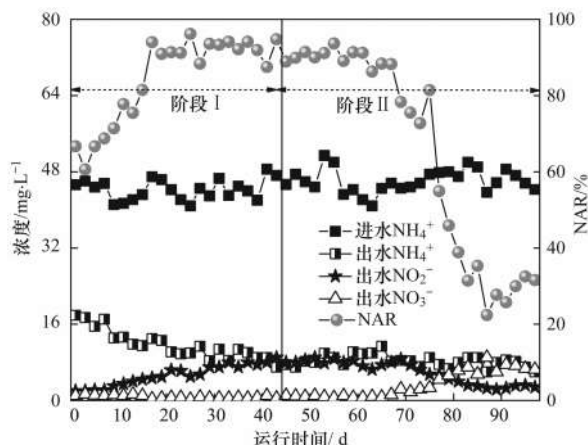
图1 阶段I和II运行过程中COD和TP变化

Fig. 1 Variation of COD and TP concentration during the process of phase I and phase II

了对VFA的摄取,厌氧段COD的去除率下降至81.72%。好氧段过多的COD引起了其他异养菌的增殖,故出水COD浓度基本不变。由此40d的泥龄并未影响COD的去除,但严重破坏了除磷性能。

2.1.2 氮元素转化变化

图2为阶段I和阶段II氮元素变化情况。运行初期出水氨氮浓度很高,随着时间延长,出水氨氮降低至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。本阶段末亚硝酸盐积累量升高至 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与此同时NAR从40%逐渐增加至90%,NOB的活性被充分抑制。分析原因如下: A/O除磷运行模式下,厌氧段相对较长,AOB的“饱食饥饿”特性使其更从容地面对环境变化;颗粒污泥特殊的结构存在氧气的传质限制,并且AOB对溶解氧的亲合力要大于NOB,故AOB占有优先利用溶解氧的外层,NOB紧靠AOB生长在次外层或外层^[5]。NOB的生长需要利用AOB代谢产生的亚硝酸盐,亚硝酸盐的氧化过程滞后于氨氧化过程。上述条件下,NOB增殖速度小于AOB,在合适的泥龄下,通过不断排泥将NOB淘洗出去,保持亚硝化的稳定。

图2 阶段I、II运行过程中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 及 NO_3^--N 变化Fig. 2 Variation in NH_4^+-N , NO_2^--N , and NO_3^--N concentration during the process of phase I and phase II

阶段II增加泥龄为40d,运行至第69d时亚硝化被破坏,NAR大幅下降,到第87d时只有22.4%。稳定的亚硝化作用和良好的除磷性能密不可分,40d的泥龄限制了聚磷菌的活性,从而使聚磷菌竞争溶解氧的能力下降,为硝化作用提供了相对充足的氧气。此外,本阶段平均温度为 15°C ,硝化作用容易受温度影响,AOB活性下降,对氧的利用率降低导致氧气的穿透深度增加。有研究显示^[6],低温下缩小了AOB与NOB生长速率间的差异。以上诸多因素破坏了AOB在硝化菌群中的优势地位,导致NOB增殖。第88d将曝气量降低,NAR略微上升,但是依然以全程硝化为主。

2.1.3 典型周期分析

分别在阶段I第43d和阶段II第87d测量一个周期内COD、TP、三氮、pH及DO变化情况,进行对比分析,明晰处理效果恶化的原因,为后续恢复系统正常运行采取有效的措施。

周期实验结果如图3所示,两个阶段绝大部分COD在厌氧段去除,COD浓度在前60min迅速下降,出水浓度约为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可见泥龄对COD去除无影响。第43d和87d的释磷量分别为 $40.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $36.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但是好氧吸磷有显著不同。第43d前60min内平均吸磷速率为 $33.53 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$,明显高于后者的 $21.05 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$,并且后者吸磷不彻底,周期末仍有 $2.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的P残留。徐伟峰等^[7]的研究发现随着SRT的延长,聚磷菌消耗单位PHAs的吸磷量与合成单位PHAs所需释磷量的比值呈下降趋势。即在40d的长泥龄下,PHA的生成量与消耗量不平衡,不足以让释放的P被全部吸收,可认为发生了无效释磷。

第43d,曝气90min内 NO_2^--N 及 NO_3^--N 含量未出现明显增加,随着反应进行,亚硝酸积累量增加至 $8.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Pijuan等^[8]的研究表明,FNA的

存在会对聚磷菌的生长及代谢活动产生抑制作用, 如影响氧利用率, PHA 氧化和糖原生成. 当 FNA 浓度达到 $5 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 50% 的吸磷性能被抑制. FNA 浓度随亚硝酸盐积累量和 pH 变化而变化, 从第 190 min 起 FNA 含量从 $9.4 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐增加至 $6.2 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由图 3 可得吸磷作用

优先于硝化过程, P 浓度在 210 min 时仅剩 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且吸磷能力不会完全丧失, 故亚硝酸盐积累对吸磷影响不大. 第 87 d, 由于吸磷活性的下降, 氨氧化作用增强, 氨氧化率高于第 43 d, 这和增长的污泥浓度有关. 但是从 180 min 起开始有硝酸盐生成, 周期末达到 $9.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

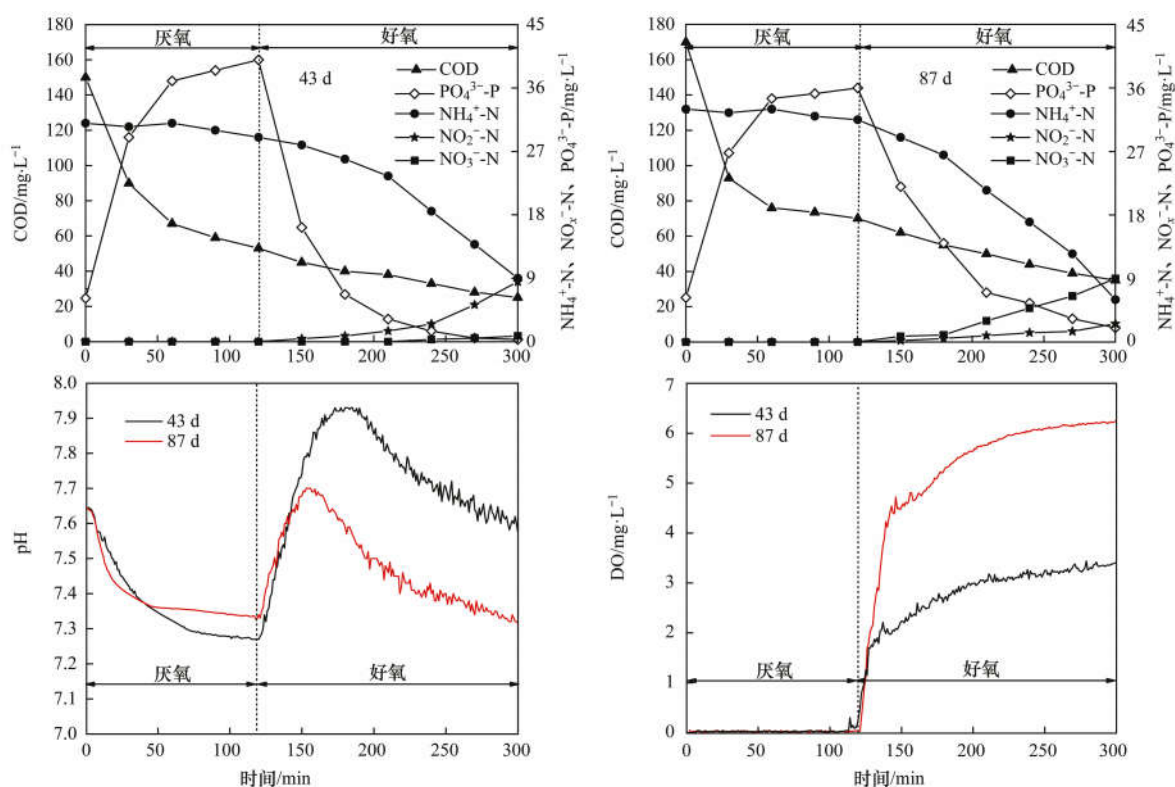


图 3 典型周期内各参数变化

Fig. 3 Change diagram of each parameter in a typical period

pH 变化趋势和生化反应有良好的相关性, 厌氧段释磷 pH 下降, 前 60 min 内释磷基本结束. 好氧段初期在氧化有机物和吸磷的共同作用下 pH 上升, 随后增强的硝化过程消耗碱度致使 pH 下降, 所以 pH 曲线上的拐点可以定性表征硝化反应的强度. 第 43 d 时, 在 120 ~ 170 min 内 pH 从 7.27 上升至 7.90, 随后 16 min 内 pH 值基本不变, 此时溶解氧浓度低, 颗粒存在缺氧区, 这可能是吸磷与短程硝化反硝化共同作用的结果, 直到第 187 min 时 pH 开始下降, 最后值为 7.58. pH 会引起细胞膜电荷变化, 导致微生物细胞吸收营养物质能力改变. 不同微生物有各自的适宜生长范围, AOB 为 7 ~ 8.2, NOB 为 6.5 ~ 7.5. 由此, 吸磷过程中的 pH 变化范围也有利于亚硝化的稳定^[9]. 第 87 d, 由于较弱的吸磷过程, pH 曲线上拐点出现的时间提前, 硝化反应进程加快. 长泥龄下聚磷菌的耗氧速率下降, DO 浓度在 150 min 时就达到 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 周期结束时上升至 $6.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 相比第 43 d, 过高的溶解氧浓度使生成的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 迅速转化成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 整

个过程中无明显 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累.

2.2 除磷亚硝化颗粒污泥活性的恢复及低温下稳定运行

低铵浓度废水中 NOB 的抑制主要依赖于 AOB 和 NOB 之间的动力学竞争, 通常通过高游离氨、限氧策略 ($\text{DO} < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、曝气时间实时控制实现亚硝化过程. 本实验中, 根据生活污水的水质和水量变化特征, pH 在 7 ~ 8 之间, 若长期投加药剂势必会增加运行成本. 其次, 限氧策略下低 DO 会抑制 AOB 活性, 使反应时间延长. 曝气时间实时控制是根据 pH 曲线“氨谷”以及 DO 突跃的特征点的出现, 判断氨氧化结束, 从而及时停止曝气. 但是从周期实验中可以看出氨氧化并不完全, pH 曲线仍是下降趋势. 并且亚硝酸盐氧化过程迅速完成, 不会明显滞后于氨氧化, 无法根据特征点将两个过程分开. 由此当 NOB 活性较强时, 可以采取更为严苛的措施. 有研究发现污泥经历饥饿后在恢复期会出现 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累^[10,11], 这为实现亚硝化提供一种新的思路. 大多数实验均是在絮状污泥系统中开展的,

关于饥饿对颗粒污泥中亚硝化性能恢复的研究甚少. 本实验探究了经过 12 d 的厌氧饥饿后, 系统处理性能变化情况.

2.2.1 饥饿期除磷亚硝化颗粒污泥活性变化

分别在第 0、3、6、9 和 12 d 测量 SAOR、SNOR 和 SPRR, 得到 AOB、NOB 和 PAOs 的活性变化情况如图 4 所示. 饥饿前, SNOR (以 N/VSS 计, 下同) 为 $2.95 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, NOB 的活性高于 AOB. 随后的饥饿期使两者的活性均有下降, 但变化快慢有所不同, NOB 的活性衰减速率较快. 饥饿期结束时, SAOR 约为 SNOR 的 1.06 倍, 可见饥饿对 NOB 活性的抑制随着时间延长而加大. 但饥饿时间过长, 会对除磷性能造成不利影响并且恢复期过长, 故在饥饿 12 d 后恢复进水. 利用 Origin 拟合曲线, 得到 AOB 和 NOB 的衰减速率分别为 0.030 d^{-1} 和 0.042 d^{-1} . AOB 具有许多酶学和分子机制, 使得它能够在饥饿状态下降低维持自身的能量需求, 进入休眠期, 导致较低的衰减速率. 并且期间 AOB 不会终止底物转化酶的活动, 一旦底物重新供给时就能迅速恢复活性^[12]. 所以饥饿后出现 NO_2^- -N 积累的原因不仅是衰减速率的差异, 还归功于 AOB 快速适应环境变化的能力. 衰减系数与原水水质条件、菌群丰度、饥饿环境等密切相关, 已有报道指出 AOB 的衰减范围在厌氧条件下为 $0.006 \sim 0.114$, NOB 为 $0.007 \sim 0.159$ ^[13~15]. 本实验所得数值偏低, 这和本系统的泥龄与温度有关. 温度越低, 活性下降越缓慢; 泥龄越长, 菌群会降低生长率, 适应饥饿能力越强^[16].

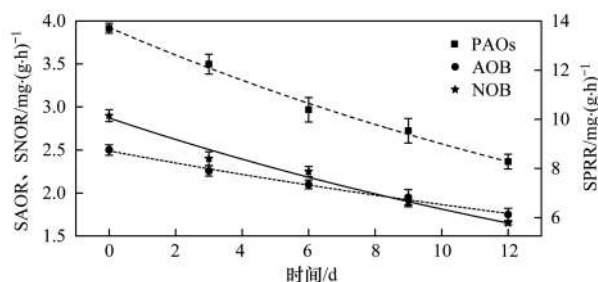


图 4 厌氧饥饿期间 PAOs、AOB 和 NOB 活性变化

Fig. 4 Variations in the activity of PAOs, AOB, and NOB during the anaerobic starvation periods

饥饿前 PAOs 的 SPRR (以 P/VSS 计) 为 $13.70 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 饥饿期结束后活性下降至 $8.18 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 拟合曲线得到 PAOs 衰减速率为 0.044 d^{-1} . 此数值偏低, 可能由于较长泥龄与菌群系统不同所致, BNR 系统中聚磷菌衰减率小于纯富集聚磷菌的系统^[17,18]. Lopez 等^[19]的研究表明, PAOs 可在厌氧饥饿下消耗聚磷和糖原用于维持自身能量生成, 与好氧饥饿相比, 厌氧主要是利用一

小部分代谢底物产生维持生命所需的能量, 发生的生物衰减量极低.

2.2.2 除磷亚硝化颗粒污染物处理性能变化

图 5 为阶段Ⅲ和阶段Ⅳ运行过程中 COD、TP 和三氮浓度变化情况. 阶段Ⅲ刚开始恢复进水时, COD 出水浓度几乎等于厌氧末浓度, 可见饥饿期使存储基质能力差的异养菌的活性大幅下降, 4 d 的恢复后出水 COD 浓度小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 第 110 d, 经历厌氧饥饿期后 PAOs 释磷浓度达到了 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但是吸磷能力未完全恢复, 3 d 后出水 P 浓度趋于稳定. 聚磷菌^[20]是一种嗜冷菌, 在较低温下对 VFA 仍有较强的摄取能力. 此阶段平均温度为 15°C , 不会对除磷产生不利影响, 出水 P 浓度一直小于 0.5

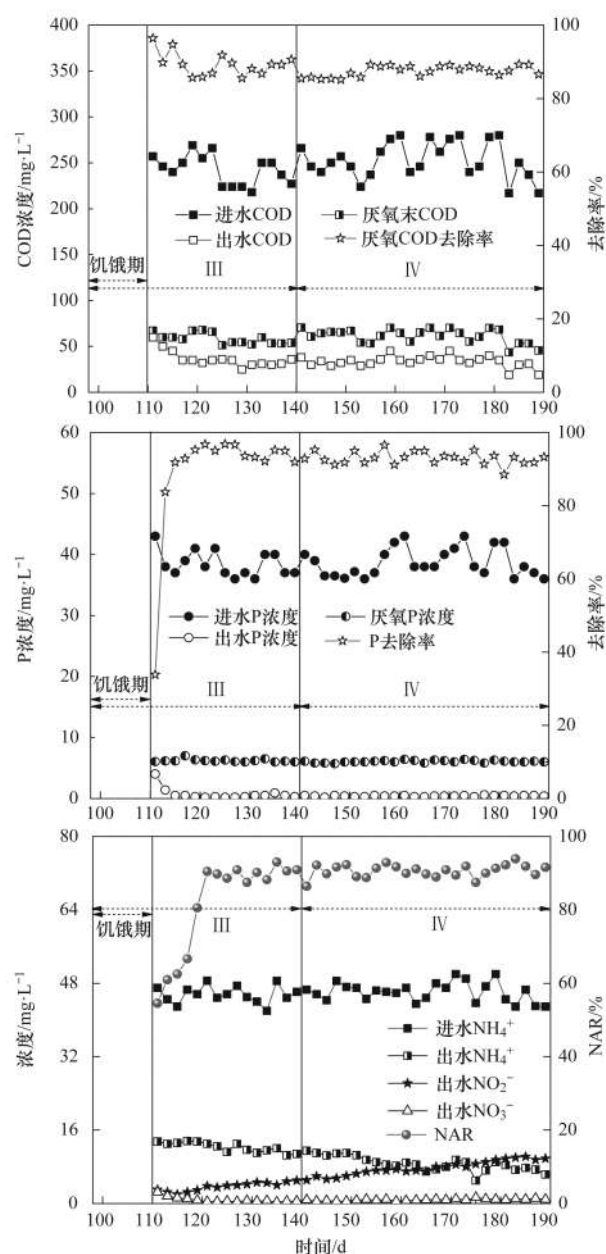


图 5 阶段Ⅲ、阶段Ⅳ中 COD、TP 及氮素变化

Fig. 5 Variation in COD, TP, and nitrogen elements concentration during the process III and IV

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

恢复进水后缩短泥龄为 20 d, 9 d 后 NAR 便恢复至 80%. 短期饥饿对 AOB 活性影响不大^[12,21], 甚至比异养菌能更快地恢复活性, 因为异养生物饥饿后再恢复时需改变其酶模式以使得能够使用初始底物, 基因调控与表达需要时间. 饥饿期削弱了 NOB 相对 AOB 的活性, 且 AOB 有更优的环境适应能力及更快的生长速率, 加上排泥使 NOB 彻底地从系统中淘洗出去, 继而确立了 AOB 的种群优势. 第 139 d, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 达到 $10.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即此温度下维持 20 d 的泥龄不利于氨氮的去除. 遂将泥龄增加至 30 d, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 逐渐降低, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量增加. Guo 等^[22]发现随着温度从 25°C 降至 15°C , 比氨氧化速率降低了 1.5 倍, 氧利用率降低. 为防止过度曝气破坏亚硝化, 根据周期实验结果(图 3)此阶段控制曝气量为 $4 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$, 保证周期末溶解氧浓度为不超过 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 有研究表明由于 PAOs 可以在有氧和缺氧条件下生长^[23], 因此 PAOs 将存在于整个颗粒中, 且它们的性能将受到氧渗透深度变化的不显著影响, 故即使曝气量降低后, 除磷性能良好.

2.3 不同阶段 PAOs 和 AOB 的比耗氧速率 (SOUR) 变化

SOUR(以 O_2/VSS 计)代表微生物的分解代谢活性, 分别在阶段 I、II 和 IV 运行后期中取出适量污泥测量 PAOs 及 AOB 的比耗氧速率, 消除污泥内源呼吸对测量的影响^[24,25], 结果如图 6 所示. 阶段 I 中, 聚磷菌耗氧速率为 $35.87 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 过长的泥龄使吸磷过程的 SOUR 下降至 $26.89 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 当温度从 20°C 下降到 15°C 时, 根据计算出 PAOs 和 AOB 温度依赖系数 θ 分别为 1.023 和 1.071, 即 AOB 受温度影响更大. 聚磷菌在 15°C 时仍有着较高的氧利用率, 以此维持着吸磷与亚硝化间的平衡, 这也是阶段 IV 与阶段 I 相比, 温度降低亚硝化却仍然稳定的重要原因. 阶段 II 与阶段 IV 比, 虽然曝气量大, 但 AOB 的 SOUR 无明显增加, 故低温下适当降低曝气的方法是正确的, 此时溶解氧不是限制硝化反应速率的重要因素, 而对硝化类型产生了影响.

2.4 除磷亚硝化颗粒物理特性变化

2.4.1 外观形态及粒径变化

图 7 为不同阶段颗粒形态的变化. 阶段 I 颗粒呈棕黄色, 具有规则的形状和清晰的边界. 阶段 II 颗粒颜色变浅, 出现少部分破碎颗粒, 在显微镜下可观察到颗粒边缘部分被残蚀, 并伴有丝状菌产生. 这是由于长泥龄降低了聚磷菌的耗氧速率, 过

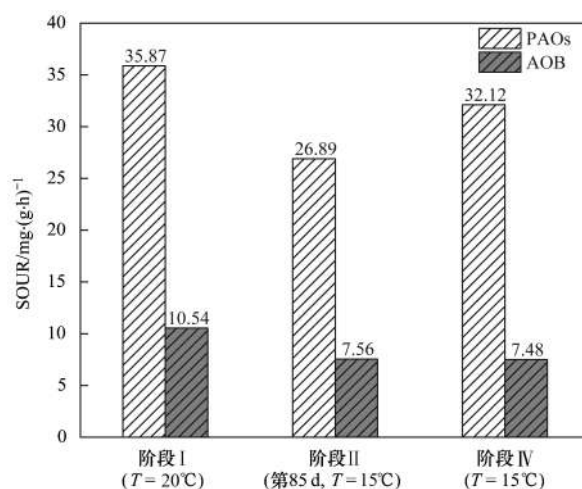


图 6 不同阶段 PAOs 和 AOB 的比耗氧速率变化

Fig. 6 Variations in the specific oxygen uptake rate of PAOs and AOB during different phases

度曝气使自身储存的 PHA 产生对吸磷没有积极作用的消耗浪费, 吸磷不充分继而造成后续释磷动力不足. 长时间的恶性循环加之搅拌、曝气等水力剪切力作用下, 颗粒致密结构受到影响. 饥饿期使颗粒上缺乏营养的丝状菌脱落, 阶段 IV 观察到颗粒结构有所恢复, 可能受到温度影响, 颗粒形状没有阶段 I 规则.

在 40、97(饥饿前)、110(饥饿结束后)和 175 d 测量颗粒粒径, 得到粒径分布结果如图 8 所示 ($d_{0.1}$ 、 $d_{0.5}$ 和 $d_{0.9}$ 分别表示粒径累计分布数达到 10%、50% 和 90% 时所对应的粒径). 第 40 d, 系统平均粒径为 $1092 \mu\text{m}$, 90% 以上的颗粒粒径大于 $613 \mu\text{m}$, 几乎没有小于 $420 \mu\text{m}$ 的颗粒. 第 97 d 颗粒平均粒径降低至 $935 \mu\text{m}$, 长泥龄下, 颗粒过度消耗自身物质维持生命活动, 导致颗粒的结构和功能恶化. 而大颗粒更容易受到影响, 粒径大于 $1000 \mu\text{m}$ 颗粒所占的体积分数明显降低. 经历饥饿期后, 部分破碎的颗粒使小粒径所占百分比增加, d_{10} 降至 $210 \mu\text{m}$. 粒径 $500 \sim 1000 \mu\text{m}$ 颗粒的体积分数下降幅度不大, 因为颗粒污泥含有大量 EPS, EPS 在厌氧饥饿期间维持颗粒的结构完整性方面起着至关重要的作用^[26]. 泥龄恢复为 30 d 后, 加大排泥, 破碎颗粒被淘洗, 颗粒粒径有所增长, 175 d 时 90% 的颗粒粒径大于 $533 \mu\text{m}$, 平均达到 $1057 \mu\text{m}$.

2.4.2 生物量及沉淀性能变化

图 9 是不同阶段 MLSS、MLVSS、 f 及 SVI 的变化. 阶段 I 污泥浓度从 $3300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐增长至 $4150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 沉淀性能良好, SVI 在 $35 \sim 37 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 随着泥龄增加到 40 d, MLSS 继续保持增长, 但是 MLVSS 增势明显缓慢. 泥龄过长, 污泥处于老化状态, 无机质含量高, 生物活性降低, 第 97

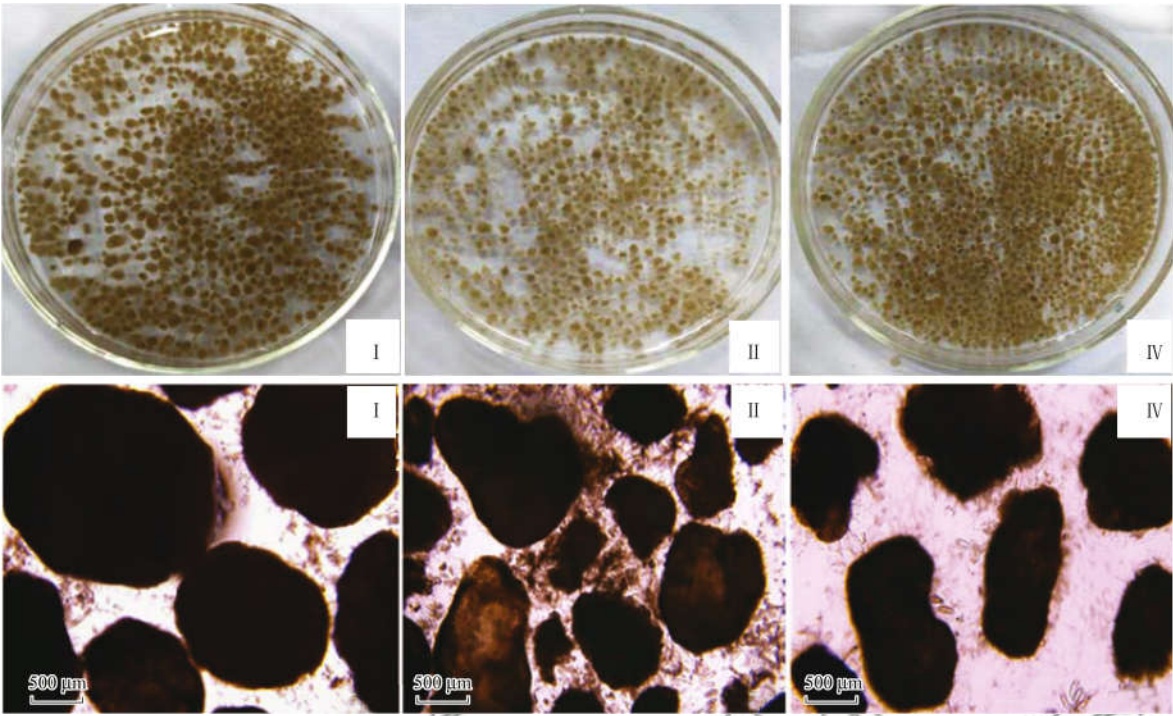


图7 不同阶段颗粒污泥的显微镜照片和数码照片
Fig. 7 Optical microscopy images and digital images of granules during different phases

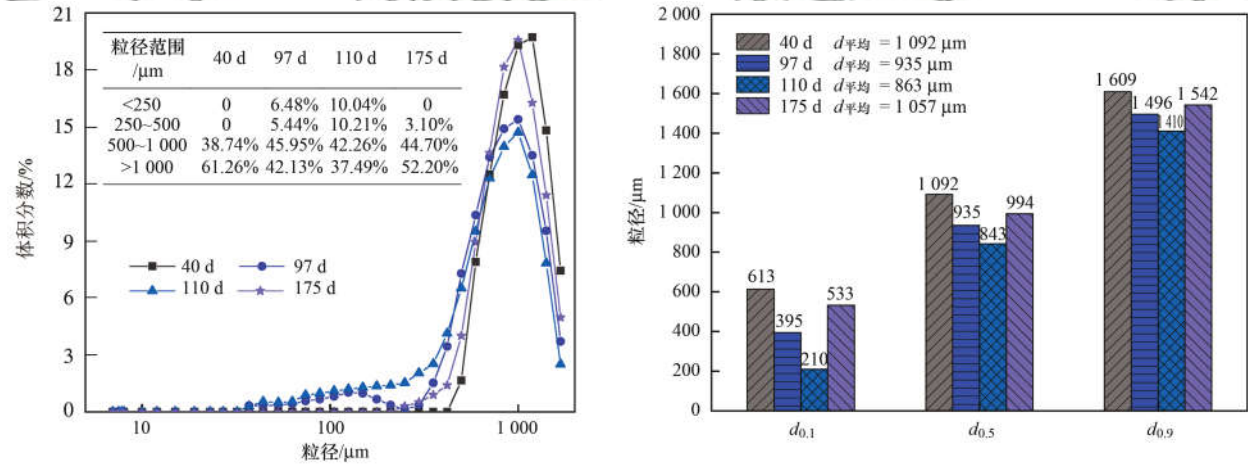


图8 第40、97、110和175 d 粒径分布情况
Fig. 8 Particle size distribution of 40, 97, 110, and 175 d

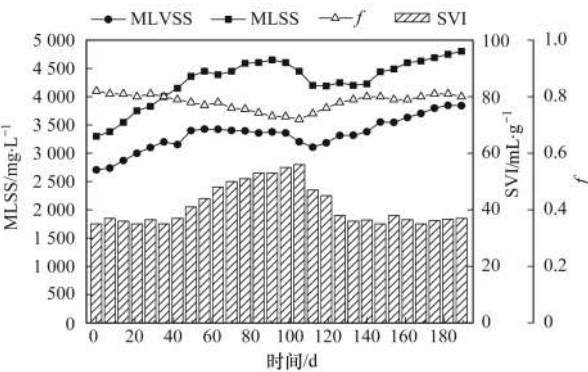


图9 运行过程中SVI、MLSS、MLVSS及f的变化
Fig. 9 Variation in SVI, MLSS, MLVSS, and f during the process of operation

d, f 值从阶段Ⅱ初的0.8降至0.73. 丝状菌的增殖影响了颗粒的沉降性能, SVI 值增加至 $55 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 饥饿期有污泥减量的效果, 加上沉降性能不好的颗粒被排出, 第112 d, MLSS 降低至 $4\,236 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但 SVI 值在逐渐恢复. 20 d 的污泥龄下污泥浓度趋于稳定, 延长泥龄至 30 d 时, 污泥浓度有所增长, 受到基质和温度限制, 增长速度明显缓于阶段Ⅰ. 低温使 AOB 活性下降, 和阶段Ⅰ相比, 维持同样的氨氮处理效果, 则需要更高的污泥量.

3 结论

(1) 以实际生活污水为研究对象, 控制泥龄为

30 d, 常温下完成了除磷颗粒污泥系统中 AOB 的富集。吸磷过程优先于亚硝化, 亚硝酸盐积累量 $< 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 吸磷性能未受影响。15℃ 时延长泥龄至 40 d, 氨转化和 COD 去除稳定, 但除磷受到影响, 颗粒致密结构被破坏, 过度曝气导致 NOB 大量增殖。故通过提高泥龄的方式弥补低温带来系统处理性能损失的同时, 亦应兼顾长泥龄对特定微生物活性的影响, 从而确定合适的温度-泥龄组合。

(2) 12d 饥饿胁迫削弱了 NOB 相对于 AOB 的活性, 联合排泥 9 d 后可建立 AOB 在硝化菌群的优势地位。AOB 应对饥饿特殊的生理机制和聚磷菌较低的衰减量, 使它们在基质重新供给时, 能较快地恢复活性, 适时的饥饿对颗粒结构影响不大。

(3) 低温下 AOB 活性变化比聚磷菌更敏感, 20 d 的泥龄不利于氨氮去除。溶解氧此时不是限制硝化反应速率的显著因素, 而是决定了硝化类型, 故低温下应适当降低曝气量。控制泥龄为 30 d, 协同调控曝气量 $4 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$, 以较高的生物质浓度保证了处理效果, 实现了低温下除磷亚硝化颗粒污泥系统的稳定运行。

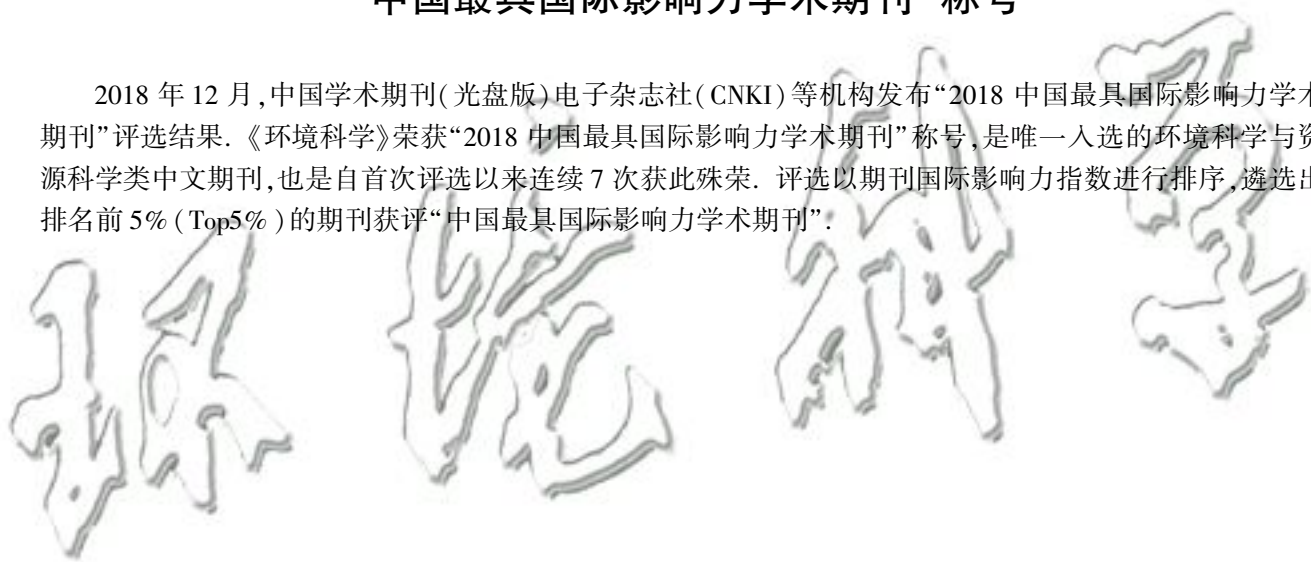
参考文献:

- [1] 马斌, 张树军, 王俊敏, 等. A/O 工艺实现城市污水半亚硝化与生物除磷[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, **44**(2): 70-74.
- [2] 周元正, 李冬, 苏东霞, 等. 改良 SBR 工艺实现生活污水除磷与半亚硝化[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(5): 1351-1358.
- [3] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 100-124.
- [4] 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.
- [5] 杨洋, 左剑恶, 孙寓姣, 等. 好氧亚硝化颗粒污泥特性的研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2710-2715.
- [6] 傅金祥, 王颖, 孙铁珩, 等. 低温条件下 SBR 系统中短程硝化研究[J]. 水处理技术, 2008, **34**(7): 29-32.
- [7] 徐伟锋, 顾国维, 陈银广. SRT 对 A²/O 工艺脱氮除磷的影响[J]. 水处理技术, 2007, **33**(9): 68-71.
- [8] Pijuan M, Ye L, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on the aerobic metabolism of poly-phosphate accumulating organisms[J]. Water Research, 2010, **44**(20): 6063-6072.
- [9] Zhang J H, Zhang Q, Li X Y, et al. 2017. Rapid start-up of partial nitrification and simultaneously phosphorus removal (PNSPR) granular sludge reactor treating low-strength domestic sewage[J]. Bioresource Technology, 2017, **243**: 660-666.
- [10] Morgenroth E, Obermayer A, Arnold E, et al. Effect of long-term idle periods on the performance of sequencing batch reactors[J]. Water Science & Technology, 2000, **41**(1): 105-113.
- [11] Elawwad A, Sandner H, Kappelmeyer U, et al. Long-term starvation and subsequent recovery of nitrifiers in aerated submerged fixed-bed biofilm reactors[J]. Environmental Technology, 2013, **34**(8): 945-959.
- [12] Bollmann A, Schmidt I, Saunders A M, et al. Influence of starvation on potential ammonia-oxidizing activity and *amoA* mRNA levels of *Nitrosospira briensis* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(3): 1276-1282.
- [13] Pijuan M, Werner U, Yuan Z G. Effect of long term anaerobic and intermittent anaerobic/aerobic starvation on aerobic granules[J]. Water Research, 2009, **43**(14): 3622-3632.
- [14] Geets J, Boon N, Verstraete W. Strategies of aerobic ammonia-oxidizing bacteria for coping with nutrient and oxygen fluctuations[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2006, **58**(1): 1-13.
- [15] 陈俊, 陆一新, 张建强, 等. 饥饿对人工快速渗滤系统硝化性能的影响[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(12): 4703-4712.
- [16] Salem S, Moussa M S, Van Loosdrecht M C M. Determination of the decay rate of nitrifying bacteria[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, **94**(2): 252-262.
- [17] 苗志加, 薛桂松, 翁冬晨, 等. 不同温度及厌氧/好氧运行条件对聚磷菌衰减特性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, **35**(2): 113-117, 123.
- [18] 王啟林, 郝晓地, 曹亚莉. 聚磷菌富集实验及其内源特征探究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(12): 2405-2413.
- [19] Lopez C, Pons M N, Morgenroth E. Endogenous processes during long-term starvation in activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal[J]. Water Research, 2006, **40**(8): 1519-1530.
- [20] Helmer C, Kunst S. Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in EBPR plants[J]. Water Science & Technology, 1998, **37**(4-5): 531-539.
- [21] Liu W L, Yang Q, Ma B, et al. Rapid achievement of nitrification using aerobic starvation[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(7): 4001-4008.
- [22] Guo J H, Peng Y Z, Huang H J, et al. Short-and long-term effects of temperature on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater[J]. Journal of Hazardous

- Materials, 2010, **179**(1-3): 471-479.
- [23] De Kreuk M K, Pronk M, Van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures [J]. Water Research, 2005, **39**(18): 4476-4484.
- [24] 郝晓地, 朱景义, 曹秀芹, 等. 硝化细菌 AOB 与 NOB 衰减速率实验测定[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(12): 2499-2502. Hao X D, Zhu J Y, Cao X Q, *et al.* Experimental determination of the decay rate of nitrifying bacteria: AOB and NOB[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(12): 2499-2502.
- [25] 肖剑波, 卢培利, 曾善文, 等. 基于氧利用速率表征好氧吸磷过程特性[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(10): 5479-5484. Xiao J B, Lu P L, Zeng S W, *et al.* Characteristic of aerobic phosphorus uptake process based on OUR[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(10): 5479-5484.
- [26] He Q L, Zhang W, Zhang S L, *et al.* Performance and microbial population dynamics during stable operation and reactivation after extended idle conditions in an aerobic granular sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2017, **238**: 116-121.

《环境科学》连续 7 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2018 年 12 月,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2018 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2018 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 7 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)