

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM_{2.5}浓度时空变化定量模拟 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM_{2.5}中无机离子垂直分布特征 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM_{2.5}成分谱特征 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH₄浓度及其通量变化特征初探 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A²/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭原位减量工艺中抗生素的去除 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO₂释放的影响 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

分段进水对改良 A²/O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响

南彦斌¹, 彭永臻², 曾立云¹, 赵智超¹, 刘宏¹, 李慧¹, 陈永志^{1*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124)

摘要: 采用改良 A²/O-BAF 双污泥系统处理低 C/N 比生活污水, 为提高碳源利用率, 研究了两段进水(预缺氧段和缺氧段)对反硝化除磷脱氮的影响, 同时根据 COD 的物料衡算公式, 分析评价了不同进水比下, 碳源的利用情况. 结果表明当分段进水比为 7:3 时, 平均进水 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 浓度分别为 174.99、58.19、59.10、5.15 mg·L⁻¹, 出水 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 浓度分别为 29.48、4.07、14.10、0.44 mg·L⁻¹, 去除率分别为 82.12%、92.76%、75.45%、91.20%; 系统中反硝化聚磷菌占聚磷菌的比例(DPAOs/PAOs)为 98.81%, 此时系统反硝化除磷脱氮最佳, 同时碳源的有效利用率达 85.77%, 平衡百分比为 92.33%. 通过优化分段进水, 碳源被有效利用, 提高了同步脱氮除磷效率, 为改良 A²/O-BAF 双污泥系统处理低 C/N 比污水提供理论依据.

关键词: 分段进水比; 反硝化除磷脱氮; 碳源利用率; 物料平衡; 低 C/N 比

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1704-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709261

Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A²/O-BAF System

NAN Yan-bin¹, PENG Yong-zhen², ZENG Li-yun¹, ZHAO Zhi-chao¹, LIU Hong¹, LI Hui¹, CHEN Yong-zhi^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National Engineering Laboratory of Urban Sewage Advanced Treatment and Resource Utilization Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A modification of the two sludge A²/O-BAF system was used to treat low C/N real domestic sewage. In order to improve the utilization of the carbon source, the effects of two step feeds (pre-anoxic zone and anoxic zone) on denitrifying phosphorus and nitrate removal were studied. According to the formula of material balance for COD, the utilization of carbon source was analyzed and evaluated under different ratios of step feed, simultaneously. The results showed that when the ratio of step feed was 7:3 and the influent concentrations of COD, NH₄⁺-N, TN, and TP were 174.99, 58.19, 59.10, and 5.15 mg·L⁻¹, respectively, their effluent concentrations were 29.48, 4.07, 14.10, and 0.40 mg·L⁻¹, and the removal rates were 82.12%, 92.76%, 75.45%, and 91.20%, respectively. It was found that when the ratio of the denitrifying phosphorus accumulation organisms to the phosphorus accumulation organisms(DPAOs/PAOs) was 98.81%, the efficiencies of denitrifying phosphorus and nitrate removal were optimum. By optimizing step feed, the carbon source was utilized effectively, and the efficiencies of nitrogen and phosphorus removal were improved simultaneously. The theoretical basis has thus been provided for the modification of the two sludge A²/O-BAF system to treat low C/N waste water.

Key words: ratio of step feed; denitrifying phosphorus and nitrate removal; utilization of carbon sources; material balance; low C/N

我国市政污水天然存在碳氮比(C/N)较低的特点^[1], 导致同步脱氮除磷所需碳源缺乏, 使得污水处理厂氮磷不能同时达标. 有效利用原水中的有机碳源对同步脱氮除磷具有重要意义, 分段进水是提高碳源利用率的有效手段^[2], 国内外许多学者从最初的数学模型模拟^[3]、过程控制^[4,5]到目前的工艺设计参数及运行的影响因素^[6-8]等进行了深入研究, 并取得一定进展. 王敏等^[9]采用三级 A/O 分段进水工艺处理低碳源生活污水, 发现分段进水工艺在对碳源的有效利用及能耗节省方面优于单点进

水. 王伟等^[10]用流量分配模糊控制方法进行分段进水, 提高了 A²/O 的脱氮除磷性能. 王振国等^[11]对改良 A²/O 工艺进行分段进水, 实现了低 C/N 比条件下 TN 和 TP 的有效去除. 王慰等^[12]用分段进水的方式, 后置缺氧 UCT 工艺在处理 C/N 比为 3

收稿日期: 2017-09-28; 修订日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668033); 甘肃省高等学校特色专业项目(101004); 兰州交通大学教改重点项目; 大学生创新实验项目(2017063)

作者简介: 南彦斌(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水脱氮除磷, E-mail: 2474347552@qq.com

* 通信作者, E-mail: 476411589@qq.com

左右的生活污水时, 系统可通过好氧段同步硝化内源反硝化提高 TN 去除率. 对 A²/O-BAF 工艺的研究多集中于过程控制和参数优化, 而分段进水方面的研究较鲜见.

对 A²/O-BAF 工艺而言, 采用单点进水时, 原水中的绝大部分 COD 在 A²/O 厌氧区被厌氧释磷利用, 导致缺氧区的碳源不足, 而采用分段进水时, 有机碳源在预缺氧段和缺氧段合理分配, 不仅可以使聚磷菌 (PAOs) 充分释磷, 而且可以保证反硝化脱氮^[13]. 本文采用改良 A²/O-BAF 工艺, 通过分段进水调整原水在预缺氧段和缺氧段的比例, 旨在实现低 C/N 比条件下的深度脱氮除磷, 同时采用小试考察了分段进水时 PAOs 的厌氧释磷量及反硝化聚磷菌 (DPAOs) 占 PAOs 的比值.

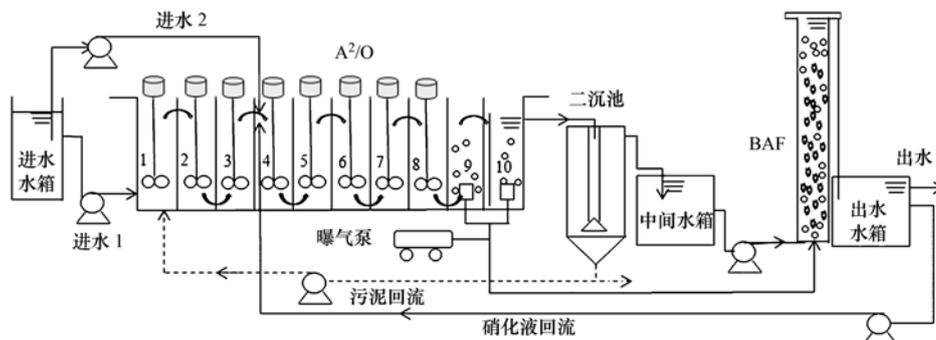


图1 分段进水改良 A²/O-BAF 工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the step feed enhanced A²/O-BAF process

生活污水从原水箱通过蠕动泵分两段进入 A²/O 反应器, 其中一段进入预缺氧段, 第二段进入缺氧段, 同时二沉池的回流污泥同步进入到预缺氧段, BAF 中的硝化液进入缺氧段, 进行反硝化脱氮除磷, 在好氧段完成剩余磷的吸收和氮气的吹脱; 经过二沉池的澄清, 含有 NH₄⁺-N 的上清液进入 BAF, 完成硝化反应, 出水一部分回流到 A²/O 的缺氧段, 另一部分排放.

本试验的温度为 24 ~ 27℃, 进水流量为 180 L·d⁻¹, A²/O 的 HRT 为 8 h, 污泥龄 (SRT) 在 12 d 左右, 好氧段 DO 为 2 ~ 3 mg·L⁻¹, 污泥回流比为 100%, 硝化液回流比为 200%, MLSS 为 2 000 ~ 2 800 mg·L⁻¹; BAF 中 DO 为 6 ~ 8 mg·L⁻¹; 调整预缺氧段和缺氧段的进水比例分别为 5:5 (run1)、6:4 (run2)、7:3 (run3)、10:0 (run4).

1.2 试验用水及检测方法

以兰州交通大学住宅区化粪池生活污水为试验水源, 具体水质见表 1.

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行程序

试验装置见图 1, 采用有机玻璃制成, A²/O 总有效容积 60 L, 分 10 个格室, 依次为预缺氧段、厌氧段、缺氧段、好氧段, 体积比为 1:2:5:2, 前 8 个格室均设有电动搅拌机, 好氧段设有曝气头, 采用鼓风曝气, 转子流量调节曝气量. 二沉池采用竖流式, 有效容积为 28 L, BAF 池采用上向流, 有效容积为 23.5 L, 内置活性生物填料, 底部布设细孔沙芯曝气头, 由空气压缩机提供曝气并用转子流量计控制曝气量. 系统进水流量、污泥回流量、硝化液回流量、BAF 进水流量均由蠕动泵控制.

表 1 进水水质

Table 1 Influent characteristics

项目	范围	均值
COD/mg·L ⁻¹	99.33 ~ 257.36	188.75
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	38.53 ~ 81.70	60.26
NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.00 ~ 0.93	0.22
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.17 ~ 1.14	0.59
TN/mg·L ⁻¹	38.95 ~ 91.42	61.57
TP/mg·L ⁻¹	1.76 ~ 8.07	4.90
pH	7.43 ~ 7.65	7.54

水样根据国家标准方法^[14]测定 COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P、TN 和 TP. MLSS、MLVSS 采用滤纸重量法测定, SV 采用 30 min 沉降法测定. pH、DO 和温度由德国 Multi-3420 测定仪测定.

1.3 碳平衡分析方法

生化系统中碳指标用 COD 间接表示, 碳的物料平衡及利用率用 COD 的质量变化情况计算, 反应过程中流量及 COD 的变化情况见图 2, 由碳平衡计算方法^[15]可得:

$$M_{inf.COD} = M_{PDN.COD} + M_{ANA.COD} + M_{(ANI-S).COD} + M_{(s-eff).COD} + M_{W.COD} + M_{eff.COD} \quad (1)$$

$$M_{(s-eff).COD} = (Q_{in1} + Q_{in2} + Q_R + Q_r) \cdot (c_{S,COD} - c_{eff.COD}) \quad (2)$$

$$M_{eff.COD} = Q_{eff} \cdot c_{eff.COD} \quad (3)$$

$$M_{W.COD} = Q_W \cdot X_W \cdot f \cdot f_{CV} \quad (4)$$

式中, $M_{inf.COD}$ 为进入系统的 COD 总量, $M_{eff.COD}$ 为系统出水的 COD 量, $M_{PDN.COD}$ 为 A²/O 中预缺氧段利用的 COD 量, $M_{ANA.COD}$ 为厌氧段利用的 COD 量, $M_{(ANI-S).COD}$ 为缺氧、好氧段利用的 COD 量, $M_{(s-eff).COD}$ 为 BAF 段利用的 COD 量, $M_{W.COD}$ 为剩

余污泥中的 COD 量, 均为 $mg \cdot d^{-1}$; Q_{in1} 、 Q_{in2} 分别为进水预缺氧段、缺氧段流量, Q_R 为回流污泥流量, Q_r 为回流硝化液流量, Q_W 为剩余污泥排放量, Q_{eff} 为出水流量, 均为 $L \cdot d^{-1}$; c_{in1} 、 c_{in2} 分别为进水预缺氧段、缺氧段 COD 浓度, $c_{S,COD}$ 为二沉池 COD 浓度, $c_{eff.COD}$ 为出水 COD 浓度, X_W 为剩余活性污泥浓度, 均为 $mg \cdot L^{-1}$, f 为挥发性活性污泥浓度与剩余活性污泥浓度的比值, f_{CV} 为活性污泥中有机物 COD 的化学计量系数, 以每 mg 挥发性活性污泥浓度中含有 $1.48 mg$ COD 计^[16].

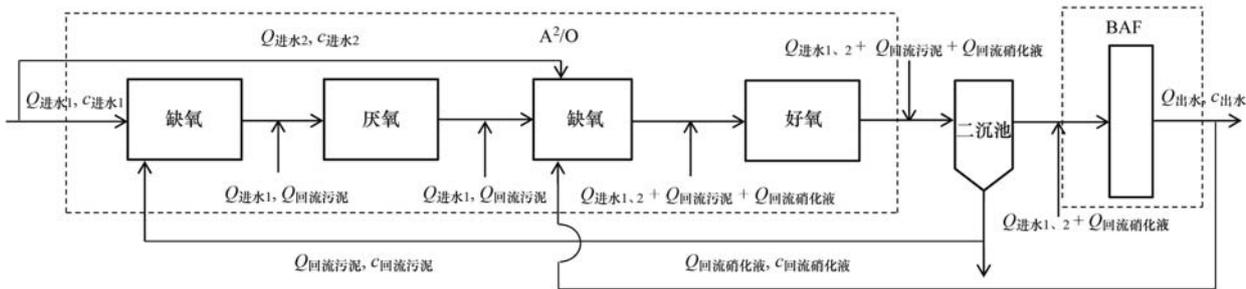


图 2 改良 A²/O-BAF 系统 COD 的平衡分析

Fig. 2 Balance analysis of COD in the modified A²/O-BAF system

1.4 反硝化除磷污泥活性分析

反应器运行稳定后, 进行小试, 确定不同分段进水比条件下 DPAOs 占 PAOs 的比例^[17]. 根据相邻 2 次测得 $PO_4^{3-}P$ 的浓度差计算厌氧释磷速率 (R_{an})、缺氧吸磷速率 (PUR_{an}) 和好氧吸磷速率 (PUR_{o}), 计算公式如下^[18]:

$$R_{an} = \frac{\text{相邻 2 次厌氧吸磷量之差}(mg \cdot L^{-1})}{\text{污泥浓度}(g \cdot L^{-1}) \times \text{时间}(h)} \quad (5)$$

$$PUR_{an} = \frac{\text{相邻 2 次缺氧吸磷量之差}(mg \cdot L^{-1})}{\text{污泥浓度}(g \cdot L^{-1}) \times \text{时间}(h)} \quad (6)$$

$$PUR_{o} = \frac{\text{相邻 2 次好氧吸磷量之差}(mg \cdot L^{-1})}{\text{污泥浓度}(g \cdot L^{-1}) \times \text{时间}(h)} \quad (7)$$

由 R_{an} 、 PUR_{an} 和 PUR_{o} 的计算结果, 得到污泥的 $R_{an,max}$ 、 $PUR_{an,max}$ 和 $PUR_{o,max}$, 从而计算出 $PUR_{an,max}/PUR_{o,max}$ 的比值, 即得到 DPAOs/PAOs 比例.

2 结果与讨论

2.1 分段进水对有机物去除及利用率的影响

分段进水时系统对有机物的去除效果见图 3, 可以看出, 在进水 COD 为 $99.33 \sim 284.45 mg \cdot L^{-1}$

时, 各工况下出水 COD 的平均浓度都呈现递减的趋势, 均在 $40 mg \cdot L^{-1}$ 以下, 满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918-2002 一级 A 排放标准, 去除率都在 80% 左右, 说明分段进水对 COD 的去除影响较小.

图 4 为分段进水时 COD 在系统中的沿程变化. 可以看出, COD 在沿程均呈现降低的趋势, 预缺氧段和厌氧段对 COD 的去除量最大, 而其余各段对 COD 的去除量较小, 通过物料衡算知(表 2), 系统在预缺氧段和厌氧段有机物的降解量分别占有机物流入量的 35.29%、59.09%、71.42%、63.82%, 而缺氧段和好氧段分别占有机物流入量的 32.79%、30.56%、21.35%、17.02%, 随着分段进水比在预缺氧段的增大, 进水碳源的利用率先增大后减小. 分析原因: 在预缺氧段进水比逐渐增大, 必然导致在缺氧段的进水比逐渐减小, 而在预缺氧段和厌氧段, PAOs 充分利用碳源进行释磷, 并合成内碳源, 当预缺氧段的进水比过大时, 系统会过量释磷, 而在缺氧段进水比例过大时, 碳源量增加, 使 DPAOs 的活性受到抑制^[19], 在 BAF 出水中, 有机物的量较二沉池出水有所增加, 分析原因可能是由于 BAF 进水有机物浓度较低, 部分细胞发生老化, 生物膜发生脱落, 使得组成生物膜的一些胞

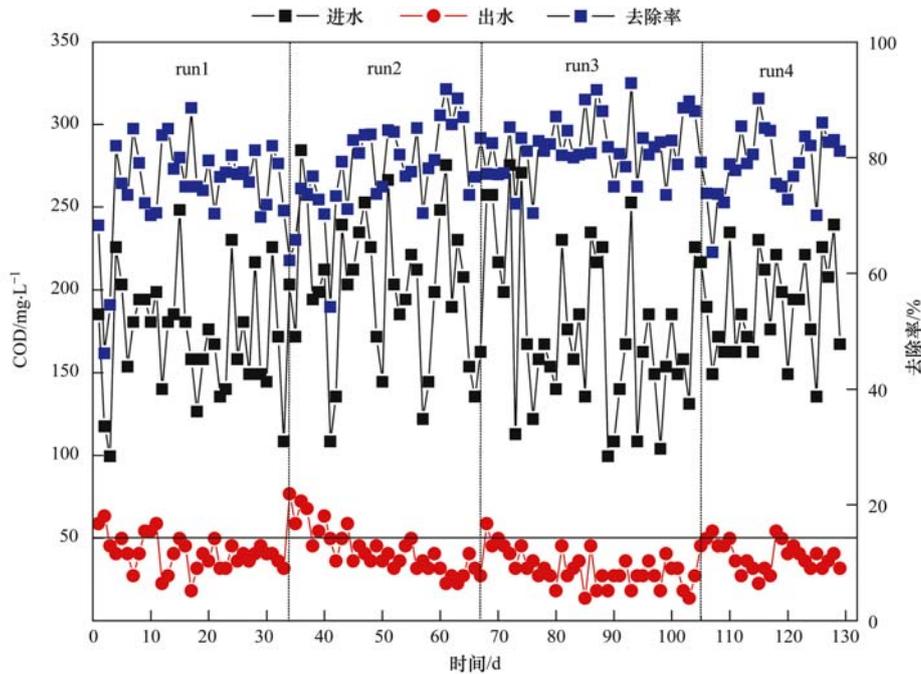


图3 各工况下系统对 COD 的去除效果

Fig. 3 COD removal rate of the system under different operational conditions

外多聚物(多糖、蛋白和核酸)溶解在水中^[20], 导致 COD 在 BAF 中有所升高. 由表 2 计算出 4 个工况下 COD 的有效利用率分别为: 57.38%、75.00%、85.77%、76.60%, 平衡百分比分别为: 91.57%、91.81%、92.93%、91.75%, 工况 3 对 COD 的有效利用率较好.

2.2 分段进水对脱氮性能的影响

分段进水对 NH₄⁺-N、TN 的去除效果见图 5, 可以看出, 进水 NH₄⁺-N 和 TN 浓度波动较大, 分别为 38.53~81.70 mg·L⁻¹ 和 38.95~91.42 mg·L⁻¹, 当反应器运行稳定时 4 个工况下对 NH₄⁺-N 的去除效果都保持较高的水平, 平均出水 NH₄⁺-N 浓度均小于 5 mg·L⁻¹, 去除率均达到 90.00% 以上, 说明系统对 NH₄⁺-N 的抗冲击负荷能力较强; 分段进水比为 5:5

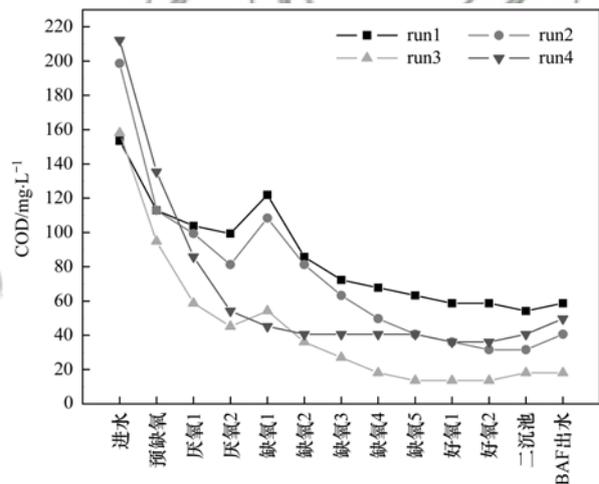


图4 各工况下 COD 的沿程变化规律

Fig. 4 COD concentrations in different stages under different operational conditions

表 2 COD 的物料衡算

Table 2 Material balance of chemical oxygen demand(COD)/mg·d⁻¹

工况	$M_{inf. COD}$	$M_{eff. COD}$	$M_{PDN. COD}$	$M_{ANA. COD}$	$M_{(ANI-S). COD}$	$M_{(s-eff). COD}$	$M_{W. COD}$
run1	24 787.35	10 565.10	3 657.15	1 219.05	8 127.00	3 250.80	2 379.63
run2	29 257.20	7 314.30	9 264.78	3 413.34	8 939.70	6 501.60	4 430.57
run3	22 836.87	3 250.80	7 963.21	6 256.81	4 876.20	3 254.40	2 130.44
run4	38 196.90	8 939.70	13 815.90	10 564.20	6 502.50	6 501.60	1 725.56

时, TN 的去除率为 80.67%, 随着分段进水比增大, TN 去除率逐渐下降, 当分段进水比为 10:0 时, TN 去除率下降至 74.93%, 这是因为分段进水比增加时, 原水中的碳源在预缺氧段和缺氧段中的分配

比例逐渐增加, 导致缺氧段的碳源不足, 使反硝化不能完全进行, 从而导致出水 TN 浓度升高, 去除率下降, 杭春全^[21] 也发现缺氧段反硝化脱氮能力随着进水碳源浓度的降低而减弱.

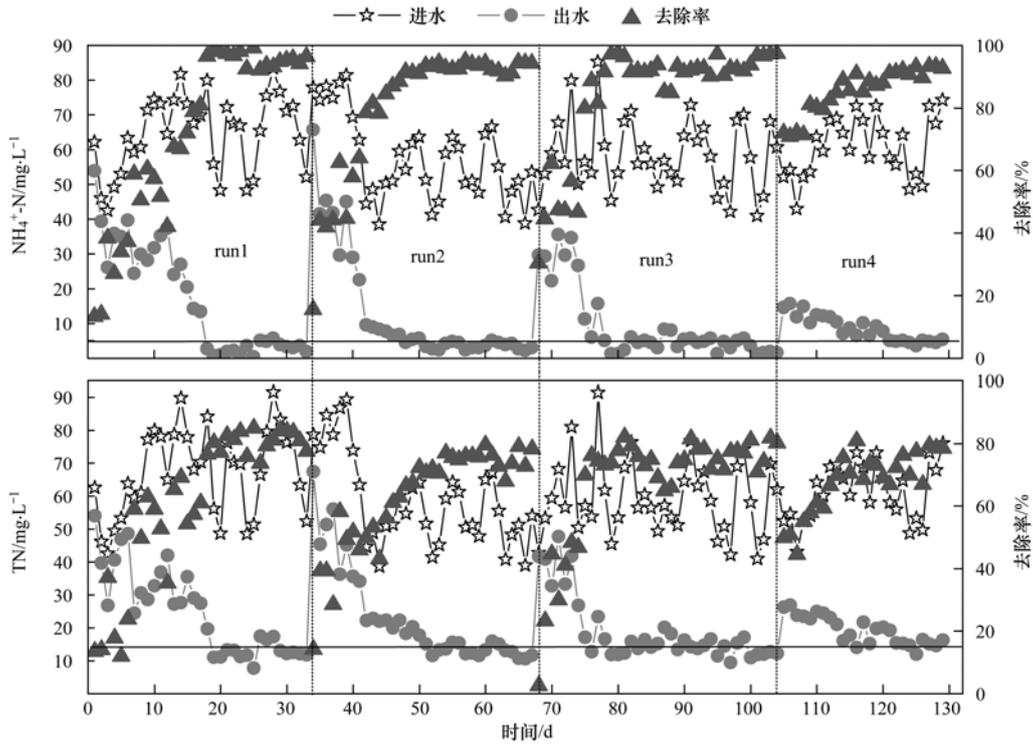


图 5 各工况下系统对NH₄⁺-N和 TN 的去除效果

Fig. 5 NH₄⁺-N and TN removal efficiencies of the system under different operational conditions

NH₄⁺-N、NO₃⁻-N在反应器中的沿程变化规律见图6，可以看出，NH₄⁺-N在沿程各段均降低，在预缺氧段和缺氧段的降低，分别是由于回流污泥和硝化液回流的稀释作用造成的，在好氧段和BAF中

的降低，是由于硝化作用将NH₄⁺-N氧化为NO₃⁻-N，但是在BAF中NH₄⁺-N降幅达到86.18%，这与彭永臻等^[22]的研究结果一致。NO₃⁻-N的浓度在预缺氧段和厌氧段由于反硝化的作用均呈现降低趋势，而

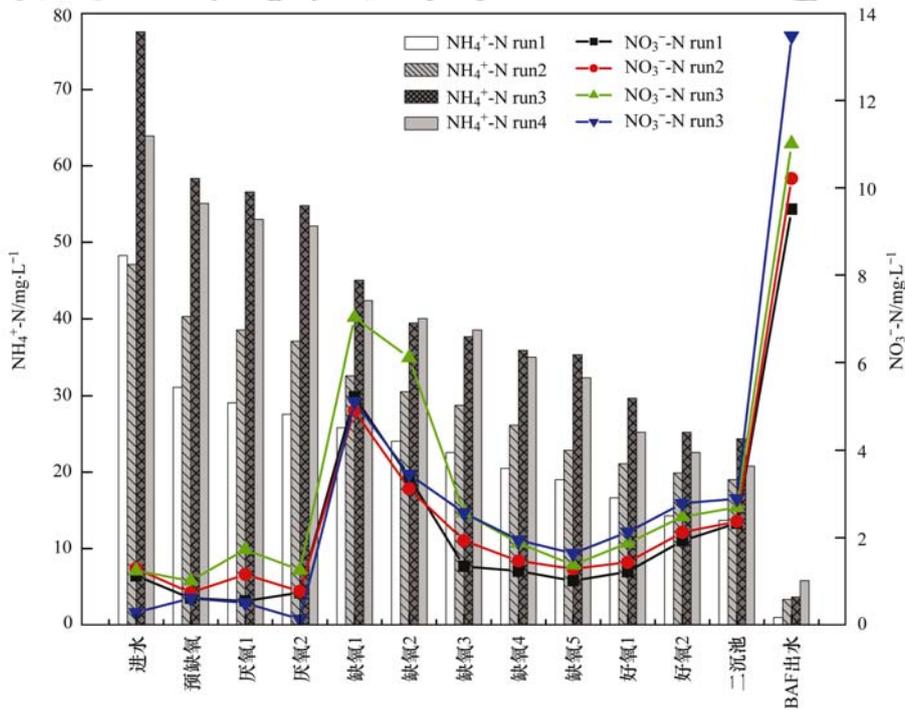


图 6 各工况下NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的沿程变化规律

Fig. 6 NH₄⁺-N and NO₃⁻-N concentrations in different stages under different operational conditions

在缺氧段 1 由于硝化液的回流达到最大, 此后各缺氧段由于反硝化的作用, 其浓度逐渐降低, 到达好氧段和 BAF 时, 由于硝化作用又使 NO_3^- -N 升高, 但在 BAF 中升幅最大, 达到 75% 以上, 可见硝化作用主要在 BAF 中完成. 不同分段进水时, NH_4^+ -N 在 BAF 中被充分氧化, 稳定阶段出水 NH_4^+ -N 浓度均较低, 分段进水比为 5:5 时, 出水 TN 去除率高达 80%, 随着分段进水比的增大, TN 去除率呈现下降趋势, 在分段进水比为 7:3 时, TN 平均出水浓度为 $14.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 75.45%, 当分段进水比例为 10:0 时, 系统出水 NO_3^- -N 浓度达到 $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 使系统 TN 去除性能下降; 这是因为当分段进水比为 5:5 时, 系统在缺氧段的有机物充足, 反硝化菌充分利用回流的硝化液作为电子受体, 以有机物为电子供体进行反硝化^[23]. 当分段进水比增大时, 有机物在缺氧段的含量逐渐减少, 导致在缺氧段的 NO_3^- -N 因缺少电子供体而积累^[18], 使得出水 NO_3^- -N 浓度增大, 从而使出水 TN 去除率下降.

2.3 分段进水对反硝化除磷性能的影响

分段进水对 TP 的去除效果见图 7. 可以看出系统进水的 TP 在 $1.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 出水 TP 平均浓度分别为 0.74 、 0.55 、 0.44 、 $0.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率分别为 88.03%、89.17%、91.20%、87.20%, 随着缺氧段进水流量的减少, 出水 TP 浓度先降低后增加, 去除率先升高后降低, 在分段进水比为 7:3 时, 出水 TP 浓度为 $0.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到最低, 去除效果较好.

分段进水时, 系统内磷酸盐的沿程变化特性见图 8, 可以看出, 在预缺氧段就已经发生了释磷现象, 在厌氧段 PAOs 充分释磷, 从缺氧段到好氧段

结束, 磷酸盐均呈现出下降的趋势, 其中在缺氧区 1 段下降最快, 是由于在缺氧 1 段污泥浓度较大, 而后呈梯度式降低. 分析原因认为: 一是在预缺氧段进水比越大, 在一定范围内, 相应的分配给 PAOs 的有机物量越多, PAOs 在预缺氧段和厌氧段充分有效释磷和合成大量内碳源, 如果有机物的量过大, 则会发生无效释磷现象, 造成碳源浪费; 在缺氧段, DPAOs 以储存的 PHB 为电子供体, 以回流的 NO_3^- -N 为电子受体, 动力充足, 吸收大量的磷, 若缺氧段有机物的量越多, 普通异养反硝化菌优先以有机物为电子供体进行反硝化反应, 抑制 DPAOs 的优势作用, 导致吸磷动力不强, 除磷率下降^[24]; 二是经计算, 4 个工况下污染物在厌氧段的 HRT 分别为 3.2、2.66、2.28、1.6 h, 当 HRT 为 2.28 h 时, 出水 TP 浓度最低, 这与苏婉琳等^[25]在低 C 源的情况下, 厌氧 2 h 时聚磷微生物释磷效率较高的研究结果相近. 同时由于预缺氧段的设置, 相对增加了污染物在厌氧段的 HRT, 提高了 PAOs 的抗冲击负荷能力, 这使得预缺氧段进水流量的增大虽然降低了污染物在厌氧段的 HRT, 仍能够充分释磷, 提高了 PAOs 的抗冲击负荷能力, 而吕冬梅等^[18]发现随着厌氧反应时间的增加, 厌氧释磷量增加, 这有可能是 A²/O-BAF 反应器前端没有设置预缺氧的原因, 使得 PAOs 的抗冲击负荷能力不强. 在缺氧段, 随着分段进水流量的减少, DPAOs 在反应器内的 HRT 延长, 使 DPAOs 得到充分富集, 实现高效的反硝化吸磷.

不同分段进水比时, PAOs 厌氧释磷、缺氧/好氧吸磷变化规律见图 9. 从中可知, 随着进水比的

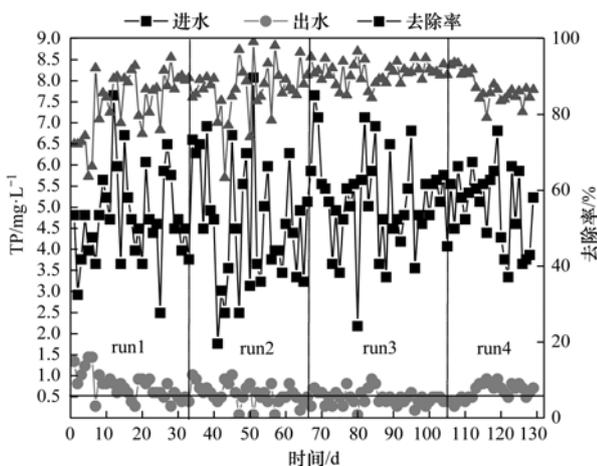


图 7 各工况下系统对 TP 的去除效果

Fig. 7 TP removal efficiencies of the system under different operational conditions

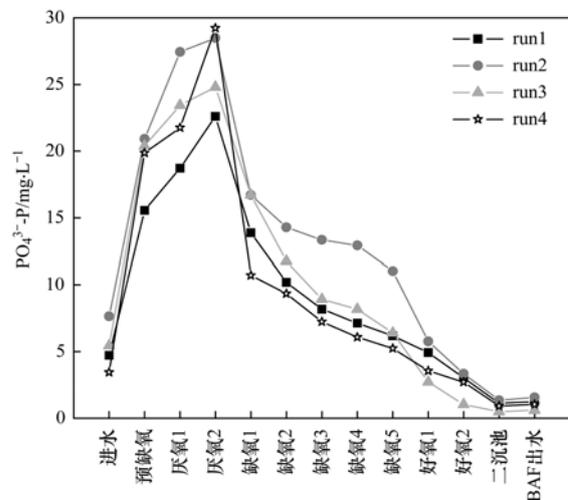


图 8 各工况下 PO_4^{3-} -P 的沿程变化规律

Fig. 8 PO_4^{3-} -P concentrations in different stages under different operational conditions

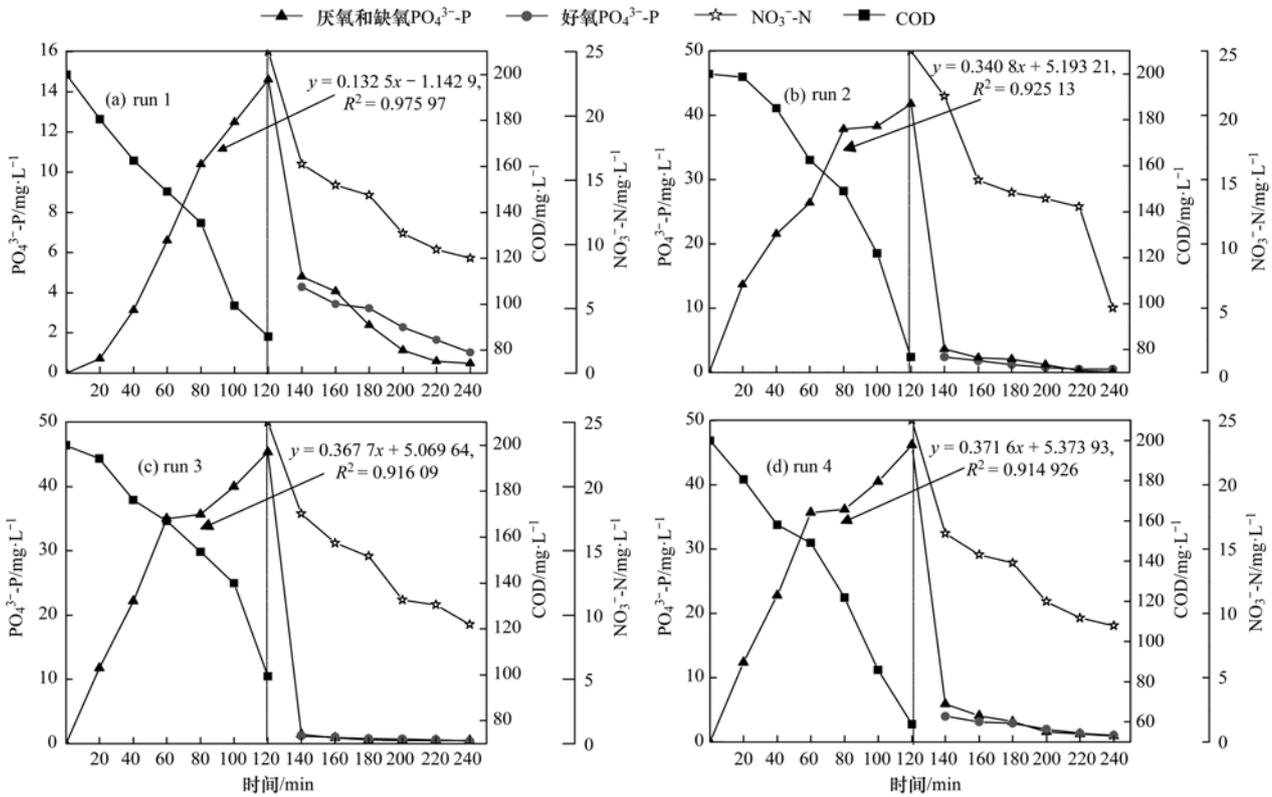


图 9 各工况下聚磷菌厌氧释磷和缺氧/好氧吸磷

Fig. 9 Anaerobic phosphorus release and anoxic/oxic phosphorus uptake under different operational conditions

增大, 厌氧释磷量逐渐增加, 在分段进水比为 10:0 时, 释磷量达到最大, 为 $46.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 对不同进水比与厌氧释磷量进行线性拟合, 可知分段进水比对厌氧释磷量的影响较大. 由图 10 可知, 4 个工况的最大释磷速率分别为 50.96 、 150.17 、 171.65 、 $117.94 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 最大缺氧吸磷速率分别为 131.64 、 419.12 、 586.59 、 $383.81 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 计

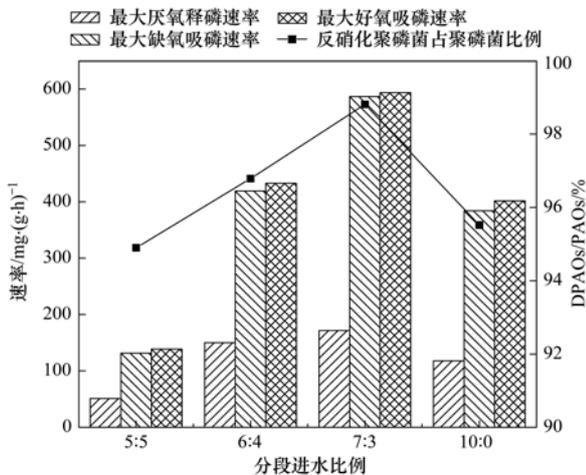


图 10 各工况下厌氧释磷速率、缺氧/好氧吸磷速率及反硝化聚磷菌占聚磷菌的比值

Fig. 10 $R_{an,max}$, $PUR_{an,max}$, $PUR_{o,max}$, and DPAOs/PAOs under different operational conditions

算得出 DPAOs/PAOs 的值分别为 94.90% 、 96.79% 、 98.81% 、 95.52% . 分析原因认为, 随着分段进水比例的增大, 厌氧释磷量增加, 反硝化聚磷量也增加, 说明二者存在线性关系, 但是相关研究报告, 在有效释磷的条件下^[24], 厌氧释磷量与 PAOs 储存内碳源量之间线性相关^[26], 而 DPAOs 利用 PHB 过量吸收磷酸盐, 因此 PHB 是 PAOs 除磷能力的指示性参数, 同时也说明适量的外碳源可以加快 DPAOs 的新陈代谢并使其得到富集, 从而提高除磷效率.

综合考虑, 从 run1 ~ run4, 系统的脱氮性能下降, 除磷效果先升高后下降, 而 run3 的脱氮除磷性能能够同时满足国家 GB 18918-2002 一级 A 排放标准, 因此, 工况 3 为系统最佳工况.

2.4 分段进水系统各段 DO、pH 变化规律

不同分段进水时, 系统各段 DO、pH 的变化见图 11. DO 在预缺氧段维持在 $0.11 \sim 0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧段为 $0.01 \sim 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 缺氧段为 $0.01 \sim 0.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 好氧段为 $1.95 \sim 3.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在 BAF 中 DO 达到 $6 \sim 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是为了保证硝化过程的彻底进行. pH 在预缺氧段略有升高, 在厌氧段下降、缺氧段和好氧段升高, BAF 中迅速降低. 分析认为,

预缺氧段 pH 略微升高是由于回流污泥的 pH 较高引起的, 厌氧段 pH 下降, 是因为磷的释放(图 8)和有机物(图 4)的降解使得 pH 下降^[23], 而在缺氧段 pH 升高, 是因为发生反硝化产碱导致的^[27], 在 BAF 中, pH 迅速下降是因为发生了硝化反应, 消耗了碱度^[28,29].

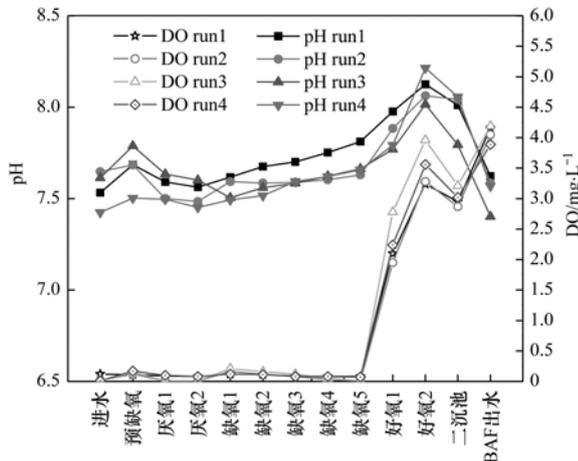


图 11 不同工况下系统各段 DO、pH 变化

Fig. 11 Changes of DO and pH of the system under different operational conditions

3 结论

(1) 当分段进水比为 7:3 时, 进水 71.42% 的有机物在预缺氧段和厌氧段被 PAOs 厌氧释磷, 21.35% 的有机物在缺氧段反硝化除磷脱氮, 碳源有效利用率达 85.77%, 平衡百分比为 92.33%, 实现碳源利用最大化。

(2) 采用改良 A²/O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮工艺, 处理低 C/N 比城市生活污水, 当分段进水比为 7:3 时, PAOs 在预缺氧段和厌氧段有效充分释磷并合成大量内碳源, 为缺氧段 DPAOs 高效聚磷提供电子供体, 同时缺氧段的有机物被反硝化菌有效利用, 达到同步脱氮除磷。

(3) 当分段进水比为 7:3 时, 系统的厌氧释磷速率(Ran)、缺氧吸磷速率(PURan)和好氧吸磷速率(PURo)达到最大, DPAOs 占绝对优势。

参考文献:

- [1] 王梅香, 赵伟华, 王淑莹, 等. A₂N₂ 双污泥系统反硝化除磷工艺的启动与稳定[J]. 化工学报, 2016, 67(7): 2987-2997.
Wang M X, Zhao W H, Wang S Y, et al. Startup and stability of A₂N₂ double sludge system denitrifying phosphorus removal process[J]. CIESC Journal, 2016, 67(7): 2987-2997.
- [2] 曹贵华, 王淑莹, 彭永臻, 等. 体积比对分段进水工艺处理低浓度废水性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(3): 428-435.
- [3] Johnson B R, Goodwin S, Daigger G T, et al. A comparison between the theory and reality of full-scale step-feed nutrient removal systems[J]. Water Science and Technology, 2005, 52(10-11): 587.
- [4] Zhu G B, Peng Y Z, Ma B, et al. Optimization of anoxic/oxic step feeding activated sludge process with fuzzy control model for improving nitrogen removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 151(1-3): 195-201.
- [5] 王伟, 王淑莹, 孙亚男, 等. 多段 A/O 工艺流量及体积分配方法与优化控制策略[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(2): 240-245.
Wang W, Wang S Y, Sun Y N, et al. Distribution methods of influent flows and volume in multi-stages A/O process and its optimization[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(2): 240-245.
- [6] Liang H W, Gao M, Liu J X, et al. A novel integrated step-feed biofilm process for the treatment of decentralized domestic wastewater in rural areas of China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(3): 321-327.
- [7] Ge S J, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Enhanced nutrient removal in a modified step feed process treating municipal wastewater with different inflow distribution ratios and nutrient ratios[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(23): 9012-9019.
- [8] 陈强, 王伟, 汪传新, 等. 改良分段进水工艺处理低 C/N 城市污水的体积优化控制[J]. 水处理技术, 2015, 41(4): 71-76.
Chen Q, Wang W, Wang C X, et al. Volume optimization control of modified step feed process in treating low COD/TN municipal sewage[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(4): 71-76.
- [9] 王敏, 张智, 陈杰云, 等. 不同流量分配比对多级 A/O 工艺去除有机物及脱氮的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1430-1434.
Wang M, Zhang Z, Chen J Y, et al. Influence of different influent flow distribution ratios on biological nitrogen and carbon removal by multi-stages A/O process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(4): 1430-1434.
- [10] 王伟, 陈强, 彭永臻. 基于水质建立 SFA²/O 分段进水工艺流量分配模糊控制规则[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2190-2196.
Wang W, Chen Q, Peng Y Z. Establishment of influent flow distribution fuzzy control rules in SFA²/O step-feed process based on wastewater quality[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(4): 2190-2196.
- [11] 王振国, 何争光, 彭赵旭, 等. 体积比对分段进水改良 A²/O 工艺脱氮除磷性能的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 100-104.
Wang Z G, He Z G, Peng Z X, et al. Effect of volume ratio on N and P removal in step-feed inflow modified A²/O process system[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 36(5): 100-104.
- [12] 王慰, 王淑莹, 张琼, 等. 后置缺氧 UCT 分段进水工艺处理低 C/N 城市污水[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 1997-

- 2005.
- Wang W, Wang S Y, Zhang Q, *et al.* Post-anoxic UCT step-feed process in treating municipal wastewater with low C/N ratios[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 1997-2005.
- [13] 辛明秀, 赵颖, 周军, 等. 反硝化细菌在污水脱氮中的作用[J]. *微生物学通报*, 2007, **34**(4): 773-776.
- Xin M X, Zhao Y, Zhou J, *et al.* The application of denitrifying bacteria in denitrification of wastewater[J]. *Microbiology*, 2007, **34**(4): 773-776.
- [14] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.) [M]. Washington, DC: American Public Health Association, 2007.
- [15] 王聪, 王淑莹, 张森, 等. 厌氧/缺氧/好氧生物接触氧化处理低碳氮比污水的物料平衡[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(19): 273-281.
- Wang C, Wang S Y, Zhang M, *et al.* Material balance of anaerobic-poor oxygen-aerobic biological contact oxidation process treating sewage with low carbon/nitrogen ratio [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(19): 273-281.
- [16] Chuang S H, Ouyang C F. The biomass fractions of heterotrophs and phosphate-accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system[J]. *Water Research*, 2010, **34**(8): 2283-2290.
- [17] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (A²/O) wastewater treatment plant (WWTP) [J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**(11): 1615-1624.
- [18] 吕冬梅, 彭永臻, 赵伟华, 等. A²O-BAF 工艺反硝化聚磷效果的影响因素[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(11): 3266-3274.
- Lv D M, Peng Y Z, Zhao W H, *et al.* Factors influencing the denitrifying phosphorus removal efficiency of A²O-BAF process [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(11): 3266-3274.
- [19] 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.
- [20] 周晓黎, 孙迎雪, 石娜, 等. 反硝化生物滤池生物膜胞外聚合物空间分布特征[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(5): 2836-2844.
- Zhou X L, Sun Y X, Shi N, *et al.* Spatial distribution characteristics of extracellular polymeric substances in a denitrification biological filter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(5): 2836-2844.
- [21] 杭春全, 危志锋, 林锐, 等. 反硝化脱氮除磷系统的碳源利用特性[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(1): 123-127.
- Hang C Q, Wei Z F, Lin R, *et al.* Character of carbon source in denitrification and phosphorus removal system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(1): 123-127.
- [22] 彭永臻, 吕冬梅, 王淑莹. 进水 COD 及投加方式对 A²O-BAF 工艺反硝化聚磷的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2016, **42**(9): 1406-1413.
- Peng Y Z, Lv D M, Wang S Y. Effects of feed water COD and different adding ways of COD on denitrifying phosphorus removal of A²O-BAF Process [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, **42**(9): 1406-1413.
- [23] 曹贵华, 王淑莹, 彭永臻, 等. 流量分配比对改良 A/O 分段进水脱氮除磷特性的影响[J]. *化工学报*, 2012, **63**(4): 1249-1257.
- Cao G H, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Effect of inflow distribution ratio on N and P removal in modified A/O step-feed process[J]. *CIESC Journal*, 2016, **63**(4): 1249-1257.
- [24] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions pH influence and occurrence of denitrifying dephosphatation in a full-scale waste water treatment plant [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(12): 75-82.
- [25] 苏婉琳, 韩萍芳. 传统厌氧/好氧生物除磷与厌氧/缺氧反硝化除磷效能的比较[J]. *生物加工过程*, 2011, **9**(6): 49-53.
- Su W L, Han P F. Comparison between traditional biological phosphorus removal by anaerobic/aerobic and denitrifying phosphorus removal by anaerobic/aerobic[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2011, **9**(6): 49-53.
- [26] 丁彩娟, 吉芳英, 高小平, 等. A/ASBR 中 PHB 转化与反硝化吸磷的关系研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, **27**(3): 80-84.
- Ding C J, Ji F Y, Gao X P, *et al.* Study of the correlation between the transformation of PHB and denitrifying phosphorus absorption in A/ASBR [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2005, **27**(3): 80-84.
- [27] 张自杰. 排水工程-下册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [28] 李宁. 分段进水 A/O 工艺处理高氨氮城镇生活污水试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- Li N. Research on high-ammonia nitrogen domestic wastewater treatment by step-feed A/O Process [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [29] 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 Science*, 2017, **49**(2): 240-247.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)