

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.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晚茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性

杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞*, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷

(青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071)

摘要: 为实现低 C/N 城市污水与含硝酸盐废水的同步处理, 采用 SBR 接种活性污泥, 通过合理控制厌氧/缺氧/低氧时间和溶解氧(DO)浓度, 实现了反硝化除磷耦合同步硝化内源反硝化(DPR-SNED)系统的启动, 并对启动过程中系统的脱氮除磷特性进行了研究. 结果表明采用厌氧/低氧的运行方式, 控制厌氧时间为 3 h, 好氧段 DO 浓度为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 60 d 可实现同步硝化内源反硝化除磷(SNEDPR)系统的启动, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统氮磷去除率维持在 90% 以上, COD 的去除率维持在 80% 以上, 系统 SNED 率和 COD_{ins} 率分别维持在 70% 和 95% 左右; 随后改变运行方式, 采用厌氧/缺氧/低氧的方式运行, 缺氧段前进含硝酸盐废水, 45 d 可实现 DPR-SNED 系统的启动, 缺氧末 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度 $< 1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统磷、COD 去除率均维持在 90% 以上, 氮去除率维持在 88% 以上, 系统 SNED 率和 COD_{ins} 率分别维持在 62% 和 90% 左右. DPR-SNED 系统的成功启动后, 厌氧段聚糖菌和聚磷菌对城市污水有限碳源的充分利用和强化储存, 可为后续缺氧段及好氧段的脱氮除磷提供充足的内碳源. 此外, DPR-SNED 系统缺氧段内源短程反硝化的进行保障了系统在低 C/N(4)条件下的高效脱氮.

关键词: 反硝化除磷(DPR); 同步硝化内源反硝化(SNED); 聚磷菌(PAOs); 城市污水; 硝酸盐废水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0791-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201808090

Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage

DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, WANG Xiao-xia*, CHEN Guang-hui, YUAN Meng-fei, ZHEN Jian-yuan, ZHANG Fan, LÜ Ting-ting

(School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to realize the simultaneous treatment of low C/N municipal wastewater and high nitrate wastewater, a sequencing batch reactor (SBR), inoculated with activated sludge, was used to initiate the denitrifying phosphorus removal coupled with simultaneous nitrification and endogenous denitrification (DPR-SNED). The anaerobic/anoxic/hypoxic durations and dissolved oxygen (DO) concentration were appropriately controlled, and the nitrogen and phosphorus removal characteristics were examined. The experimental results demonstrated that, in the anaerobic/hypoxia operation mode, with an anaerobic duration of 3 h and DO concentration of $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the simultaneous nitrification of phosphorus removal (SNEDPR) system successfully began in 60 d. The effluent $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration was below $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the nutrient and COD removal efficiencies were stably maintained above 90% and 80%, respectively, and the SNED efficiency and COD_{ins} efficiency reached 70% and 95%, respectively. When the operation mode was anaerobic/anoxic/hypoxic and nitrate-containing sewage was added at the beginning of the anoxic stage, DPR-SNED was achieved with the effluent $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, nutrient and COD removal efficiencies above 88% and 90%, respectively, and SNED efficiency and COD_{ins} efficiency maintained at 62% and 90%, respectively. After the successful initiation of DPR-SNED, enhanced intracellular carbons storage was achieved by phosphorus- and glycogen-accumulating organisms using the limited carbons in raw municipal wastewater to provide sufficient carbon sources for subsequent nutrient removal. In addition, the endogenous partial denitrification ensured the efficient nitrogen removal performance of the DPR-SNED system at low C/N conditions (average 4).

Key words: denitrifying phosphorus removal (DPR); simultaneous nitrification endogenous denitrification (SNED); phosphorous accumulating organisms (PAOs); municipal wastewater; nitrate-contained sewage

随着人类生活水平的提高、人口的急剧增长, 以及工业的迅猛发展, 污水的排放量日趋增多, 水环境污染日益严重, 氮和磷的污染导致水体富营养化等诸多问题^[1]. 污水的脱氮除磷成为国内外专家学者研究的热点. 但是, 传统生物脱氮除磷工艺在实际应用过程中, 经常会出现脱氮和除磷效果不能同时达到最佳的现象, 并且存在能耗大、耗氧大、

工艺复杂、脱氮除磷效率低、运行费用高等问题^[2]. 厌氧氨氧化是一种新型的生物脱氮技术, 与

收稿日期: 2018-08-11; 修订日期: 2018-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778304, 51708311); 山东省自然科学基金项目(ZR2017BEE002); 中国博士后科学基金项目(2017M612209)

作者简介: 杜世明(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: d_shiming@163.com

* 通信作者, E-mail: elainewangxx@163.com

传统硝化-反硝化相比具有能耗低,不需外加碳源等优点^[3].但是,厌氧氨氧化反应每消耗 1 mol NH_4^+-N 和 1.32 mol NO_2^--N 会产生 0.26 mol NO_3^--N .使得总氮(TN)去除率难以进一步提高^[4],且目前厌氧氨氧化反应过程中产生的硝态氮很少进行下一步处理^[2].

反硝化除磷工艺可以节省碳源和曝气量,同时实现污泥减量.反硝化除磷(DPR)是在缺氧条件下,聚磷菌利用细胞内的内碳源作为电子供体,以硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体进行同步脱氮除磷^[5~8].由于胞内聚羟基烷酸(PHA)既作为反硝化的碳源,又作为反硝化聚磷菌过量吸磷的能源,可以达到“一碳两用”^[9,10].同步硝化内源反硝化(SNED)技术,是在低氧条件下,氨氧化菌和反硝化聚糖菌利用细胞内的PHA,实现硝化与内源反硝化的同时进行,从而实现污水的生物脱氮^[11].将反硝化除磷与同步硝化内源反硝化耦合(DPR-SNED),用于污水的脱氮除磷,一方面不仅能实现对低C/N城市污水的脱氮除磷;另一方面还能够对含硝酸盐废水(厌氧氨氧化出水)进行脱氮.工艺简单且氧耗、能耗较低.好氧段SNED的产生可降低出水 NO_2^--N ($\text{NO}_2^--\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}$)的含量,在提高脱氮效率的同时,可减少 NO_2^--N 对下一反应周期释磷过程的影响^[12].在该耦合工艺中,通过强化城市污水中有限碳源向内碳源的转化与存储,为实现低C/N城市污水与含硝酸盐废水的同时处理提供可能.

目前,在一个序批式反应器(SBR)内采用DPR耦合SNED进行同步脱氮除磷的报道还较少,相关研究主要集中在对单独的DPR系统除磷特性的分析^[13~16],单独SND系统形成机制的探讨^[17,18];张森等^[19,20]分别采用 $\text{A}^2/\text{O} + \text{MBBR}$ 和 $\text{A}^2/\text{O}-\text{BCO}$ 双污泥反硝化除磷系统研究了其处理低C/N生活污水的氮磷去除性能,并得出有机物、TN和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 去除率分别可达88%、80%和96%;王晓霞等^[21]采用单级序批式反应器(SBR)研究了SNED耦合生物强化除磷(EBPR)系统的脱氮除磷特性,发现通过控制溶解氧(DO)浓度与好氧段时间可以增强SNED脱氮过程,实现系统的优化运行(TN去除率由75%提高至84%).此外,有关反硝化除磷(DPR)耦合同步硝化内源反硝化(SNED)同步处理低C/N城市污水与含硝酸盐废水(厌氧氨氧化出水)的启动及脱氮除磷特性的研究还未见报道.

本文以低C/N城市污水和含硝酸盐废水为处理对象,先后采用厌氧/低氧和厌氧/缺氧/低氧两

种运行方式考察了DPR-SNED系统的启动及其系统脱氮除磷特性.首先,在厌氧/低氧方式下,合理控制DO(0.5~1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)来实现同步硝化内源反硝化除磷(SNEDPR)系统的启动及其性能优化;随后在厌氧/缺氧/低氧方式下,在SNEDPR系统中通过调控缺氧时间来强化反硝化除磷效果,实现DPR-SNED系统的启动.最后对运行过程中系统脱氮除磷特性及其机制进行探究,以期为低C/N城市污水和含硝酸盐废水的同时处理提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行工序

实验用反应器为SBR(图1),采用有机玻璃制成,为敞口反应器,容积为13 L,有效容积8~11 L. SBR在厌氧/低氧(1~60 d)交替的条件下运行时,有效容积为8 L,每天运行4个周期,每周进进水(低C/N城市污水)3 L,排泥100 mL,具体运行参数见表1.

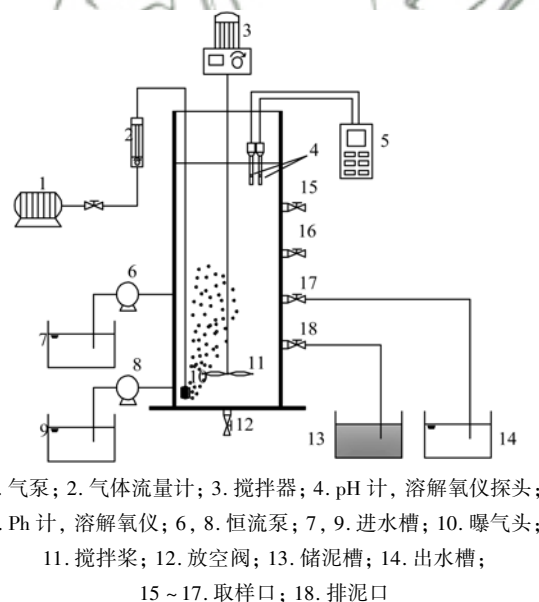


图1 SBR实验装置

Fig. 1 Experimental device diagram of the SBR

SBR在厌氧/缺氧/低氧(61~105 d)交替的条件下运行时,有效容积为11 L,每天运行2个周期,每周初始进水(低C/N城市污水)为3 L,厌氧结束,缺氧段前进水(含硝酸盐废水)3 L,排泥100 mL,具体运行参数见表1.此外,反应器整个运行过程中,污泥浓度维持在 $(2\,500 \pm 300) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.2 接种污泥和实验用水

本实验用泥取自青岛市某污水处理厂二沉池剩余污泥,具有良好的脱氮除磷能力,接种到SBR后MLSS为3 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,SV%为30%左右. SBR实验用低C/N城市污水取自青岛市某污水处理厂

粗格栅前进水口处,具体水质如表 2 所示. pH 值为 7.2~7.6, C/N 平均为 4, 温度维持在室温. 本实验用硝酸盐废水取自本实验室某厌氧 SBR 反应器

(厌氧氨氧化)出水,其具体水质: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均小于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 浓度小于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为 $28.09\sim31.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 各阶段运行参数统计

Table 1 Statistics of operation parameters in each phase

项目	阶段 1(1~18 d)	阶段 2(19~37 d)	阶段 3(38~60 d)	阶段 4(61~105 d)
有效容积/L	8	8	8	11
运行模式	厌氧/低氧	厌氧/低氧	厌氧/低氧	厌氧/缺氧/低氧
厌氧时间/min	180	180	180	180
缺氧时间/min	—	—	—	180
低氧时间/min	150	150	150	150
排水比	3:8	3:8	3:8	6:11
HRT/h	14.67	14.67	14.67	18.08
DO 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.5~1.0	0.5~1.0	0.5~1.0	0.5~1.0

表 2 各阶段进水水质统计

Table 2 Statistics of quality effluent wastewater in each phase

项目	阶段 1(1~18 d)	阶段 2(19~37 d)	阶段 3(38~60 d)	阶段 4(61~105 d)
$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	36.09~66.70	36.45~73.76	36.78~81.52	27.18~73.18
$\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	<1	<1	<1	<1
$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	<1	<1	<1	<1
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.07~6.90	2.91~8.19	2.07~8.77	1.66~9.62
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	161.20~287.02	210.30~333.20	184.70~312.67	228.26~355.90

1.3 检测方法

水样经中速滤纸(15~20 μm)过滤后,采用纳氏试剂分光光度法测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$; 采用 *N*-(1-萘基)乙二胺分光光度法测定 $\text{NO}_2^-\text{-N}$; 采用麝香草酚分光光度法测定 $\text{NO}_3^-\text{-N}$; 采用钼酸铵分光光度法测定 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ^[22]; 采用联华 5B-3A 型 COD 快速测定仪测定 COD; 采用重量法测定 MLSS^[23]; SV 是活性污泥在 100 mL 的量筒内静置 30 min 测得; SVI 值根据 SV 和 MLSS 进行计算得到^[24]; DO 和温度采用雷磁便携式溶解氧测定仪测定; pH 采用雷磁 PHS-3C 型 pH 计进行测定.

1.4 COD_{ins} 计算方法

COD_{ins} 是指在 DPR-SNED 系统厌氧段, 原水中的 COD 被聚磷菌和聚糖菌储存为内碳源的量, 其计算方法见式(1):

$$\text{COD}_{\text{ins}} = \Delta\text{COD} - (2.86\Delta\text{NO}_3^- + 1.71\Delta\text{NO}_2^-) \quad (1)$$

式中, ΔCOD 、 ΔNO_2^- 和 ΔNO_3^- 分别为系统厌氧段 COD、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 1.71 和 2.86 分别为单位质量浓度的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被异养菌反硝化时所消耗的 COD 质量浓度.

1.5 COD_{ins} 率计算方法

COD_{ins} 率是指在 DPR-SNED 系统的厌氧段, 原水中的 COD 被聚磷菌和聚糖菌储存为内碳源的百分比, 其计算方法见式(2)^[21]:

$$\text{COD}_{\text{ins}} = \left(1 - \frac{2.86\Delta\text{NO}_3^- + 1.71\Delta\text{NO}_2^-}{\Delta\text{COD}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, ΔCOD 、 ΔNO_2^- 和 ΔNO_3^- 分别为系统厌氧段 COD、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 1.71 和 2.86 分别为单位质量浓度的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被异养菌反硝化时所消耗的 COD 质量浓度.

1.6 SNED 率计算方法

SNED 率用以表示在 DPR-SNED 系统好氧段的氮损失情况^[12], 其计算方法见公式(3):

$$\text{SNED} = \left(1 - \frac{\Delta\text{NO}_3^- + \Delta\text{NO}_2^-}{\Delta\text{NH}_4^+}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, ΔNH_4^+ 、 ΔNO_2^- 和 ΔNO_3^- 分别为系统好氧段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 DPR-SNED 系统磷去除特性

在整个系统的运行过程中, 根据系统脱氮除磷性能及运行方式的变化情况, 将整个过程分为 4 个阶段, DPR-SNED 系统运行过程中进出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化情况见图 2.

由图 2 可知, 在阶段 1(1~18 d), 系统进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度平均值为 $4.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度平均值为 $2.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧释磷量和好氧吸磷

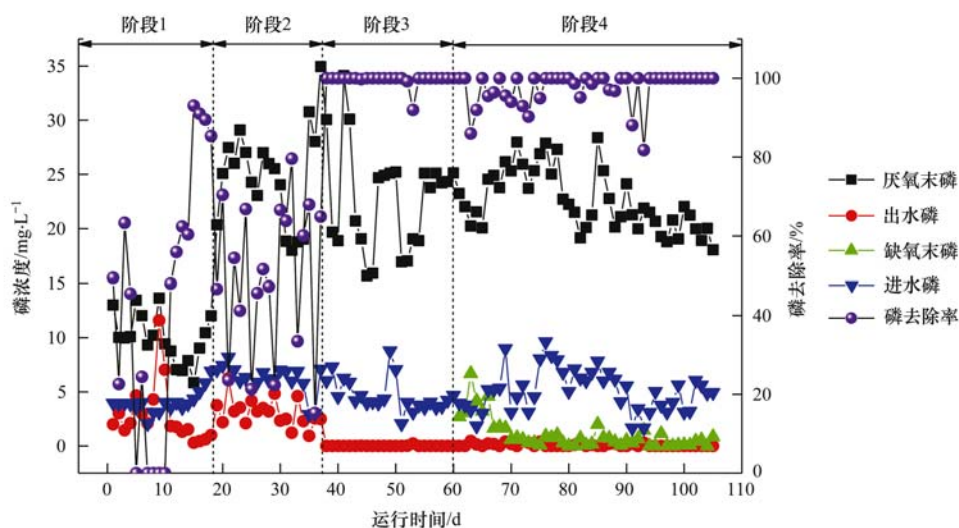


图2 DPR-SNED 系统运行过程中 PO_4^{3-} -P浓度变化情况

Fig. 2 Variation in the PO_4^{3-} -P concentration during the operational period of the DPR-SNED system

量分别平均仅为 $5.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P去除率平均约为 60.86%, 系统释磷和吸磷性能较差。

在阶段2(19 ~ 37 d), 随着运行时间的延长, 系统厌氧段释磷量由 $12.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐升高至 $30.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 好氧段吸磷量平均值为 $22.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与阶段1 相比得到显著提高, 系统出水 PO_4^{3-} -P浓度低于 $3.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P去除率最高达 79.6%。

在阶段3(38 ~ 60 d), 系统 PO_4^{3-} -P去除特性得以稳定维持。在该阶段, 进水 PO_4^{3-} -P浓度平均值为 $4.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 PO_4^{3-} -P浓度平均值为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且厌氧释磷量与好氧吸磷量均维持在较高水平, 其最高值分别为 $18.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $22.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。此阶段 PO_4^{3-} -P去除率高达 98.24%, 除磷

效果较好。

在阶段4(61 ~ 105 d), 为实现高硝酸盐废水的同时去除, 在系统厌氧段末期加入缺氧段。在该阶段, 系统进水 PO_4^{3-} -P浓度平均为 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。缺氧段末期 PO_4^{3-} -P浓度由第63 d的 $6.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐降低至第69 d的 $1.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并在第70 d以后稳定维持较低水平, 其平均值为 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在该阶段, 反硝化除磷效果逐渐增强, 出水 PO_4^{3-} -P浓度稳定维持在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 说明系统可实现低 C/N 城市污水和含硝酸盐废水的高效脱氮除磷。

2.2 DPR-SNED 系统的硝化特性

图3 为 DPR-SNED 系统运行过程中进出水 NH_4^+ -N浓度及去除率的变化情况。从中可知, 在阶段1(1 ~ 18 d)的第1 ~ 5 d, 出水 NH_4^+ -N浓度由 $9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐升高至 $22.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并在此后的6 ~

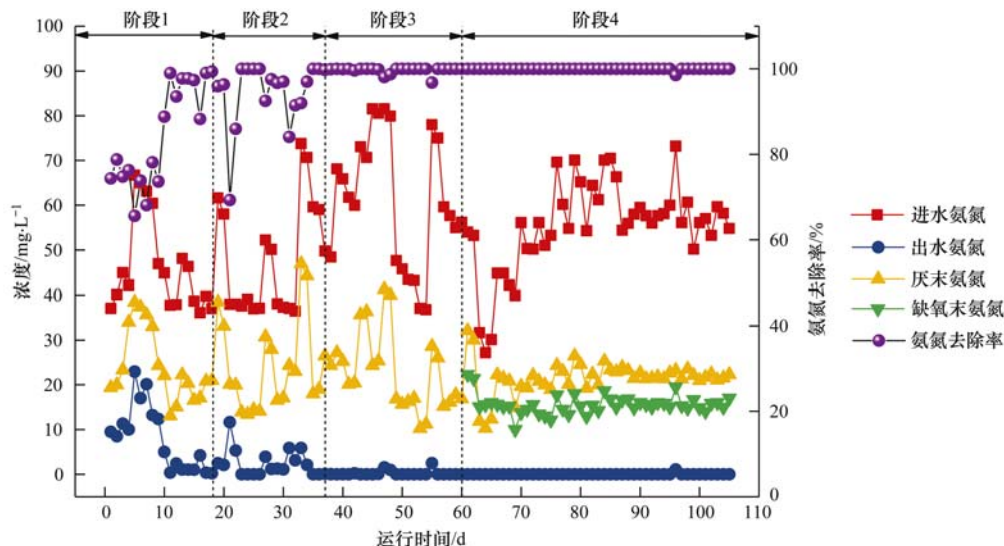


图3 DPR-SNED 系统运行过程中 NH_4^+ -N浓度变化情况

Fig. 3 Variation in the NH_4^+ -N concentration during the operational period of the DPR-SNED system

10 d 逐渐降低至 $5.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 该时间段(1 ~ 10 d)内, 系统硝化性能不佳, NH_4^+ -N 去除率平均值仅为 73.73%. 该阶段 11 ~ 18 d 出水 NH_4^+ -N 浓度稳定维持在较低水平, 硝化性能增强, NH_4^+ -N 去除率达到 90% 以上.

在阶段 2(19 ~ 37 d), 随着系统运行时间的延长硝化性能趋于稳定, 出水 NH_4^+ -N 浓度平均值为 $2.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 去除率平均为 94.76%, 最高可达 100%. 在阶段 3(38 ~ 60 d), 系统硝化性能得到进一步稳定. 系统 NH_4^+ -N 去除率稳定维持在 95% 以上, 出水 NH_4^+ -N 浓度的平均值仅为 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 系统出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度与阶段 1 相比均有所升高(分别由 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 见 2.4 节). 氨氮的去除部分因硝化作用转化为 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N, 部分因低氧段 SNED 的存在转化为氮气. 说明在该阶段系统已经具备良好的 NH_4^+ -N 去除性能.

在阶段 4(61 ~ 105 d), 当系统的运行方式改为厌氧/缺氧/低氧后, 系统仍然维持良好的硝化性能. 出水 NH_4^+ -N 浓度平均值为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 去除率基本保持在 100%. 说明改变运行方式(由阶段 1 ~ 3 的厌氧/低氧改为阶段 4 的厌氧/缺氧/低氧)对系统的硝化性能几乎不造成影响.

2.3 DPR-SNED 系统的 COD 去除特性

图 4 为 DPR-SNED 系统运行过程中 COD 浓度变化情况. 从中可知, 在阶段 1(1 ~ 18 d)系统进水 COD 浓度平均值为 $219.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧末和出水 COD 浓度平均值分别为 $73.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $60.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明系统内 COD 的去除主要是在厌氧段实现的. COD_{ins} 和 COD_{ins} 率的平均值分别为 $41.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 89.22%, 但 COD 去除率仅为 67.77%, COD 的去除能力较差, 分析其原因可能在于聚磷菌释磷量较低(约 $5.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 见 2.1 节), 导致对内碳源的积累量较少.

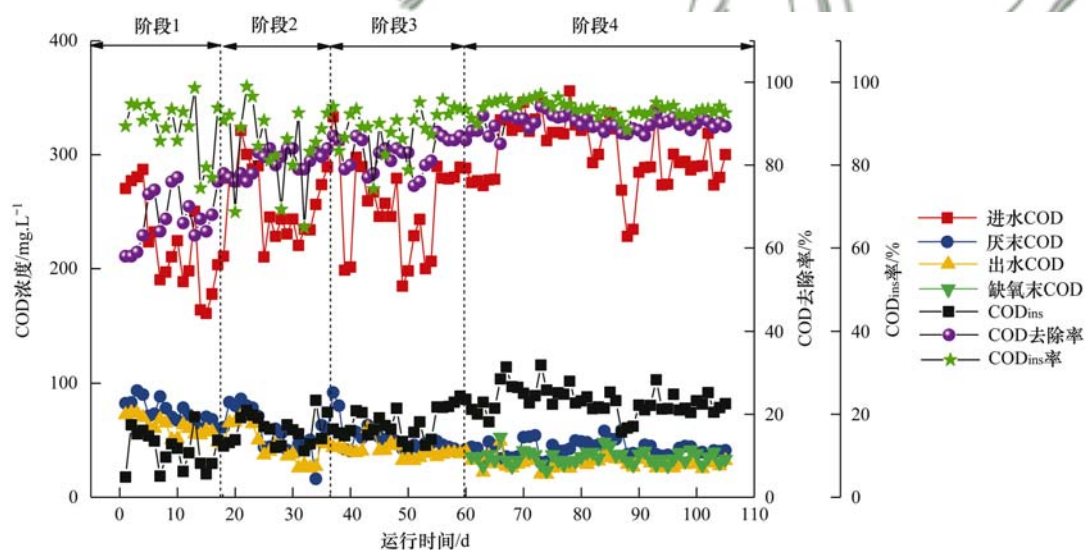


图 4 DPR-SNED 系统运行过程中 COD 浓度变化情况

Fig. 4 Variation in the COD concentration during the operational period of the DPR-SNED system

在阶段 2(19 ~ 37 d), 随着运行时间的延长, 系统 COD 去除性能提高. 厌氧末和出水 COD 浓度分别由第 19 d 的 $83.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $65.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至第 33 d 的 $50.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. COD 去除率由 77% 升高至 87%. 同时, 系统 COD_{ins} 由 $47.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $59.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此外, 在该阶段 COD_{ins} 率的平均值为 85.58%. 说明聚磷菌释磷量增加(见 2.1 节), 有利于增强系统厌氧段 COD 的去除及内碳源的积累能力.

在阶段 3(38 ~ 60 d), 系统 COD 去除性能得以稳定维持. 系统厌氧末和出水 COD 浓度分别平均为 $47.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $40.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 去除率的平均值为 82.51%, COD_{ins} 和 COD_{ins} 率分别平均为

$66.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 89.3%. 说明系统已经具备良好的 COD 去除及内碳源积累的特性.

在阶段 4(61 ~ 105 d), 当系统的运行方式改为厌氧/缺氧/低氧后, COD 的去除和内碳源的积累特性基本不受影响. 在该阶段, 进水 COD 浓度平均值为 $302.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧末、缺氧末和出水 COD 浓度平均值分别为 42.63 、 34.89 和 $29.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 本阶段 COD 去除率平均值为 90.03%, COD_{ins} 高达 $83.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD_{ins} 率高达 93.55%.

2.4 DPR-SNED 系统好氧段 SNED 率及脱氮特性

系统运行期间出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度、SNED 率及总氮去除率的变化情况见图 5. 从中可知, 在阶段 1(1 ~ 18 d), 系统出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N

浓度分别仅为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且好氧段 SNED 率高达 77.95%, 总氮去除率平均为 76%.

说明系统具有较好的脱氮性能, 且好氧段存在的 SNED 现象是系统实现高效脱氮的主要原因.

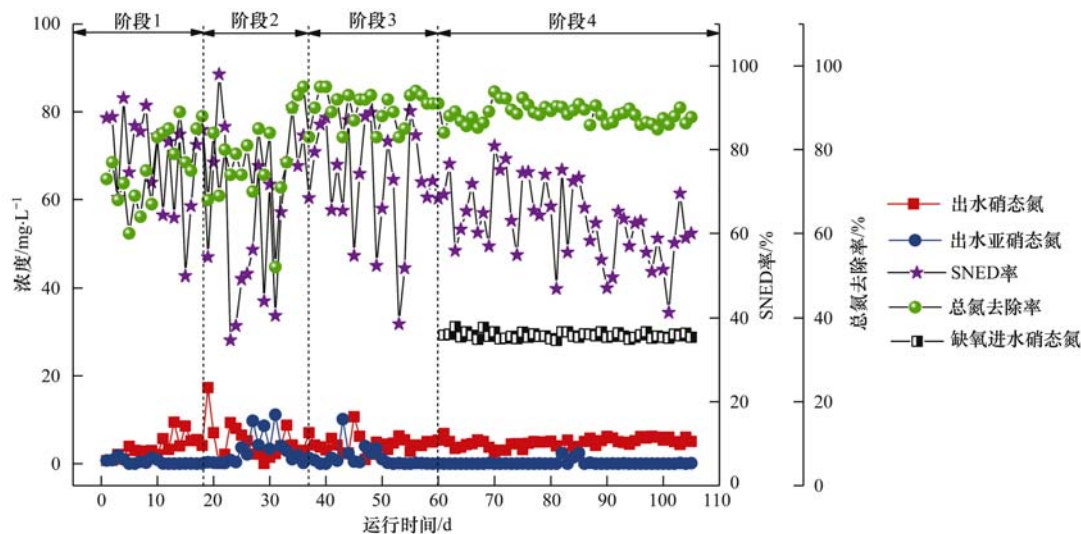


图5 DPR-SNED 系统运行过程中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度、SNED 率和总氮去除率变化情况

Fig. 5 Variation in the $\text{NO}_x\text{-N}$ concentration, the ratio of SNED and total nitrogen removal efficiency during the operational period of the DPR-SNED system

在阶段 2 (19 ~ 37 d), 随着运行时间的延长, 系统总氮去除率仍维持在 78% 左右, 出水 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度平均值分别为 $2.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SNED 率平均值为 65.04%. 出水 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度与阶段 1 相比稍有上升 (分别升高约 $2.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 分析其原因可能在于系统释磷量的增加 (见 2.1 节).

在阶段 3 (38 ~ 60 d), 系统脱氮性能与阶段 2 相比得以增强. 系统 SNED 率和总氮去除率分别由阶段 2 的 65.04% 和 78% 升高至 72.66% 和 90%; 同时 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度分别降低至 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 分析其原因可能是聚糖菌对内碳源积累量逐渐增多, 使得用于同步硝化内源反硝化的内碳源也有所增加.

在阶段 4 (61 ~ 105 d), 当系统的运行方式改为厌氧/缺氧/低氧后, 系统出水 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度平均值分别为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. SNED 率稍有波动, 但逐渐稳定维持在 62% 左右. 分析 SNED 率降低的原因可能是缺氧段反硝化除磷的进行, 使得好氧段同步硝化内源反硝化所能够利用的内碳源减少. 这也导致系统总氮去除率稍有下降, 但仍维持在 88.41% 左右.

2.5 DPR-SNED 系统实现低 C/N 城市污水和高硝酸盐废水高效脱氮除磷的机制

为进一步分析 DPR-SNED 系统同时实现低 C/N 城市污水和含硝酸盐废水脱氮除磷机制, 对反应器运行的第 93 d 的典型周期内基质浓度变化情况

进行分析 (见图 6). 初始 COD 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 131.23、21.66、0.1、1.33 和 $1.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

如图 6 所示, 在厌氧段 (0 ~ 180 min), COD 浓度逐渐降低, 并伴随着磷的释放和 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的去除. 在 0 ~ 30 min 内, $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度迅速降至 0. 在 0 ~ 80 min 内, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度呈线性增长趋势, 且伴随着 COD 浓度的迅速降低. 说明在 0 ~ 80 min 内主要发生 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的外源反硝化作用以及聚磷菌的释磷作用, 且厌氧段 COD 的去除主要是通过释磷作用实现的. 在 80 ~ 180 min 内, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度已基本保持不变, 但 COD 的浓度依然降低了 $22.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明 60 ~ 180 min 内, COD 的去除主要是通过聚糖菌的作用实现的. 因此, 在厌氧段, 异养反硝化菌、聚磷菌和聚糖菌均参与了 COD 的去除, 且延时厌氧 180 min, 可通过强化聚糖菌的作用来提高污水中外碳源的利用特性及其向内碳源的转化特性.

在缺氧段 (180 ~ 360 min), COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度基本不变. 在该阶段的 180 ~ 310 min 内, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度迅速降低, 同时伴随着 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度的升高和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的降低. 此外, 该过程的 $\Delta\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\Delta\text{NO}_3\text{-N}$ 约为 2.07 接近理论值 1.7 ~ 2.1^[25,26]. 证明反硝化除磷过程的进行, 且其主要利用 $\text{NO}_3\text{-N}$ 作为电子受体. 另外, 在 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的还原过程中, 还伴随着 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的生成, 说明系统存在内源短程反硝化过程. 在该阶段的 310 ~ 360 min 内, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度基

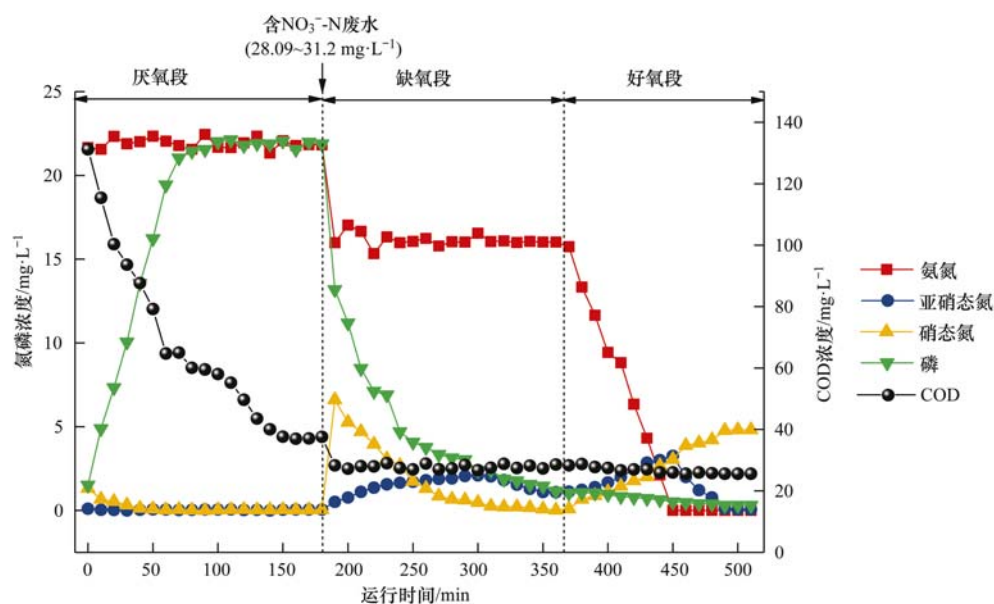


图6 DPR-SNED 系统运行第 93 d 时典型周期内基质浓度变化情况

Fig. 6 Substrate concentration variation in a typical operation cycle on day 93 in the DPR-SNED system

本不变, NO_2^- -N 和 PO_4^{3-} -P 浓度逐渐降低. 说明此时间段内, 反硝化聚磷菌主要利用 NO_2^- -N 为电子受体.

在好氧段(360 ~ 510 min), COD 浓度基本保持不变. PO_4^{3-} -P 浓度最终降低至 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 因硝化作用, NH_4^+ -N 浓度最终达到 0, NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 好氧段氮损失高达 $12.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在此浓度下, 微生物自身同化作用对 NH_4^+ -N 的去除贡献很少, 可忽略不计, 主要通过反硝化作用实现脱氮. 好氧段存在好氧吸磷、硝化和内源反硝化作用, 且氮和磷的去除是利用厌氧段存储的内碳源.

3 结论

(1) 通过延长厌氧时间(180 min), 并控制好氧段溶解氧 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可在 60 d 实现 SNEDPR 系统的启动. SNEDPR 系统启动成功后, 出水 PO_4^{3-} -P 浓度 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统 N、P 的去除率均维持在 90% 以上, COD 的去除率维持在 80% 以上, 系统 SNED 率和 COD_{ins} 率分别维持在 70% 和 95% 左右.

(2) 厌氧(180 min)/缺氧(180 min)/低氧(150 min) 运行的 DPR-SNED 系统启动成功后, 缺氧末 PO_4^{3-} -P 浓度 $< 1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 PO_4^{3-} -P 浓度 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统 P、COD 去除率均维持在 90% 以上, N 去除率维持在 88% 左右, 系统 SNED 率和 COD_{ins} 率分别维持在 62% 和 90% 左右. DPR-SNED 系统与 SNEDPR 系统相比实现了低 C/N 城市污水和含硝酸盐废水的同时去除.

(3) DPR-SNED 系统的厌氧段聚糖菌和聚磷菌对内碳源的储存, 可为缺氧段反硝化除磷与好氧段同步硝化反硝化及好氧吸磷过程的进行提供充足的内碳源.

(4) 在 DPR-SNED 系统缺氧段 NO_3^- -N 的还原过程中, 伴随着 NO_2^- -N 的生成, 可能存在少量反硝化聚糖菌利用 NO_3^- -N 进行内源短程反硝化. 系统好氧段利用剩余的内碳源进行同步硝化内源反硝化和好氧吸磷, 进一步提高了系统总氮去除率及磷去除率.

参考文献:

- [1] 高世江. 废水生物脱氮除磷工艺研究进展[J]. 科技资讯, 2016, 14(4): 51-52.
- [2] 王淑莹, 王晓霞, 彭永臻, 等. 反硝化脱氮除磷处理高氨氮厌氧氨氧化出水和生活污水的装置和方法[P]. 中国专利: CN 201310518302.3, 2014-01-29.
- [3] 刘福长, 张新颖, 陈益明, 等. 厌氧氨氧化工艺影响因素研究进展[J]. 能源与环境, 2017, (3): 71-72, 75.
- [4] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, 50(5): 589-596.
- [5] 陈舒. 反硝化聚磷菌的筛选鉴定及其脱氮除磷特性研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2012.
- [6] 连丽丽. 聚磷菌的筛选及其对污水的除磷特性研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2009.
- [7] 周康群, 刘晖, 孙彦富, 等. 反硝化聚磷菌的 SBR 反应器中微生物种群与浓度变化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(4): 705-711.
- [8] Zhou K Q, Liu H, Sun Y F, et al. Change of microorganism amount and species in SBR reactor enriching denitrifying phosphate bacteria[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(4): 705-711.
- [9] 李观元. 以丙酸为碳源的反硝化除磷工艺运行特性及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

- Li G Y. Operation characteristics and affecting factors of denitrifying phosphatation process fed with propionic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [9] Lanham A B, Moita R, Lemos P C, *et al.* Long-term operation of a reactor enriched in accumilibacter clade I DPAOs; performance with nitrate, nitrite and oxygen [J]. Water Science and Technology, 2011, **63**(2): 352-359.
- [10] Zhang T, Liu Y, Fang H H P. Effect of pH change on the performance and microbial community of enhanced biological phosphate removal process [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **92**(2): 173-182.
- [11] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z G, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, **84**(2): 170-178.
- [12] Wang X X, Wang S Y, Xue T L, *et al.* Treating low carbon/nitrogen (C/N) wastewater in simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorous removal (SNDPR) systems by strengthening anaerobic intracellular carbon storage [J]. Water Research, 2015, **77**: 191-200.
- [13] 张建华, 王淑莹, 张森, 等. 不同反应时间内碳源转化对反硝化除磷的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 989-997.
- Zhang J H, Wang S Y, Zhang M, *et al.* Effect of conversion of internal carbon source on denitrifying phosphorus removal under different reaction time[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(3): 989-997.
- [14] 叶丽红, 李冬, 张杰, 等. 亚硝化-反硝化除磷技术研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2016, **42**(4): 585-593.
- Ye L H, Li D, Zhang J, *et al.* Advance of research on the technology of nitrite-denitrifying phosphorus removal[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, **42**(4): 585-593.
- [15] 张兰河, 庄艳萍, 王旭明, 等. 温度对改良 A²/O 工艺反硝化除磷性能的影响[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(10): 213-219.
- Zhang L H, Zhuang Y P, Wang X M, *et al.* Effect of temperature on denitrifying phosphorus removal efficiency using modified A²/O process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(10): 213-219.
- [16] 张建华, 彭永臻, 张森, 等. 不同电子受体配比对反硝化除磷特性及内碳源转化利用的影响[J]. 化工学报, 2015, **66**(12): 5045-5053.
- Zhang J H, Peng Y Z, Zhang M, *et al.* Effect of different electron acceptor ratios on removal of nitrogen and phosphorus and conversion and utilization of internal carbon source [J]. CIESC Journal, 2015, **66**(12): 5045-5053.
- [17] 彭赵旭, 彭永臻, 左金龙. 同步硝化反硝化的影响因素研究[J]. 给水排水, 2009, **35**(5): 167-171.
- Peng Z X, Peng Y Z, Zuo J L. Study of influence factors on simultaneous nitrification and denitrification [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, **35**(5): 167-171.
- [18] Virdis B, Read S T, Rabaey K, *et al.* Biofilm stratification during simultaneous nitrification and denitrification (SND) at a biocathode[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(1): 334-341.
- [19] 张森, 何成达, 王淑莹, 等. A²/O + MBBR 系统的快速启动及反硝化除磷特性[J]. 工程科学与技术, 2017, **49**(2): 240-247.
- Zhang M, He C D, Wang S Y, *et al.* Rapid start-up and denitrifying phosphorus removal characteristics of A²/O + MBBR process[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, **49**(2): 240-247.
- [20] 张森, 彭永臻, 张建华, 等. 进水 C/N 对 A²/O-BCO 工艺反硝化除磷特性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(5): 1366-1375.
- Zhang M, Peng Y Z, Zhang J H, *et al.* Effect of influent C/N ratios on denitrifying phosphorus removal characteristics in the A²/O-BCO process [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(5): 1366-1375.
- [21] 王晓霞, 王淑莹, 赵骥, 等. 厌氧/好氧 SNEDPR 系统处理低 C/N 污水的优化运行[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2672-2680.
- Wang X X, Wang S Y, Zhao J, *et al.* Optimization for low C/N sewage treatment in an anaerobic/aerobic simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorous removal system[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2672-2680.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] 许松瑜. 双泥折流板反硝化除磷工艺硝化菌的 FISH 检测研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2011.
- Xu S Y. Investigation on the FISH detection of the nitrifying bacteria in two-sludge baffled reactor [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2011.
- [24] 方茜, 张朝升, 张立秋, 等. 同时硝化/反硝化除磷工艺稳定性控制研究[J]. 给水排水, 2014, **40**(11): 132-135.
- [25] Coma M, Puig S, Balaguer M D, *et al.* The role of nitrate and nitrite in a granular sludge process treating low-strength wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, **164**(1): 208-213.
- [26] Kerm-Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions[J]. Water Research, 1993, **27**(4): 617-624.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)