ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 12 期
2018 年 12 月 15 日

目 次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征…… 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 $PM_{2.5}$ 时空变化分析 …… 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制 …… 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 …… 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征 …… 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成 …… 李霞, 苏伟健, 黎碧霞,龙淼, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征 …… 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征 …… 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征 …… 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征 …… 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 …… 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N_2O 间接排放特征 …… 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N_2O 浓度、释放通量与排放系数 …… 王淼, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析:以会仙湿地为例 …… 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 时空分布特征:以重庆市中梁山岩溶槽谷为例 …… 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 …… 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 …… 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 …… 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价 …… 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 …… 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南瓮河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 …… 周心劝, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯淹水释放特征 …… 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化 …… 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 …… 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 …… 王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)的分布特征及影响因子分析 …… 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 …… 尤雯, 刘海成, 曹家炜, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 …… 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 …… 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 …… 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 …… 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 …… 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 …… 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 …… 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 …… 付昆明, 付巢, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 …… 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文烨, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 …… 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 …… 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 …… 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型砷渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 …… 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 …… 辛胜林,梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析 …… 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 … 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 …… 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 … 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 …… 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 …… 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO_2 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 …… 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 …… 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 …… 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录 …… (5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)

多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制

王帆[1,2], 李军[1*], 边德军[2], 聂泽兵[2], 张莉[2], 孙艺齐[1]
(1. 北京工业大学建筑与土木工程学院, 北京 100124; 2. 长春工程学院, 吉林省城市污水处理重点实验室, 长春 130012)

摘要: 为探究进水流量分配比对低温城市污水脱氮效率的影响, 并解析多级 AO 耦合流离生化工艺脱氮规律, 实验采用三级 AO 耦合流离生化工艺, 在温度为(10 ± 1)℃、水力停留时间 8 h、气水比恒定的条件下处理模拟低 C/N 值城市污水. 系统依次在进水比 5∶4∶4(等容积负荷)、3∶2∶1(等停留时间)和 25∶15∶6(等污泥负荷)这 3 种工况下运行. 结果表明, 该工艺对低温低 C/N 值污水的处理效果较好, 其中在进水比为 3∶2∶1的工况下脱氮效率最高, COD、NH_4^+-N和 TN 平均去除率分别为 87.44%、96.63%和 76.81%. 进一步对氮的迁移转化规律进行研究发现, 制约工艺低温脱氮的主要因素为各级硝化效率, 3∶2∶1的进水比合理地分配了进水负荷, 各级硝化率均超过 85%, 为反硝化创造了有利条件, 最终获得了较高的脱氮效率, 此时系统也具有最高的总生物量. 研究结果丰富了多级 AO 耦合工艺低温脱氮理论, 同时为工程设计应用提供参考.

关键词:低温; 活性污泥; 生物膜; 耦合工艺; 生物脱氮
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)12-5572-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201805114

Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process

WANG Fan[1,2], LI Jun[1*], BIAN Dei-jun[2], NIE Ze-bing[2], ZHANG Li[2], SUN Yi-qi[1]
(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Jilin Key Laboratory of Urban Sewage Treatment, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: To explore the influence of the influent flow distribution ratio on the denitrification efficiency of low-temperature urban wastewater and analyze the denitrification of multi-level AO coupled flow biochemical process, three-level AO-coupled biofilm technology was used to treat simulated low-C/N urban sewage at a temperature of 10℃ ± 1℃, hydraulic retention time of 8 h, and constant air – water ratio. The reactors were operated under three conditions of inlet water ratios of 5∶4∶4 (equal volume load), 3∶2∶1 (equal hydraulic retention time), and 25∶15∶6 (equal sludge load). The study showed that the multi-level AO-coupled displacement biochemical process has a good removal efficiency with respect to low-temperature and low-C/N wastewater. The pollutant removal efficiency is the highest when the ratio of the influent is 3∶2∶1 and the average removal rates of COD, NH_4^+-N, and TN are 87.44%, 96.63%, and 76.81%, respectively. Further studies on the law of nitrogen migration and transformation showed that the main factors constraining the nitrogen removal under three conditions were the nitrification efficiency at each levels, the ratio of 3∶2∶1 influent reasonably distributing the influent load, and the nitrification efficiency at each level exceeding 85%, creating favorable conditions for denitrification and leading to a higher denitrification efficiency, while the system has the highest total biomass. The research results enrich the theory of multi-level AO cryogenic removal of nitrogen and provide references for engineering designs and applications.

Key words:low temperature; activated sludge; biofilm; coupling process; biological denitrification

低温是目前污水生物处理的难题, 其会严重影响微生物的生长活性, 这其中包括硝化及反硝化细菌. 杨小丽等[1]研究发现, 温度每降低 1℃, 硝化菌比增长速率以及反硝化速率分别降低 10% 和 9%. 与此同时, 由于城市污水的含氮量增加, 出现了低 C/N 值的现象[2,3]. 采用传统工艺处理低 C/N 值城市污水时, 因反硝化碳源不足使得脱氮效率变低[4]. 受低温、低 C/N 值的影响, 许多污水厂在冬季会出现NH_4^+-N、TN 超标的现象[5]. 这不仅影响污水处理厂的正常运营, 更会对环境造成严重危害. 因此, 低温高效脱氮工艺的研发具有十分重要的意义.

从目前已有的城市污水处理厂改、扩建工程中发现, 向生物池中投加悬浮填料可以明显强化其在低温下的脱氮能力[6]. 填料的加入, 一方面能够提高系统的生物量, 延长污泥停留时间, 使低温弱势菌种硝化菌的浓度得到提高; 另一方面, 附着于填料表面的生物膜内部为厌氧或缺氧状态, 可以进行反硝化作用[7], 因此投加填料是改善低温脱氮的有效手段

收稿日期: 2018-05-14; **修订日期**: 2018-05-24
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-011); 吉林省科技发展计划项目(20180201020SF, 20180101316JC)
作者简介: 王帆(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市污水处理, E-mail:ccwangfan@163.com
* 通信作者, E-mail:bjutlijun@126.com

之一. 同时，多级 AO 工艺是近年来蓬勃兴起的一种污水生物处理工艺，其具有污泥浓度高、负荷均衡、能耗低、抗冲击负荷能力强[8,9]等优点，这些也为低温脱氮提供了便利. 而且多级 AO 工艺的另一个重要的特点是分散进水. 原水分散从缺氧区进入反应系统，使其可充分利用原水碳源进行反硝化，提高 TN 去除效率[10~13]，有效降低低 C/N 值带来的不利影响. 然而原水分段进入也为工艺的运行管理增添了麻烦，如何合理地分配进水成为了保障工艺高效运行的重点和难点. 许多专家学者都为此做了大量的工作，并取得了一系列重要的研究成果[14,15].

本研究以强化低温、低 C/N 值城市污水脱氮为目的，参照上述思路，采用三级 AO 耦合流离生化工艺处理低温模拟城市污水，通过对比分析了 3 种流量分配比下耦合工艺的污染物去除效率及氮的迁移转化规律，以期为多级 AO 耦合流离生化工艺的实际应用提供参考.

1　材料与方法

1.1　实验装置

本实验装置主体为有机玻璃板制成的三级 AO 反应器(图 1)，各级单独制作，每级长、宽和高分别为 600、200 和 400 mm，三级总有效容积 126 L. 各级沿池长方向分别设置 Ax1、Ax2、Ox1、Ox2 这 4 个格室(x 为 1、2、3)，各格室的有效池容比为 3∶3∶4∶4，二沉池为竖流式，有效容积 54 L. 实验在低温控制室内进行，控制风机启停温度分别为 9.5℃和 12℃，实测水温为(10 ± 1)℃. 使用空气压缩机对好氧区进行曝气，并用转子流量计对各级曝气量进行控制. 进水和回流用蠕动泵控制，缺氧区用电动搅拌机进行搅拌.

实验选用的流离球为内部填充 K3 型填料以及海绵填料的组合填料. K3 填料的材质为高密度聚乙烯，形状为 Φ 25 mm × 10 mm 的圆柱形，密度为 0.95 g·cm^{-3}，比表面积大于 560 m^2·m^{-3}；并具有良好的通气性和过水性、填料内部不易堵塞等优点[16]. 海绵填料材质为亲水性聚氨酯，形状为边长 30 mm 的立方体，密度 16 ~ 17 kg·m^{-3}，比表面积 3.8 × 10^{5}m^2·m^{-3}；具有孔隙率高，加快微生物高效稳定的附着等优点[17]. 流离球网罩为尺寸 Φ = 100 mm 的网状球体，材质为聚丙烯. 依据低温流离球内部填充率对脱氮影响的小试研究结果，确定流离球内部填充 5 个 K3 填料和 5 个海绵填料，内部填充率为 30.5%.

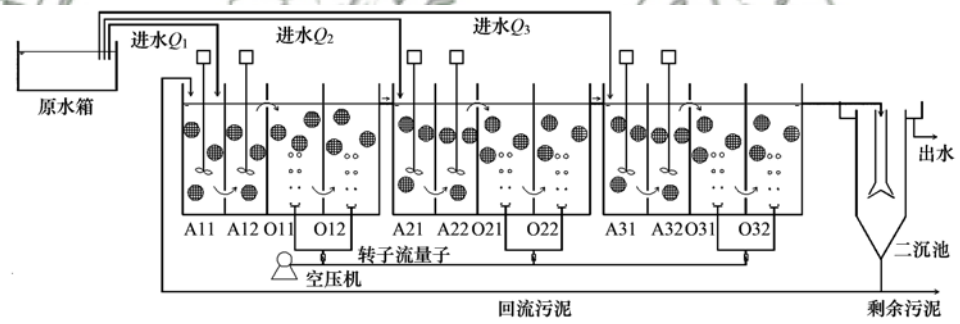

图 1　实验装置示意

Fig. 1　Schematic diagram of the test device

1.2　实验水质

本实验用水为模拟城市污水，配制前将存有自来水的储水桶放置在低温控制室内晾置 1 d，避免残留的氯气以及水温对实验产生影响. 配水使用的药剂为可溶性淀粉、牛肉膏、蛋白胨、乙酸钠(CH_3COONa)、氯化铵(NH_4Cl)、硝酸钾(KNO_3)、磷酸二氢钾(KH_2PO_4)、碳酸氢钠($NaHCO_3$)、氢氧化钠(NaOH). 药剂纯度均为分析纯，采购自天津市光复科技发展有限公司. 运行期间配水详细水质参数见表 1，C/N 值变化范围为 5.79 ~ 8.67，平均值为 6.58.

表 1　实验用水水质

Table 1　Test water quality

水质指标	浓度范围	平均值
COD/mg·L^{-1}	180.6 ~ 269.4	219.07
TN/mg·L^{-1}	21.76 ~ 40.28	32.33
NH_4^+-N/mg·L^{-1}	10.15 ~ 19.48	15.57
NO_3^--N/mg·L^{-1}	8.67 ~ 13.45	9.68
TP/mg·L^{-1}	2.26 ~ 5.57	3.41
pH	6.98 ~ 7.53	7.13

1.3　检测方法

(1)常规指标　COD、NH_4^+-N、TN、TP、MLSS、MLVSS 等的测定均参照文献[18]的方法. pH 检测

使用上海雷磁生产的 PHSJ-4A 酸度计；温度及溶解氧(dissolved oxygen，DO)使用德国 WTW 生产的 Oxi3310 便携式溶解氧仪检测；NO_3^--N采用离子色谱检测.

(2)膜生物量的测定　随机选取一个流离球填料，拆开后，将海绵及 K3 填料分开浸泡在超纯水中，洗去可逆附着成分，然后在 70～80℃条件下烘干 6 h，称得重量 M_1，然后将填料置于 0.1 mol·L^{-1} 的 NaOH 碱液中超声波洗脱 30 min，再机械剥离处理，用超纯水反复洗净，同样再次烘干 6 h，称得重量 M_2，二者之差除以填料的个数即为单个海绵或 K3 填料上的生物量[19]. 本实验将烘干温度降低并延长烘干时间原因是 K3 型填料为高密度聚乙烯填料，长时间高温易变形分解.

1.4　培养及启动运行

本实验于冬季开始，取长春市某污水处理厂的低温活性污泥，装填于反应器内，并使污泥浓度在 5 000 mg·L^{-1}左右. 当反应器调试完毕后，即投放流离球填料，好氧和缺氧区的填料填充率分别为 13.04% 和 17.43%. 实验装置置于低温控制室内，通过调节室温来控制水温为(10±1)℃. 采用连续闷曝的方式进行挂膜培养，两周后开始按进水比 5∶4∶4进水，逐步提高进水流量，在达到进水负荷且 COD 和NH_4^+-N去除率分别达到 80% 以上，培养结束[20].

合理地分配进水是保证耦合工艺高效脱氮的前提. 本实验设定水力停留时间为 8 h，依次在流量分配比为 5∶4∶4、3∶2∶1和 25∶15∶6这 3 种工况下运行. 进水用 3 台蠕动泵控制，将进水按比例泵入各级的首端缺氧池. 3 种流量分配比分别按照等容积负荷、等停留时间、等污泥负荷来计算，其中由上一级流入下一级的有机物按上一级进水的 20% 计算，等污泥负荷三级的活性污泥浓度采用5 000∶4 000∶3 000(单位：mg·L^{-1})来计算，污泥浓度参数来源于前期的培养阶段. 回流用 1 台蠕动泵控制，回流比为 50%. 剩余污泥每天由二沉池底部定量排出，控制污泥龄为 43 d. 反应器总曝气量为 6 L·min^{-1}，各级曝气量比例与进水比例相同，以保证 3 种工况下各级气水比的一致性.

1.5　计算方法

(1)3 种工况流量分配比的计算

Run1(等容积负荷)：

$$\frac{Q_1 \times S}{V} = \frac{0.2Q_1 \times S + Q_2 \times S}{V} = \frac{0.2Q_1 \times S + 0.2Q_2 \times S + Q_3 \times S}{V}$$

Run2(等停留时间)：

$$\frac{Q_1}{3V} = \frac{Q_2}{2V} = \frac{Q_3}{V}$$

Run3(等污泥负荷)：

$$\frac{Q_1 \times S}{5\,000} = \frac{0.2Q_1 \times S + Q_2 \times S}{4\,000} = \frac{0.2Q_1 \times S + 0.2Q_2 \times S + Q_3 \times S}{3\,000}$$

式中，Q_1、Q_2、Q_3 分别为三级的进水流量，L·d^{-1}；S 为进水有机物浓度，g·L^{-1}；V 为单级 AO 池的有效容积，L.

(2)格室各污染物去除总量(T_i)的计算

$$T_i = Q_{infi} \times S_1 - Q_{effi} \times S_2$$

式中，T_i 为各格室污染物去除总量，g·d^{-1}；Q_{infi}为进入格室的流量，L·d^{-1}；Q_{effi}为格室流出的流量，L·d^{-1}；S_1、S_2 分别为流入和流出格室的污染物浓度，g·L^{-1}.

(3)各级硝化率的计算

为了分析各级硝化效果，实验测定了各级好氧末端NH_4^+-N浓度，以此作为各级出水NH_4^+-N，结合流入各级NH_4^+-N的总量，计算各级硝化率，从而反映各级的硝化情况. 具体计算公式如下：

$$I_1 = \frac{Q_1 \times C_{inf} + (Q_1 + Q_{回}) \times C_{eff1}}{Q_1 \times C_{inf}} \times 100\%$$

$$I_2 = \frac{(Q_1 + Q_{回}) \times C_{eff1} + Q_2 \times C_{inf} - (Q_1 + Q_2 + Q_{回}) \times C_{eff2}}{(Q_1 + Q_{回}) \times C_{eff1} + Q_2 \times C_{inf}} \times 100\%$$

$$I_3 = \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_{回}) \times C_{eff2} + Q_3 \times C_{inf} - (Q_d + Q_{回}) \times C_{eff3}}{(Q_1 + Q_2 + Q_{回}) \times C_{eff2} + Q_3 \times C_{inf}} \times 100\%$$

式中，I_i 为各级硝化率；Q_i 为各级流量，L·d^{-1}；C_{inf}为进水NH_4^+-N浓度，mg·L^{-1}；C_{effi}为各级出流NH_4^+-N浓度，mg·L^{-1}；$Q_{回}$ 为回流流量，L·d^{-1}且 $Q_{回} = Q_d \times 50\%$；Q_d 为日进水量，L·d^{-1}，且 $Q_d = Q_1$

$+Q_2+Q_3$；其中 i 为 1、2、3.

2　结果与讨论

2.1　污染物去除结果与分析

2.1.1　对 COD 的去除

图 2 是 3 种工况下反应器稳定运行时期的 COD 去除效果，其中 Run1、Run2、Run3 分别代表流量分配比 5∶4∶4、3∶2∶1 和 25∶15∶6 这 3 种工况. 从中可以看出，不同工况稳定运行时 COD 的去除效果均良好，平均去除率分别为 89.11%、87.44%、85.08%，同时出水 COD 浓度均在 50 mg·L^{-1}以下，达到一级 A 排放标准. 这一结果与王伟等[21]和曹贵华等[22]的研究成果基本一致. COD 去除结果表明，低温下耦合工艺对有机物的去除效果良好且能长期稳定，同时 3 种工况下系统对有机物的去除差异较小.

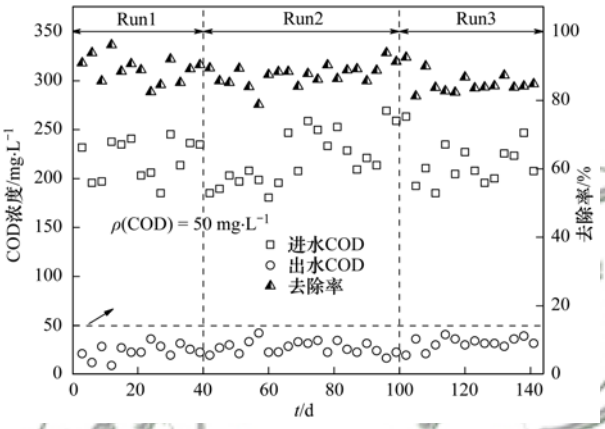

图 2　各工况 COD 去除结果

Fig. 2　COD removal results under each operating condition

2.1.2　对NH_4^+-N的去除

图 3 为 3 种工况下反应器稳定运行时期的NH_4^+-N去除效果. 从中可以看出，3 种工况下反应器对NH_4^+-N去除效率均较高，其中 Run1 和 Run3 出水NH_4^+-N 略有波动，Run2 最为稳定，出水NH_4^+-N浓度基本保持在 0.5 mg·L^{-1}以下. 3 种工况NH_4^+-N 平均去除率分别为 95.51%、96.63%、93.11%. 耦合工艺在低温下获得优异的硝化效率有多方面的原因，首先多级 AO 工艺具有污泥截留功能，相比其他工艺可以维持较高污泥浓度，使得活性污泥的停留时间加长，有利于硝化菌的富集和繁殖；其次悬浮填料的加入为硝化菌提供了附着生长环境，使得硝化菌的数量进一步增加[23].

2.1.3　对 TN 的去除

图 4 是 3 种工况下反应器稳定运行时期的 TN

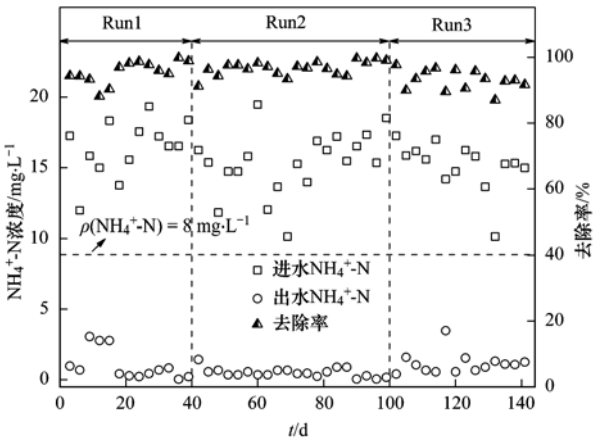

图 3　各工况NH_4^+-N去除结果

Fig. 3　NH_4^+-N removal results under each operating condition

去除效果. 3 种工况下 TN 的平均去除率分别为 64.09%、76.81%、68.26%，三者差异明显，Run2 的脱氮率最高. 生物脱氮过程一般是首先利用自养菌硝化随后进行异养反硝化[24]，通过前面的分析知，反应器在 3 种工况稳定运行期间NH_4^+-N去除效果良好，使得 TN 去除产生差别的原因是各工况反硝化效果不同. 影响耦合工艺反硝化效果有以下 3 个方面：①碳源的分配与利用；②各级硝化产生NO_x^--N 的量；③缺氧区的总生物量[25]. 因此，为进一步探究耦合工艺的脱氮规律，有必要对脱氮过程做进一步地研究分析.

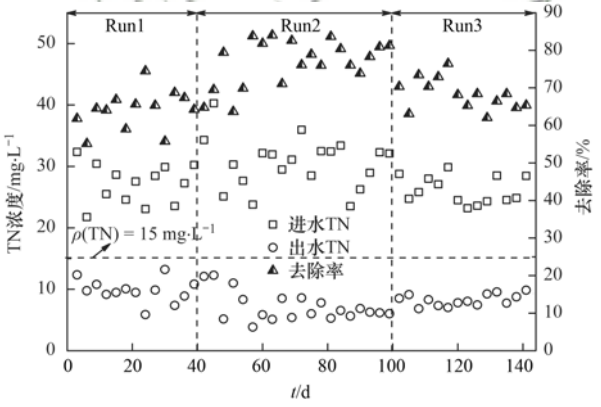

图 4　各工况 TN 去除结果

Fig. 4　TN removal results under each operating condition

2.2　脱氮过程分析

2.2.1　沿程分析

图 5 为 3 个工况下稳定运行时 COD 的沿程情况，从中可以看出，COD 浓度在各级 4 个格室间呈下降趋势，说明 3 个工况各级反硝化碳源相对充足. 格室污染物去除量依据物料守恒进行计算. 3 个工况缺氧区有机物消耗的总量为 52.30、62.56 和 51.64 g·d^{-1}，分别占有机物总去除量的

78.65%、81.48% 和 80.17%. 缺氧区有机物消耗量越大，则相对地有更多有机物被用于反硝化和厌氧释磷作用，从而提高碳源有效利用率；同时也可以降低流入好氧区的有机物浓度. 较少的有机物进入好氧区可以促进好氧区硝化菌的生长和繁殖[26]，有机物的缺乏会使大部分好氧微生物生长活动减缓慢甚至停止，而对于自养型硝化细菌的影响较小. 从各工况缺氧区有机物的消耗比例来看，Run2 对碳源的分配稍好于 Run1 和 Run3.

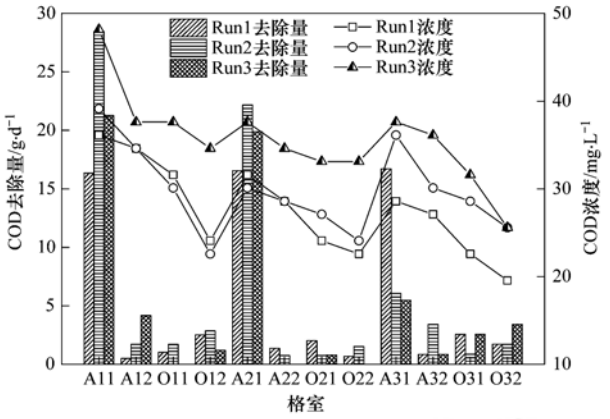

图5 各工况下 COD 沿程变化及去除量

Fig. 5 COD removal and changes under each operating condition

图6是3个工况下稳定运行时NH_4^+-N的沿程情况，从沿程各格室NH_4^+-N的浓度看出，两相邻缺氧格室之间NH_4^+-N浓度略有下降，分析原因是缺氧区内发生了氨的同化作用. Run2 的NH_4^+-N浓度自第一级后低于 Run1 和 Run3，分析原因是 Run2 的NH_4^+-N在前一级好氧区被硝化得较为完全，使得其在后续过程中表现为浓度偏低，Run1 和 Run3 由于NH_4^+-N的不完全去除，导致后续发生了NH_4^+-N的积累，从而浓度偏高. 尽管最终三者的出水NH_4^+-N浓度均在 1.0 mg·L^{-1}以下，但 Run1 和 Run3 更多的NH_4^+-N在第三级被硝化，而没有后续缺氧区，使得出水 TN 较高.

图7是3种工况下稳定运行时 TN 的沿程情况，从各格室 TN 去除量可以发现，各工况在第二级缺氧段 TN 去除量最大，说明该区域为耦合工艺脱氮的主要场所. 由于首段进水NO_x^--N在第一级缺氧区被大量去除，因此第二级缺氧段反硝化去除的NO_x^--N主要来源于第一级好氧区以及第二级进水. 各工况第二级进水流量分别为 116.31、126 和 123.26 L·d^{-1}，其在提供碳源以及对NO_x^--N浓度的影响上相差不大. 影响该区域 TN 去除量的主要因素为第一级的硝化作用，结合NH_4^+-N去除规律，各

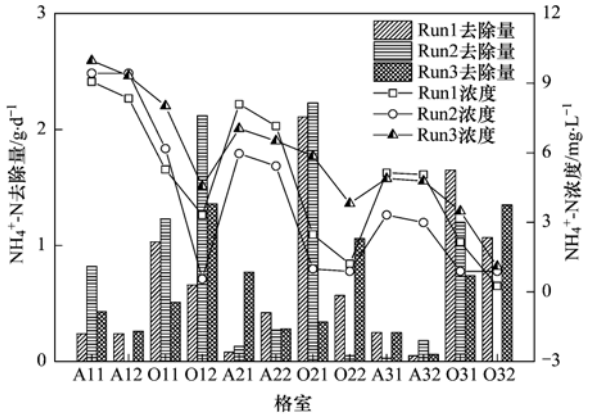

图6 各工况下NH_4^+-N沿程变化及去除量

Fig. 6 NH_4^+-N removal and changes under each operating condition

工况第一级好氧区NH_4^+-N去除量分别为 1.69、3.35 和 1.88 g·d^{-1}，而第二级缺氧区反硝化去除的 TN 量分别为 1.79、3.71 和 2.72 g·d^{-1}，第一级好氧区NH_4^+-N的去除量与第二级缺氧区反硝化脱氮量呈正相关. 此结果表明各级硝化效果会对 TN 的去除产生影响.

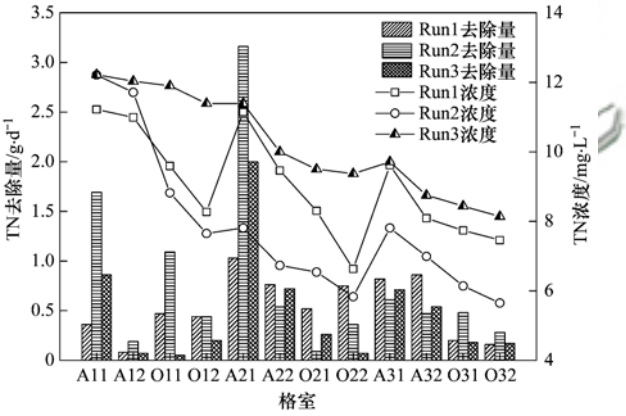

图7 各工况下 TN 沿程变化及去除量

Fig. 7 TN removal and changes under each operating condition

2.2.2 各级硝化结果分析

为进一步解析硝化效率对耦合工艺脱氮的影响，图8给出了各工况三级好氧末端的NH_4^+-N浓度，从中可以看出 Run1 和 Run3 在前两级有NH_4^+-N的累积，而 Run2 的各级末端的NH_4^+-N浓度都较低. 分析 Run1 原因是曝气量随着进水比例的调整，第一级曝气量偏小，对水流的搅拌作用较弱，致使氧传质效率变差，从而影响了NH_4^+-N的降解，而后续曝气量虽然充足，但由于上一级积累的NH_4^+-N的进入，使得NH_4^+-N在该级也不能被充分硝化；Run3 则是由于首段进水量过大，尽管曝气量相应提高，但第一级的水力停留时间不足，同时进水量大也使NH_4^+-N负荷增加，从而影响了硝化效率.

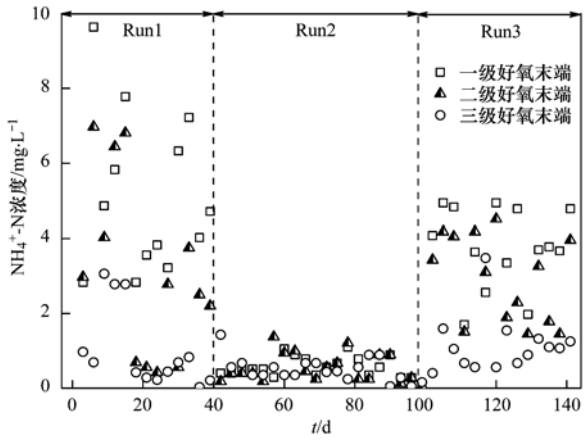

图 8　各工况下反应器各级好氧末端NH_4^+-N浓度

Fig. 8　Ammonia-terminated NH_4^+-N concentrations at various stages of the reactor under each operating condition

为具体说明，依据物料守恒计算了各级的硝化率，结果详见表 2. 从中可知，Run2 各级的硝化率均较高且稳定，各级的硝化率均在 85% 以上；Run1 和 Run3 仅在第三级硝化效率较高，而在前两级硝化率偏低. 各级硝化结果表明，Run1 和 Run3 脱氮较差的主要原因是在前两级发生了NH_4^+-N的积累. 在工程设计生物除氮系统中，通常硝化作用被认为是关键因素[27]，Run2 中合理地分配了NH_4^+-N负荷以及各级曝气量，获得了较好的硝化率，从而获得了较高的脱氮效率，这与前面讨论的结果相一致.

2.2.3　污泥特性分析

图 9 为 3 个工况稳定运行时的沿程污泥浓度以及膜生物量. 从中可以看出，活性污泥浓度随沿程呈逐渐降低的趋势，同时 3 个工况总的活性污泥浓度基本相同，在水力停留时间、气水比、进水水质、污泥龄等基本相同的情况下，活性污泥浓度变化较小.

尽管 3 种工况下的活性污泥浓度基本相同，但从膜生物量的沿程结果可以看出，三者的差异明显. 从缺氧生物膜量上看，Run2 各格室均最高. 分析可知，Run2 三级的硝化率均最高，则由上一级进入的NO_x^--N相对于其他工况含量也较高，充足的底物可以促进反硝化细菌的繁殖，进而一定程度上促进生物膜量的增长. 在第三级，由于活性污泥浓度含量最低，从而有利于生物膜生长. 同时，各工况最后一级的硝化均较好，这一现象表明耦合工艺的生物膜在保证硝化效果以及NH_4^+-N达标上起着十分重要的作用.

综上分析，因为硝化和反硝化均需要时间，采用等停留时间的方式来调控进水比，由于停留时间的均匀分配，经过一段时间的培养后，各级进水都

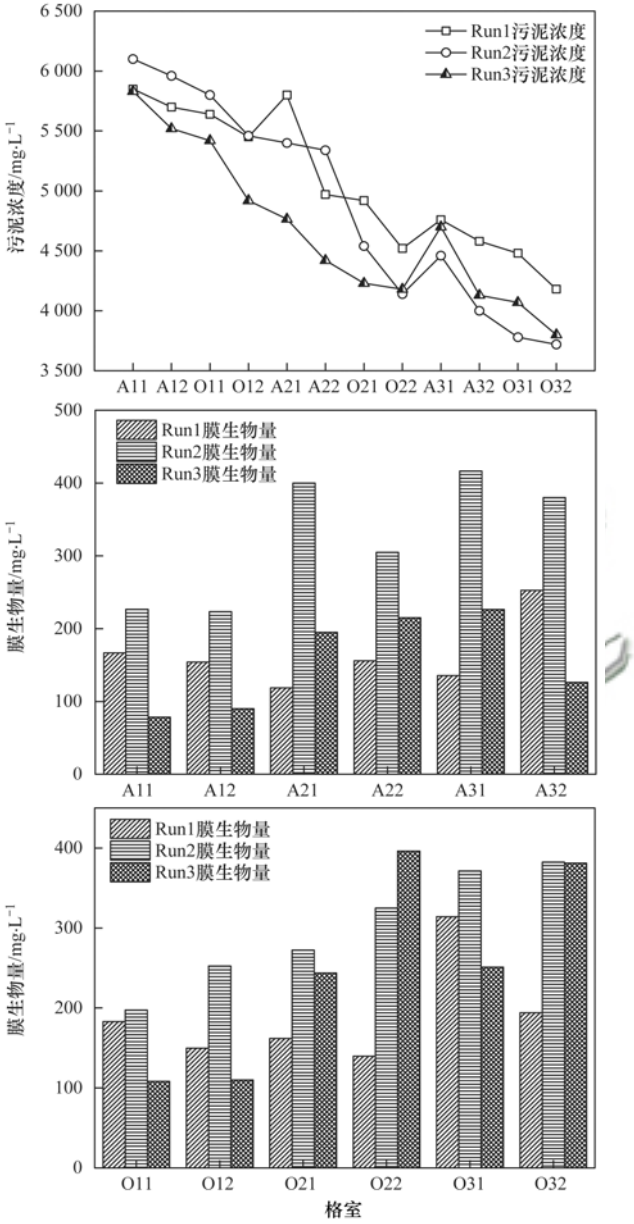

图 9　各工况下污泥浓度和膜生物量的沿程变化

Fig. 9　Changes of the sludge concentration and membrane biomass under each operating conditions

表 2　各工况下反应器各级好氧区硝化效率

Table 2　Nitrification efficiency of the aerobic zone in various reactor stages under each operating conditions

工况	Run1		Run2		Run3	
	平均硝化率/%	方差	平均硝化率/%	方差	平均硝化率/%	方差
一级	47.72	26.96	87.52	9.78	58.75	15.29
二级	68.47	18.30	91.55	6.97	65.92	20.58
三级	84.83	16.07	88.58	4.37	87.89	12.61

能得到良好地降解效果，污染物去除效果较好. 在其他条件均相同而仅改变进水比例时，活性污泥浓变化较小，此时采用负荷的方式来调节进水比例存在一些局限.

3 结论

(1)本实验采用三级 AO 耦合生物膜工艺，在温度为(10 ± 1)℃、水力停留时间 8 h、气水比恒定的条件下处理模拟的低 C/N 值城市污水. 反应器依次在进水比 5∶4∶4、3∶2∶1和 25∶15∶6这 3 个工况下运行，结果表明，Run2 脱氮效果最佳，平均 COD、NH_4^+-N、TN 去除率分别为 87.44%、96.63%、76.81%.

(2)通过对 3 个工况脱氮过程研究发现，各级硝化作用是影响低温耦合工艺脱氮的主要因素，Run2 合理地分配了NH_4^+-N负荷，各级硝化率均在 85%以上，从而获得了较好的脱氮效果.

(3)采用等停留时间分配各级进水流量的方式，为反硝化提供了充足的NO_x^--N，充足的底物促进反硝化细菌的繁殖，提高了系统缺氧区的膜生物量.

参考文献：

[1] 杨小丽，叶峰，宋海亮，等. 基于污水厂运行数据的低温生物脱氮强化研究[J]. 中国给水排水，2009，**25**(1)：82-85，88.
Yang X L，Ye F，Song H L，*et al*. Enhanced biological nitrogen removal at low-temperature based on operation data of wastewater treatment plants[J]. China Water & Wastewater，2009，**25**(1)：82-85，88.

[2] 周彦. 自生生物动态膜反应器处理高氨氮、低碳氮比污水的研究[D]. 武汉：华中科技大学，2006.
Zhou Y. Research on high ammonia nitrogen content and low C/N sewage by self-forming bio-dynamic membrane reactor[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2006.

[3] 邱兆富，周琪，杨殿海，等. 低碳氮比城市污水短程生物脱氮试验研究[J]. 工业水处理，2006，**26**(11)：35-38.
Qiu Z F，Zhou Q，Yang D H，*et al*. Short-cut nitrification and denitrification of low C/N ratio municipal wastewater in a pilot-scale research[J]. Industrial Water Treatment，2006，**26**(11)：35-38.

[4] 马秀兰. SBR 法生物强化处理低温低 C/N 比污水的研究[D]. 长春：吉林大学，2010.
Ma X L. Biological enhanced treatment of wastewater with low C/N ratio in the sequencing batch reactor at low temperature[D]. Changchun：Jilin University，2010.

[5] 金羽. 温度对 A^2/O 系统的影响特征及脱氮除磷强化技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.
Jin Y. Effection of temperature on the performance of an A^2/O process and enhancement of nitrogen and phosphorus removal [D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2013.

[6] 王伟，王淑莹，孙亚男，等. 流量分配对分段进水 A/O 工艺脱氮性能的影响[J]. 环境科学，2009，**30**(1)：96-101.
Wang W，Wang S Y，Sun Y N，*et al*. Effects of influent flow distribution ratio on nitrogen removal in step-feed A/O process [J]. Environmental Science，2009，**30**(1)：96-101.

[7] 张鹭. 西安市第五污水处理厂升级改造工艺研究及运行效果分析[D]. 西安：长安大学，2014.
Zhang L. Analysis and research on runing effect of the upgrading and reconstruction in Xi'an fifth sewage treatment plant[D]. Xi'an：Chang'an University，2014.

[8] 葛士建，彭永臻. 连续流分段进水工艺生物脱氮除磷技术分析及优化控制[J]. 环境科学学报，2009，**29**(12)：2465-2470.
Ge S J，Peng Y Z. Analysis and optimization control of the continuous step feed biological nitrogen and phosphate removal process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2009，**29**(12)：2465-2470.

[9] 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.

[10] Ge S J，Peng Y Z，Qiu S，*et al*. Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process[J]. Water Research，2014，**55**：95-105.

[11] 邱慎初，丁堂堂. 分段进水的生物除磷脱氮工艺[J]. 中国给水排水，2003，**19**(4)：32-36.
Qiu S C，Ding T T. Step Feed biological phosphorus and nitrogen removal process[J]. China Water & Wastewater，2003，**19**(4)：32-36.

[12] Görgün E，Artan N，Orhon D，*et al*. Evaluation of nitrogen removal by step feeding in large treatment plants[J]. Water Science & Technology，1996，**34**(1-2)：253-260.

[13] Larrea L，Larrea A，Ayesa E，*et al*. Development and verification of design and operation criteria for the step feed process with nitrogen removal[J]. Water Science & Technology，2001，**43**(1)：261-268.

[14] Chen J Y，Lin Y，Zhang Z，*et al*. Effect of different influent flow distribution ratios on multistage A/O process for removal of carbon and nitrogen[J]. Asian Journal of Chemistry，2014，**26**(3)：709-713.

[15] Zhu G B，Peng Y Z，Wu S Y，*et al*. Automatic control strategy for step feed anoxic/aerobic biological nitrogen removal process [J]. Journal of Environmental Sciences，2005，**17**(3)：457-459.

[16] 董滨，金波，何群彪，等. 关于污水处理领域悬浮填料产品的探讨[J]. 净水技术，2008，**27**(3)：57-60，64.
Dong B，Jin B，He Q B，*et al*. Discussion of suspended carriers used in wastewater treatment field[J]. Water Purification Technology，2008，**27**(3)：57-60，64.

[17] 徐文娟，江霜英. 方形与球形聚氨酯填料用于 MBBR 处理混合污水的研究[J]. 水处理技术，2013，**39**(9)：61-64.
Xu W J，Jiang S Y. Study on cubic and round polyurethane foam carriers for mixed sewage treatment in MBBR process[J]. Technology of Water Treatment，2013，**39**(9)：61-64.

[18] 国家环境保护总局. 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.

[19] 刘媛. MBBR 处理城镇污水的基础研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2007.
Liu Y. Study on moving bed biofilm reactor application in town wastewater treatment plant [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.

[20] 邹博宇. SBBR 污水处理系统氧化亚氮排放试验研究[D]. 重庆：重庆大学，2015.
Zou B Y. Experimental study on nitrous oxide emissions by sequencing biofilm batch reactor treating wastewater [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[21] 王伟，陈强，汪传新，等. 改良分段进水工艺处理低 C/N 值污水曝气量优化控制[J]. 中国给水排水，2015，**31**(17)：35-39.
Wang W, Chen Q, Wang C X, *et al*. Optimization control of aeration rate in modified step feed process for treating municipal sewage with low C/N[J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(17): 35-39.

[22] 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, 2012, **63**(4): 1249-1257.

[23] 李雅婕，潘峰，葛红光，等. 好氧移动床动态膜生物反应器中填料投加量的影响研究[J]. 水处理技术，2009，**35**(5)：57-59.
Li Y J, Pan F, Ge H G, *et al*. Study of the adding amount of carriers in the dynamic membrane-moving bed biofilm reactor [J]. Technology of Water Treatment, 2009, **35**(5): 57-59.

[24] Sun F Q, Sun B, Li Q, *et al*. Pilot-scale nitrogen removal from leachate by *ex situ* nitrification and *in situ* denitrification in a landfill bioreactor[J]. Chemosphere, 2014, **101**: 77-85.

[25] 王伟，陈强，汪传新，等. 改良分段进水工艺处理低 C/N 值污水内循环比优化[J]. 中国给水排水，2015，**31**(19)：48-52.
Wang W, Chen Q, Wang C X, *et al*. Optimization of inner cycle ratio in modified step feed process in treating municipal sewage with low C/N ratio[J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(19): 48-52.

[26] Peng Y Z, Ge S J. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(11): 6405-6413.

[27] Do H, Lim J, Shin S G, *et al*. Simultaneous effect of temperature, cyanide and ammonia-oxidizing bacteria concentrations on ammonia oxidation[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2008, **35**(11): 1331-1338.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 12

Dec. 15, 2018

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants ····· QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, *et al.* (5289)

Analysis of the Temporal and Spatial Variation of $PM_{2.5}$ in China Based on the LUR Model ····· LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)

Physiochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta ····· HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, *et al.* (5308)

Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing ····· YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, *et al.* (5315)

Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn ····· DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, *et al.* (5323)

Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China ····· LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, *et al.* (5334)

Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, *et al.* (5344)

Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process ····· WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, *et al.* (5359)

Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments ····· WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, *et al.* (5365)

Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China ····· LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, *et al.* (5375)

Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer ····· SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, *et al.* (5383)

Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River ····· TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)

Concentration, Flux, and Emission Factor of N_2O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features ····· WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, *et al.* (5400)

Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland ····· PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, *et al.* (5410)

Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City ····· WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, *et al.* (5418)

Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River ····· LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, *et al.* (5428)

Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River ····· LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, *et al.* (5440)

Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir ····· ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, *et al.* (5451)

Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir ····· ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, *et al.* (5464)

Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains ····· GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, *et al.* (5473)

Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains ····· ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, *et al.* (5480)

Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding ····· YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, *et al.* (5487)

Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plans in a Typical Tourism City ····· WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, *et al.* (5494)

Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions ····· JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, *et al.* (5503)

Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of *Conticribra weissflogii* ····· WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)

Distribution and Factors Affecting *Cylindrospermopsis raciborskii* in Guangdong Reservoirs ····· LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, *et al.* (5523)

Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide ····· YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, *et al.* (5532)

Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region ····· LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, *et al.* (5541)

Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process ····· GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, *et al.* (5550)

Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process ··· LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, *et al.* (5558)

Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions ····· WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, *et al.* (5565)

Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process ····· WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, *et al.* (5572)

High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitritation-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions ····· LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, *et al.* (5580)

Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria ····· GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, *et al.* (5587)

Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community ····· FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, *et al.* (5596)

Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process ····· CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, *et al.* (5605)

Characterization of a Newly Isolated Strain *Pseudomonas* sp. N3 for Denitrification at Low Temperature ····· LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)

Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments ····· WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, *et al.* (5620)

Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health ····· LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, *et al.* (5628)

Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site ····· LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, *et al.* (5639)

Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir ····· XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, *et al.* (5647)

Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions ····· LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, *et al.* (5657)

Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland ····· LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, *et al.* (5665)

Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO_2-Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field ····· BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, *et al.* (5672)

Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil ····· MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-ling, *et al.* (5680)

Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region ····· QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, *et al.* (5687)

Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill ····· LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, *et al.* (5699)

Effect of CO_2 Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios ····· TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, *et al.* (5708)

Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP ····· XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, *et al.* (5717)

Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China ····· LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)