Eco-Environmental Knowledge Web

生态知库

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎，丁琪琪，金苗，薛滨，张路，姚书春，王兆德，卢少勇，赵中华

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第42卷 第10期
2021年10月15日

目　次

$PM_{2.5}$化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 …… 蔡凡涛,尚玥,戴维,谢鸣捷(4575)
汾渭平原$PM_{2.5}$空间分布的地形效应 …… 黄小刚,赵景波,孙从建,汤慧玲,梁旭琦(4582)
华中地区冬季灰霾天气下$PM_{2.5}$中重金属污染特征及健康风险评价:以湖北黄冈为例 …… 李星谕,毛瑶,陈展乐,刘威杰,程铖,石明明,许安,苏业旺,胡天鹏,祁士华,邢新丽(4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 …… 黄禹,陈曦,王迎红,刘子锐,唐贵谦,李杏茹(4602)
成都市春季O_3污染特征及关键前体物识别 …… 韩丽,陈军辉,姜涛,徐晨曦,李英杰,王成辉,王波,钱骏,刘政(4611)
基于边界观测的长三角某工业区O_3来源特征 …… 黄晴,黄银芝,张珊,金丹,高松,修光利(4621)
廊坊开发区8~9月O_3污染过程VOCs污染特征及来源分析 …… 张敬巧,王宏亮,方小云,刘锐泽,丁文文,凌德印,王淑兰(4632)
广东省家具行业基于涂料类型的VOCs排放特征及其环境影响 …… 曾春玲,邵霞,刘锐源,姚懿娟,李银松,侯墨,刘洋,范丽雅,叶代启(4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 …… 徐超,吴水平,刘怡靖,钟雪芬(4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 …… 吴进,李琛,马志强,孙兆彬,韩婷婷,邱雨露,马小会,李颖若,朱晓婉(4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响 …… 朱燕,赵天良,白永清,徐家平,孙晓芸,胡未央,常嘉成,杨婕,朱从祯(4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 …… 杨柳,何晴,盛重义(4678)
长江流域主要干/支流水化学特征及外源酸的影响 …… 王琪,于爽,蒋萍萍,孙平安(4687)
土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 …… 连心桥,朱广伟,杨文斌,康丽娟,朱梦圆,许海(4698)
基于eDNA技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征 …… 梁东,夏军,宋进喜,常剑波,吴琼,程丹东,张怡暄,孔飞鹤,任源鑫(4708)
三亚市水体中PPCPs的污染水平、分布特征及生态风险评价 …… 任丙南,耿静(4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 …… 龚雄虎,丁琪琪,金苗,薛滨,张路,姚书春,王兆德,卢少勇,赵中华(4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 …… 杨文斌,段文秀,崔扬,朱广伟,吴天浩,许海,朱梦圆(4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 …… 张凯,辛蕊,李夙家,王倩,王亚南,许智恒,崔向超,魏巍(4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 …… 吕晓立,刘景涛,韩占涛,朱亮,张玉玺(4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 …… 王建,张华兵,许君利,彭俊(4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度 …… 周亚婷,陈兴宏,李立青,张伟军,张美一,王东升,王洪杰(4781)
硼酸和磷酸对PMS/Co^{2+}均相催化氧化有机物的影响因素与机制 …… 万琪琪,陈铸昊,曹瑞华,王静怡,文刚(4789)
磁性生物炭负载α-MnO_2活化过一硫酸盐降解2,2′,4,4′-四溴联苯醚 …… 李鑫,尹华,罗昊昱,欧阳晓芳,刘航,祝铭韩(4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体MS2的特性及机制 …… 张崇淼,杨昊明,王真(4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 …… 王光泽,曾薇,李帅帅(4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 …… 李冬,刘孟浩,张瑞苗,曾辉平,张杰(4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 …… 耿源濛,张传兵,张勇,黄豆豆,闫姝骁,孙腾飞,程柳,王静,毛宇翔(4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 …… 杨思航,秦泽生,梁漫春(4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 …… 秦彦荣,袁忠玲,张明,张民安,刘安迪,付雪,马娟,陈永志(4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 …… 周锋,刘勇弟,厉巍(4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 …… 赵小丽,刘子涵,从辰宇,韩剑桥(4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析 …… 陈亮,张西营,唐启亮,耿鋆,王二龙,李姜瑶(4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 …… 李梦婷,沈城,吴健,黄沈发,李大雁,王敏(4889)
广西都安县典型水田硒地球化学特征及影响因素 …… 刘飞,杨柯,徐仁廷,唐世琪(4897)
炭化苹果枝通过减少土壤DTPA-Cd降低苹果砧木镉积累和镉伤害 …… 邓波,荀咪,张玮玮,杨洪强(4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险 …… 杨剑洲,王振亮,高健翁,严慧,胡树起,唐世新,龚晶晶(4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析:基于Web of Science数据库检索 …… 苗苏,陈磊,左剑恶(4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 …… 张小红,陶红,王亚娟,马志义,周泽英(4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 …… 李斌绪,朱昌雄,宋婷婷,马金莲,张治国,李红娜(4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 …… 吕雪丽,赵永鹏,林清火,彭显龙,尹云锋,蒋先军(4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及*nirS*型反硝化细菌群落特征分析 …… 李玉倩,马俊伟,高超,霍守亮,夏星辉(4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构 …… 王秋颖,王娜,刘颖,陈功,何辉,高婕,庄绪亮,庄国强(4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 …… 南镇武,刘柱,代红翠,张磊,王娜,徐杰,刘开昌,孟维伟,王旭清(4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 …… 罗路云,金德才,王殿东,陈昂,张德咏,曾军,匡炜,张卓,刘勇(4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 …… 曹曼曼,王飞,周北海,陈辉伦,袁蓉芳(4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 …… 周慧,史海滨,张文聪,王维刚,苏永德,闫妍(5010)
水稻产量、稻田CH_4和N_2O排放对长期大气CO_2浓度升高的响应 …… 于海洋,宋开付,黄琼,王天宇,张广斌,马静,朱春梧,徐华(5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 …… 闫代红,马亚培,宋凯悦,马红亮,高人,尹云锋(5030)
中国84个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子 …… 李宇,周德成,闫章美(5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 …… 张万众,张彭义(5046)
《环境科学》征订启事(4814)　《环境科学》征稿简则(4871)　信息(4907,5009,5029)

生态环境知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第10期 2021年10月
Vol.42, No.10 Oct., 2021

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳

秦彦荣[1,2,3]，袁忠玲[1,2,3]，张明[1,2,3]，张民安[1,2,3]，刘安迪[1,2,3]，付雪[1,2,3]，马娟[1,2,3]，陈永志[1,2,3]*

（1. 兰州交通大学环境与市政工程学院，兰州 730070；2. 甘肃省黄河水环境重点实验室，兰州 730070；3. 甘肃省污水处理行业技术中心，兰州 730070）

摘要：采用 SBR-ASBR 组合工艺处理实际生活污水，SBR 中考察缺氧/好氧时间比及温度对部分亚硝化(partial nitritation，PN)的作用用，ASBR 中研究 COD/NO_2^--N(C/N)对厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation，ANAMMOX)协同反硝化脱氮除碳的影响。①控制温度为 25℃，在缺氧/好氧时间比为 30 min∶30 min，单周期交替 3 次时，NO_2^--N积累率(NiAR)于第 22 d 为 98.06%，比亚硝态氮产生速率(SNiPR，以 N/VSS 计)为 0.28 g·(g·d)$^{-1}$，同步硝化反硝化去除的 TN 和 COD 分别为 12.29 mg·L^{-1}和 110.36 mg·L^{-1}。②在缺氧/好氧时间比为 30 min∶30 min 下，温度为 15℃时，丝状菌大量繁殖，污泥活性和沉降性变差；温度为 30℃时，NH_4^+-N转化为NO_2^--N比例为 86.83%，造成出水NH_4^+-N浓度过低，不能为厌氧氨氧化提供合适基质浓度；温度为 25℃时，出水NH_4^+-N和NO_2^--N浓度分别为 31.58 mg·L^{-1}和 35.04 mg·L^{-1}，匹配厌氧氨氧化基质比。③组合工艺脱氮性能良好，出水 TN、NH_4^+-N和 COD 浓度分别稳定在 13.13、4.83 和 69.96 mg·L^{-1}，去除率分别为 83.10%、93.64% 和 75.11%。调节 ASBR 进水 C/N 为 2.5、2.0 和 1.5 时，C/N 为 2.0 时厌氧氨氧化协同反硝化脱氮除碳性能最佳，出水NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N和 COD 分别为 0.09、0.25、1.04 和 32.73 mg·L^{-1}。

关键词：间歇曝气；温度；部分亚硝化；厌氧氨氧化(ANAMMOX)；反硝化；C/N

中图分类号：X703.1 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2021)10-4853-11 **DOI**：10.13227/j.hjkx.202101229

Partial Nitritation and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage

QIN Yan-rong[1,2,3], YUAN Zhong-ling[1,2,3], ZHANG Ming[1,2,3], ZHANG Min-an[1,2,3], LIU An-di[1,2,3], FU Xue[1,2,3], MA Juan[1,2,3], CHEN Yong-zhi[1,2,3]*

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 3. Technical Center of Sewage Treatment Industry in Gansu, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A sequencing batch reactor-anaerobic sequencing batch reactor (SBR-ASBR) process was used to treat domestic sewage. In the SBR, the effects of the anoxic/aerobic time ratio and temperature on the realization of partial nitritation (PN) were investigated. In the ASBR, the effects of different COD/NO_2^--N (C/N) ratios on the removal of nitrogen and carbon using anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) and denitrification were studied. The results illustrated that: ① After three single cycles and on the 22nd day, the NO_2^--N accumulation rate (NiAR) was 98.06%, and the nitrate nitrogen generation rate (SNiPR, calculated as N/VSS) was 0.28 g·(g·d)$^{-1}$, and simultaneous nitrification and denitrification removal the TN and COD were 12.29 and 110.36 mg·L^{-1}, respectively (temperature = 25℃, anoxic/aerobic time ratio = 30 min : 30 min). ② At an anoxic/aerobic time ratio of 30 min : 30 min, the filamentous sludge bulked, the sludge activity decreased, and sludge settleability was poor at 15℃. Furthermore, the conversion rate of NH_4^+-N to NO_2^--N was 86.83%, indicating that the effluent NH_4^+-N concentration was too low to provide suitable matrix concentrations for ANAMMOX at 30℃. The effluent concentrations of NH_4^+-N and NO_2^--N were 31.58 mg·L^{-1} and 35.04 mg·L^{-1}, respectively, matching the ratio of the ANAMMOX substrate at 25℃. ③ The SBR-ASBR combined process showed good denitrification performance; the effluent TN, NH_4^+-N, and COD concentrations were stable at 13.13, 4.83, and 69.96 mg·L^{-1}, respectively, and the removal rates were 83.10%, 93.64%, and 75.11%, respectively. When the influent C/N of the ASBR was 2.5, 2.0, and 1.5, respectively, anaerobic ammonia oxidation and denitrification showed the best performance with respect to nitrogen and carbon removal with a C/N of 2.0. The effluent NH_4^+-N, NO_2^--N, NO_3^--N, and COD were 0.09, 0.25, 1.04, and 32.73 mg·L^{-1}, respectively.

Key words: intermittent aeration; temperature; partial nitritation; anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); denitrification; C/N

部分亚硝化-厌氧氨氧化(partial nitritation-anaerobic ammonium oxidation，PN/A)作为一种新型深度脱氮工艺具有效率高、能耗低和污泥产率低等优点，受到广泛关注[1~3]。PN/A 工艺是指部分亚硝化(PN)和厌氧氨氧化(ANAMMOX)反应分别在两个反应器中进行。在 SBR 反应器中，氨氧化菌(AOB)将原水中约 50%～60% 的NH_4^+-N转化为NO_2^--N，然后将其出水进入 ASBR 反应器，在厌氧氨氧化菌(AnAOB)的作用下，把NH_4^+-N和NO_2^--N转化为 N_2，其化学反应式如下[4]：

收稿日期：2021-01-25；**修订日期**：2021-03-28

基金项目：国家自然科学基金项目(51668033)；甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA126)；甘肃省高等学校特色专业-环境工程项目(101004)；甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2020C-38)；兰州交通大学天佑创新团队项目(TY202005)

作者简介：秦彦荣(1994～)，男，硕士研究生，主要研究方向为水污染控制理论与技术，E-mail：1249354392@qq.com

* 通信作者，E-mail：476411589@qq.com

$$NH_4^+ + 0.85O_2 \longrightarrow 0.442N_2 + 1.13H^+ + 0.113NO_3^- + 1.435H_2O$$

近年来,PN/A 工艺在高温条件下,成功应用于养殖业废水[5]、消化上清液[6]和垃圾渗滤液[7]等高NH_4^+-N(>500 mg·L^{-1})和低 C/N(<0.5)废水处理中,但该工艺在处理城市生活污水方面研究非常局限[8].城市生活污水由于NH_4^+-N浓度低,低NH_4^+-N条件下难以控制游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)等不利因素易导致 NOB 富集,使 PN 段出水硝酸盐增加,难以为 ANAMMOX 提供稳定NO_2^--N[9];另外城市生活污水水温受季节性影响较大[10],NOB 相比 AOB 对温度敏感性更强, AnAOB 活性随温度下降减幅明显,因此常低温下如何抑制 NOB 并提高 AnAOB 活性是 PN/A 工艺稳定运行的关键[11].陈亚等[12]的研究表明部分亚硝化的稳定运行对 ANAMMOX 影响较大;Miao 等[13]的研究在(30 ± 1)℃成功启动部分亚硝化系统;Yuan 等[14]的研究采用进水NH_4^+-N浓度为 50 mg·L^{-1}时,一体式部分硝化厌氧氨氧化(single-stage of partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation, SPN/A)工艺耦合反硝化工艺脱氮效果较好, TN 去除率为 83.50%.

以上研究均在温度较高条件下进行或采用模拟废水,在处理实际城市生活污水时,由于 SPN/A 工艺启动时间长、运行不稳定、微生物关系复杂和前端需特设除碳装置以避免对系统的冲击[15],而 PN/A工艺很好地解决了亚硝化和 ANAMMOX 污泥龄之间的矛盾[16],利于控制运行参数,具有可靠性高、启动时间短和脱氮效率高的优点[17],另外可利用 PN 段出水中带入少量污泥和 COD 使异养菌进行反硝化产生 CO_2,这为 ANAMMOX 协同反硝化脱氮除碳提供可能[18].因此,本试验以城市生活污水为处理对象,考察在常低温条件下缺氧/好氧时间比、交替次数、温度和 C/N 等因素对 PN/A 工艺部分亚硝化稳定实现和 ANAMMOX 协同反硝化同步脱氮除碳的影响,以期为该工艺的实际应用提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置

PN/A 工艺如图 1 所示,SBR 由有机玻璃所制,直径 15 cm,高 40 cm,有效容积 5 L,侧壁设取样口,配有搅拌装置,通过 PLC 控制器检测 pH、ORP 及调节温度,利用时间继电器实现间歇曝气;ASBR 主体材质同 SBR,有效容积 5 L,顶部设通气口,反应产生气体由水封瓶收集后排出,另设缓冲瓶调节 pH,外壁由锡纸包裹避光.

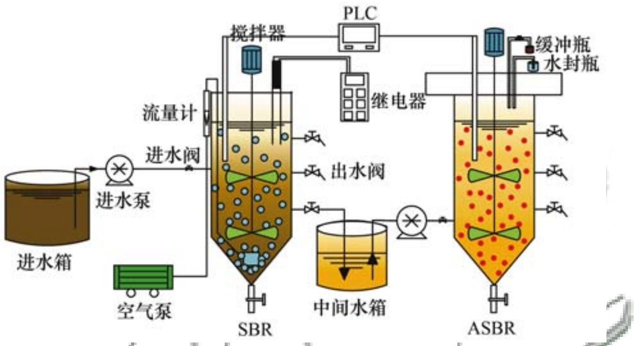


图 1 PN/A 工艺装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of PN/A process device

1.2 接种污泥

SBR 接种污泥来自实验室稳定短程硝化污泥, MLSS 为 3 450 mg·L^{-1}, MLVSS/MLSS (f 值)为 0.59, SV_{30}为 42%;ASBR 接种污泥来自稳定运行的厌氧氨氧化反应器,MLSS 为3 321 mg·L^{-1},VSS 为2 514 mg·L^{-1},脱氮性能良好.

1.3 试验进水水质及检测方法

试验用水来自兰州交通大学家属区实际生活污水,SBR 水质指标如表 1,前置 SBR 反应器实现稳定部分亚硝化后通过加入 $NaNO_2$ 调节 ASBR 进水 C/N,具体进水水质见表 2.

表 1 SBR 进水水质/mg·L^{-1}

Table 1 Qualities of influent in the SBR/mg·L^{-1}

项目	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	COD
范围	49.47 ~ 101.22	0.01 ~ 0.89	0.08 ~ 2.95	130.94 ~ 351.62
均值	75.96	0.51	1.21	281.07

表 2 ASBR 进水水质(均值)

Table 2 Average quantities of influent in the ASBR

项目	COD/NO_2^--N(C/N)			
	3.0(未加 $NaNO_2$)	2.5	2.0	1.5
COD/mg·L^{-1}	112.43	115.40	112.76	111.62
NO_2^--N/mg·L^{-1}	37.48	46.16	56.38	74.41
NH_4^+-N/mg·L^{-1}	36.47	38.57	37.64	40.81
NO_3^--N/mg·L^{-1}	0.86	1.06	0.94	0.91

水样经 0.45 μm 孔径定性滤纸过滤后根据 APHA 标准方法[19]测定，COD：快速消解分光光度法；NH_4^+-N：纳氏试剂分光光度法；NO_2^--N：*N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法；NO_3^--N：麝香草酚分光光度法；MLSS 和 VSS：重量法；SV_{30}和 SVI：30 min 沉降法；温度、pH 和 DO：便携式测定仪.

1.4　运行策略

SBR 采用间歇运行，1 d 运行 6 个周期，单周期 240 min，即进水 5 min →反应 180 min →沉淀 30 min →排水 5 min →闲置 20 min，调节曝气量为 100 $L\cdot h^{-1}$，排水比为 75%. 采用 2 种工况，工况Ⅰ在 25℃下，采用缺氧/好氧时间比为 30 min∶60 min、45 min∶45 min、30 min∶30 min，分别交替 2、2、3 次；工况Ⅱ采用缺氧/好氧时间比为 30 min∶30 min 交替 3 次，调整温度分别为 15、25 和 30℃. ASBR 采用间歇运行，HRT 为 24 h，排水比为 70%，控制温度为 25℃，调整 C/N 为 2.5、2.0 及 1.5，运行 80 d.

1.5　计算方法

NH_4^+-N去除率（ARE）、NO_2^--N积累率（NiAR）、比氨氮氧化速率（SAOR）、比亚硝态氮产生速率（SNiPR）和比硝态氮产生速率（SNaPR）等计算参考文献[20]的公式. ASBR 内各级反应脱氮贡献率计算参考文献[21]的公式.

ASBR 内各级反应脱氮贡献率计算：

$$A = \frac{a + 1.32a - 0.26a}{a + b - c} \tag{1}$$

$$PN = A + \frac{2.06 \times (0.515a - 0.486b + 0.485c)}{1.32 \times (a + b - c)} \tag{2}$$

$$PD = A + \frac{2.06 \times (a - 0.758b)}{a + b - c} \tag{3}$$

$$D = \frac{(0.26a - c) + (b - 1.32a)}{a + b + c} \tag{4}$$

式中，*A*、PN、PD 和 *D* 分别为：ANAMMOX、部分硝化-ANAMMOX、部分反硝化-ANAMMOX 和反硝化反应的脱氮贡献率，%；*a*、*b* 和 *c* 分别为：NH_4^+-N消耗量、NO_2^--N消耗量和NO_3^--N产生量，$mg\cdot L^{-1}$.

1.6　物料衡算分析

通过物料衡算可得不同间歇模式下 SBR 部分亚硝化过程中的氮损失（ΔTN，$mg\cdot L^{-1}$）、碳损失（ΔCOD，$mg\cdot L^{-1}$）和同步硝化反硝化碳氮比例（ΔCOD/ΔTN）[22]：

$$c_n(TN)_{in} = c_n(TN)_{eff} + \Delta TN_n \tag{5}$$

$$c_n(TN)_{in} = c_{n-1}(TN)_{eff}(1 - w) + c_n(TN)_{eff}\, w \tag{6}$$

$$\Delta COD = c_{n-1}(COD)_{eff}(1 - w) + c_n(COD)_{in} w - c_n(COD)_{eff} \tag{7}$$

式中，$c_n(TN)_{in}$和 $c_n(TN)_{eff}$分别为第 *n* 周期进、出水 TN 浓度，$c_{n-1}(TN)_{eff}$为第 *n* －1 周期出水 TN 浓度，单位均为$mg\cdot L^{-1}$；$c_n(COD)_{in}$和$c_n(COD)_{eff}$分别为第 *n* 周期进、出水 COD 浓度，$c_{n-1}(COD)_{eff}$为第 *n* －1 周期出水 COD 浓度，单位均为$mg\cdot L^{-1}$；*w* 为排水比.

2　结果与讨论

2.1　缺氧/好氧时间比对实现部分亚硝化的影响

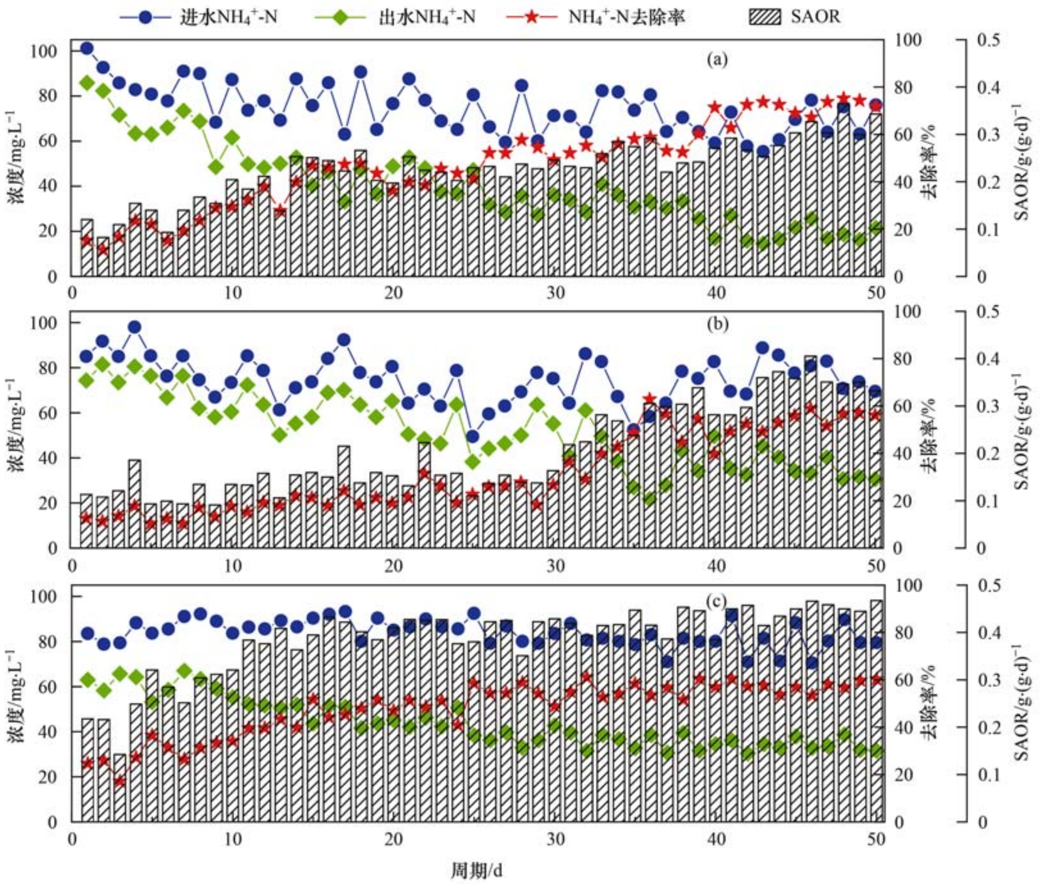
2.1.1　缺氧/好氧时间比下NH_4^+-N及 SAOR 变化特征

如图 2，缺氧/好氧时间比为 30 min∶60 min（A 模式）、45 min∶45 min（B 模式）和 30 min∶30 min（C 模式）中，进水NH_4^+-N浓度均维持在 49.47～101.22 $mg\cdot L^{-1}$，ARE 分别于第 42、39 及 25 周期达到稳定，出水NH_4^+-N浓度分别为 15.85、34.26 和 38.35 $mg\cdot L^{-1}$，ARE 分别为 72.55%、54.46% 和 58.52%，3 种模式均能实现较稳定的部分亚硝化. C 模式NO_2^--N积累高效稳定，原因为试验接种污泥为短程硝化污泥，A、B 模式相比，好氧段时间减少不利于NH_4^+-N的去除，缺氧段时间增加使NO_2^--N被还原量增加，相对延长了NO_2^--N高效积累的时间，故 B 模式较 A 模式所需时间长；A、C 模式相比，可能停曝频率变大有利于筛选出氨氧化速率较快的 AOB 及相对减少 NOB 的数量，缩短 C 模式稳定部分亚硝化实现的时间. 从 SAOR 来看，AOB 生物量的提高表明交替缺氧/好氧环境下有利于 AOB 提高自身产率系数来加快生长繁殖[23]，SAOR 分别在 45、36 和 16 周期时达到稳定，其中 C 模式增长幅度较快，反应结束时 SAOR 分别为 0.30、0.31 和 0.43 $g\cdot(g\cdot d)^{-1}$. 与刘宏等[24]的研究相比，本试验通过低曝气频率方式实现稳定部分亚硝化的时间更短，节省能耗.

2.1.2　缺氧/好氧时间比下NO_2^--N积累及 SNaPR、SNiPR 变化特征

如图 3，3 种模式进水 NO_2^--N 浓度均在 1 $mg\cdot L^{-1}$以下，出水NO_2^--N浓度和 NiAR 均呈上升趋势，NiAR 分别于第 39、38 和 22 周期稳定至 97.87%、94.01% 和 98.06%，出水NO_2^--N浓度分别增至 24.00、19.82 和 25.92 $mg\cdot L^{-1}$；SNiPR 分别稳定至 0.16、0.18 和 0.28 $g\cdot(g\cdot d)^{-1}$；出水NO_3^--N浓度均随 NOB 减少而降低，反应结束时 SNaPR 分别为 0.001、0.007 和 0.002 $g\cdot(g\cdot d)^{-1}$，出水NO_3^--N浓度分别降至 0.22、1.00 和 0.20 $mg\cdot L^{-1}$.

张立成等[25]的研究认为 NiAR 在 50% 以上便实现了部分亚硝化，刘宏[26]的研究采用交替好氧/缺



(a)30 min∶60 min(A 模式),(b)45 min∶45 min(B 模式),(c)30 min∶30 min(C 模式)

图 2 缺氧/好氧时间比下NH_4^+-N和 SAOR 变化特征

Fig. 2 Characteristics of changes in NH_4^+-N and SAOR under different anoxic/aerobic time ratios

氧模式第 39 周期才实现NO_2^--N稳定积累,由于 NOB 为优势菌种,采用交替好氧/缺氧模式,在有机碳源充足的情况下,好氧段产生的NO_2^--N短时间内易被氧化为NO_3^--N,较交替缺氧/好氧模式更不易控制; 若先进行缺氧反应,因为 AOB"饱食饥饿"特性使其更易富集,张杰等[27]的研究采用停曝比为 1∶1并协同其它控制条件的方式实现了部分亚硝化稳定运行,阶段末 NiAR 为 85.20%. 相比连续曝气,间歇曝气具有碱度投加量少、效率高及避免碳源不足等优点. 但匹配 ANAMMOX 的部分亚硝化并非NO_2^--N浓度越高越好,否则需外加铵盐或引入新鲜污水调节基质浓度及比值,导致处理成本增加、系统崩溃. 本试验中 C 模式实现稳定部分亚硝化最快,利于降低成本.

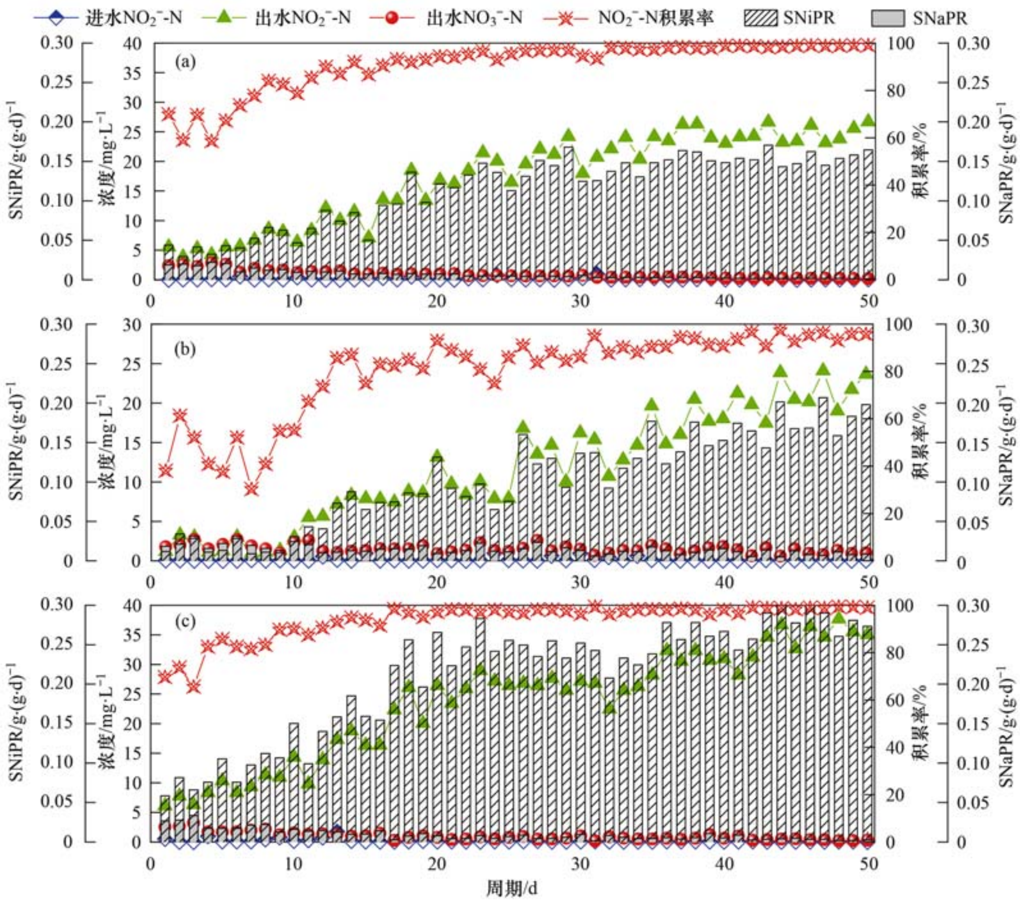
2.1.3 缺氧/好氧时间比下 ΔTN 及 ΔCOD

如图 4,由式(5)~(7)可得不同模式氮损失(ΔTN)、碳损失(ΔCOD)和 ΔCOD/ΔTN,忽略内源反硝化与细胞同化作用,则 ΔTN 为同步硝化反硝化作用消耗 TN. 3 种模式下初始 ΔTN 和 ΔCOD 分别为 1.69、2.43、3.32 mg·L^{-1} 和 42.70、34.39、36.38 mg·L^{-1},周期末 ΔTN 和 ΔCOD 分别稳定至 23.60、14.50、12.29 mg·L^{-1} 和 138.54、104.17、110.36 mg·L^{-1}, ΔCOD/ΔTN 稳定至 5.87、7.18 和 8.98. 可见 3 种模式下均发生了氮损失,主要原因为[28,29]: ① 反应器存在局部环境 DO 分布不均; ② 活性污泥絮体由于氧传递受限, DO 浓度从表面至内部降低; ③ 存在好氧反硝化菌和异养硝化菌,为同步硝化反硝化提供了有利条件. A 模式下发生同步硝化反硝化所需碳源最多,但 B 模式下消耗碳源最少,可能因为 A 模式下好氧段相对较长,使其积累的NO_2^--N被氧化为NO_3^--N,为缺氧段反硝化提供充足的基质,导致 ΔCOD 最大, C 模式下交替次数的上升有利于 COD 的去除,故好氧段的长短和交替次数决定有机碳源的消耗量,好氧段越长发生同步硝化反硝化所消耗有机碳源越多,其 ΔTN 也最大[30]. ΔCOD/ΔTN 可作为该模式的理论依据,以寻求在相对较少的 ΔTN 下获得较大的 ΔCOD,避免 ASBR 中 COD 过高对 ANAMMOX 产生不利影响.

2.2 间歇曝气模式下温度对部分亚硝化及污泥性能的影响

2.2.1 不同温度下NH_4^+-N及 SAOR 变化特征

保持缺氧/好氧时间比为 30 min∶30 min,如图 5, 15、25 和 30℃ 时,出水 NH_4^+-N 浓度、ARE 和



(a)30 min∶60 min(A 模式),(b)45 min∶45 min(B 模式),(c)30 min∶30 min(C 模式)

图 3　缺氧/好氧时间比下NO_2^--N积累及 SNaPR 和 SNiPR 变化特征

Fig. 3　NO_2^--N accumulation and changes in SNaPR and SNiPR under different anoxic/aerobic time ratios

SAOR 分别为 47.50 mg·L^{-1}、45.63%、0.38 g·(g·d)$^{-1}$、31.58 mg·L^{-1}、60.27%、0.47 g·(g·d)$^{-1}$ 和 4.12 mg·L^{-1}、95.35%、0.81 g·(g·d)$^{-1}$. 可见一定范围内,温度越高 SAOR 越大,ARE 越高,主要因为高温有利于 AOB 的繁殖,但高温下系统易失稳转向短程硝化,不能为 ANAMMOX 提供合适的基质浓度[31]. 30℃时部分亚硝化系统已失稳转化为短程硝化.

2.2.2　不同温度下NO_2^--N积累及 SNaPR、SNiPR 和污泥性能变化特征

如图 6, 15℃时,NiAR 波动较大,出水NO_2^--N浓度、NiAR 和 SNiPR 分别低至 14.05 mg·L^{-1}、34.99% 和 0.12 g·(g·d)$^{-1}$,而NO_3^--N浓度和 SNaPR 居高不下,可见低温下难以实现部分亚硝化. 从 15℃上升至 30℃,NO_2^--N浓度、NiAR 和 SNiPR 均明显增大,说明温度上升有利于NO_2^--N的积累,这与 Jia 等[32]的研究结果相同. Paredes 等[33]的研究发现当温度高于 15℃, AOB 活性及繁殖速率大于 NOB, 25℃以上时这一趋势更加明显,这与本试验的结果一致. 如图 7, *f* 和 SVI 是影响NO_2^--N稳定积累的重要参数. 3 种温度下初始 *f* 和 SVI(mL·g^{-1})分别为 0.42、0.48、0.45 和 48.73、65.53、58.06,各 *f* 和 SVI 值均先上升,达到稳定分别需 36、15 和 29 d. 结束时 *f* 和 SVI(mL·g^{-1})分别为 0.61、0.79、0.81 和 126.88、93.17、89.98, 30℃下 *f* 增速最快, 15℃下 SVI 在 36 d 达到最大值 130.46 mL·g^{-1},低温环境 AOB 活性降低,丝状菌大量繁殖导致污泥膨胀,伴随污泥上浮现象. 而 25℃和 30℃下 SVI 稳定在 90 mL·g^{-1}左右,污泥活性和沉降性较好,说明污泥性能随温度上升而提高. 从耗能角度看 25℃更适宜匹配 ANAMMOX.

2.3　SBR-ASBR 组合工艺处理实际生活污水效果

如图 8,组合工艺进水 TN、NH_4^+-N和 COD 浓度均值分别为 77.68、75.96 和 281.07 mg·L^{-1},出水 TN、NH_4^+-N 和 COD 浓度稳定在 13.13、4.83 和 69.96 mg·L^{-1},去除率分别为 83.10%、93.64% 和 75.11%,脱氮效果较好. 普遍认为匹配 ANAMMOX 的基质比NO_2^--N/NH_4^+-N在 1∶1左右即可[34],但本试验出水NH_4^+-N有剩余,且发现在 SBR 出水 COD 均值为 113.05 mg·L^{-1}下,组合工艺出水NO_3^--N稳定在 7.46 mg·L^{-1},说明 ASBR 中反硝化作用微弱,

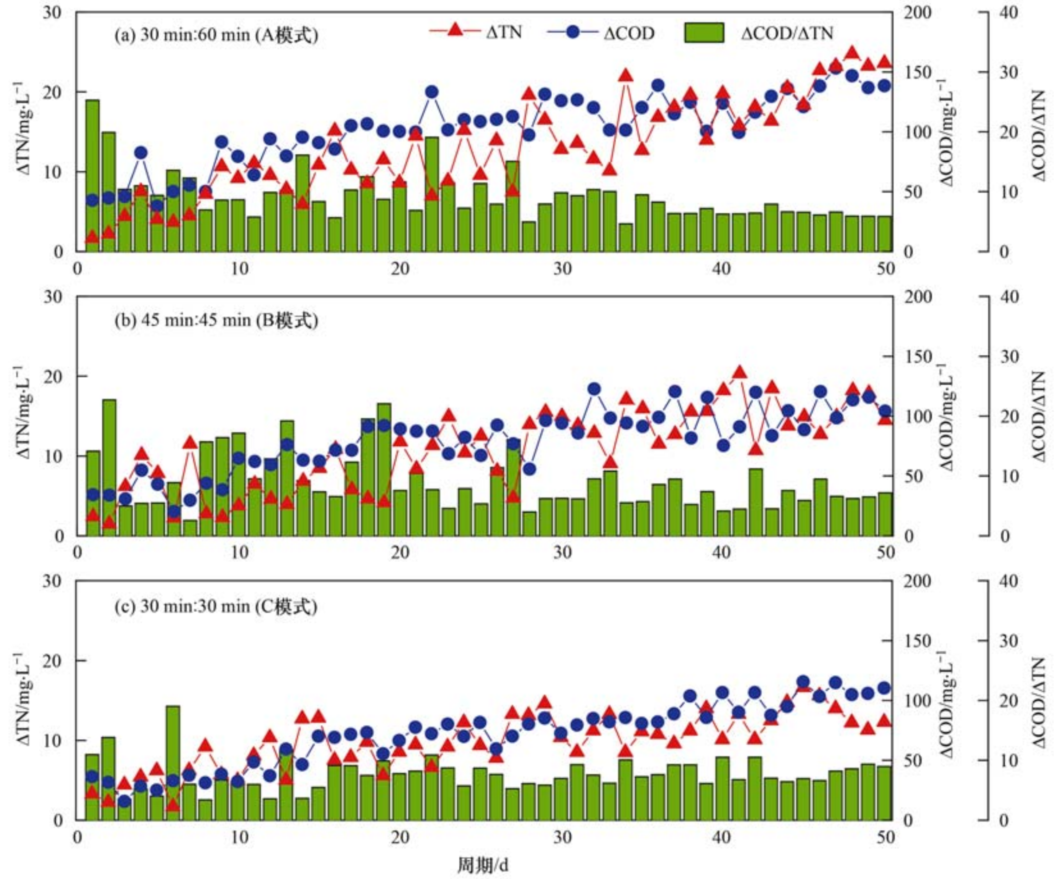


图 4　缺氧/好氧时间比下 ΔTN 及 ΔCOD 变化特征

Fig. 4　Characteristics of changes in ΔTN and ΔCOD under different anoxic/aerobic time ratios

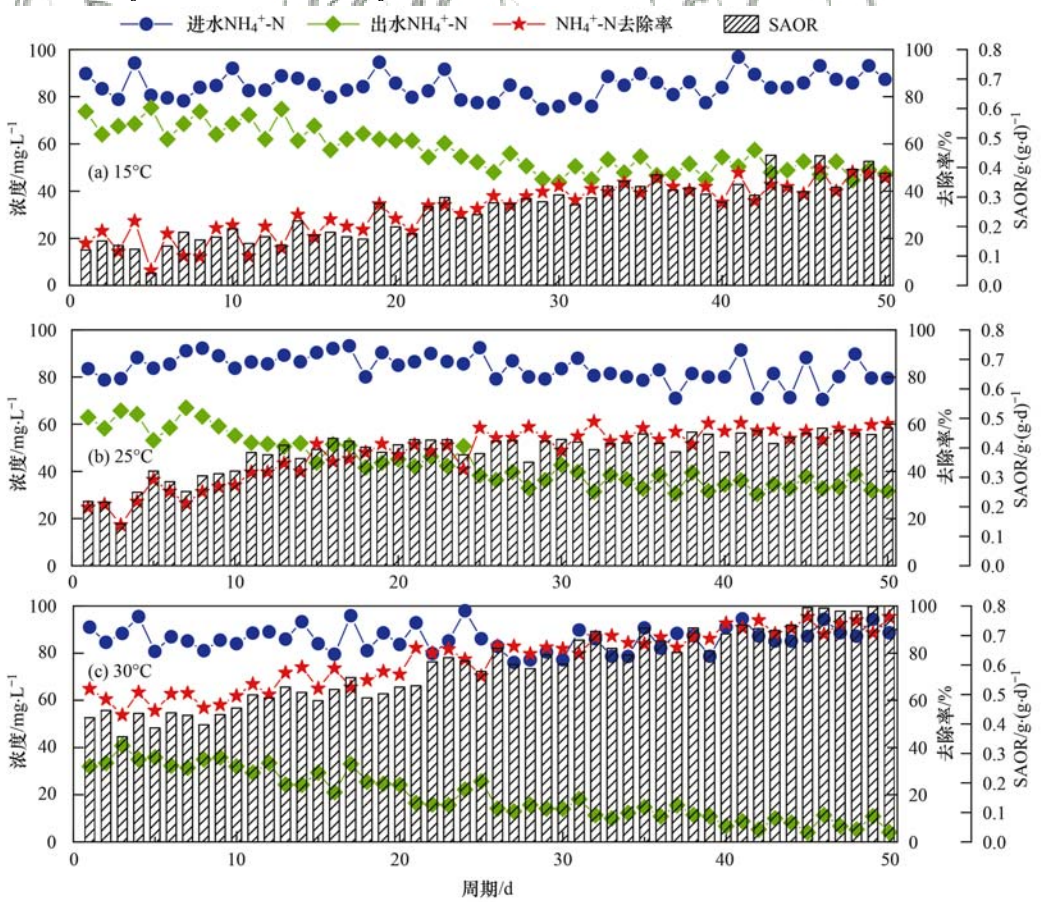


图 5　不同温度下 NH_4^+-N 及 SAOR 变化特征

Fig. 5　Characteristics of NH_4^+-N and SAOR changes at different temperatures

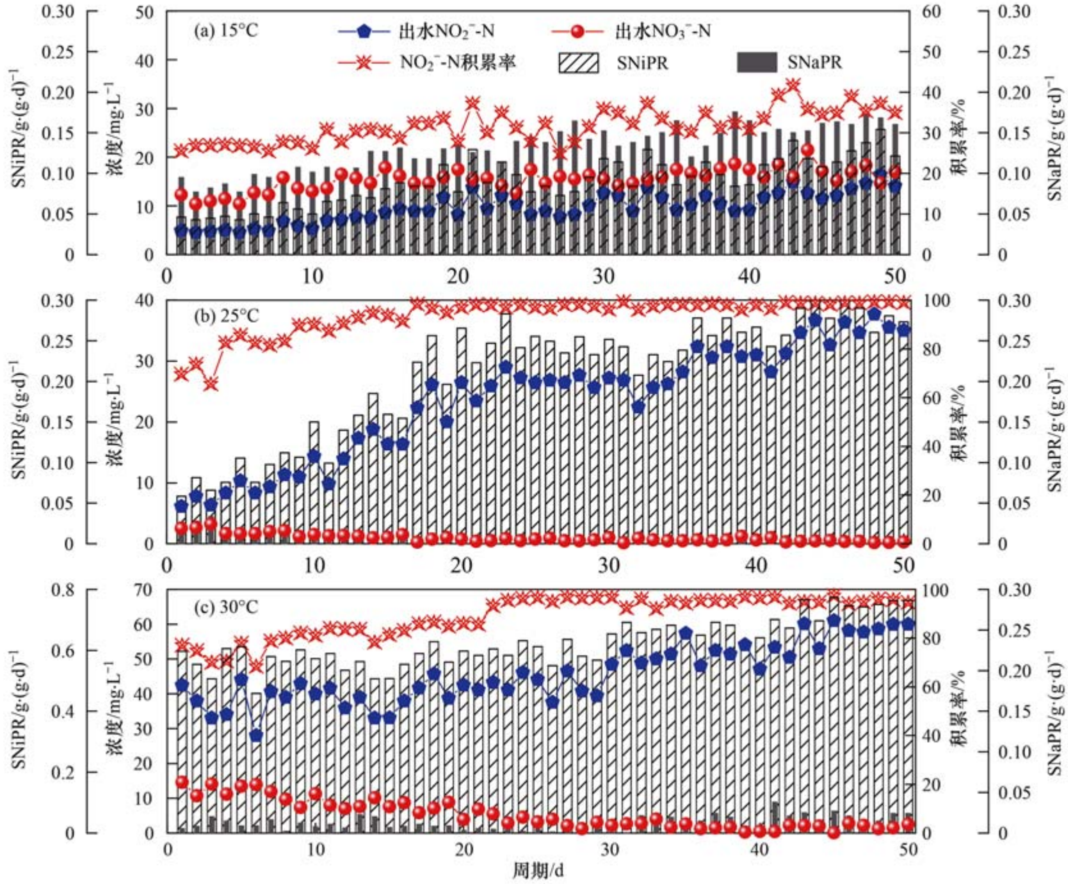


图 6　不同温度下NO_2^--N积累及 SNaPR、SNiPR 变化特征

Fig. 6　NO_2^--N accumulation and SNaPR, SNiPR change characteristics at different temperatures

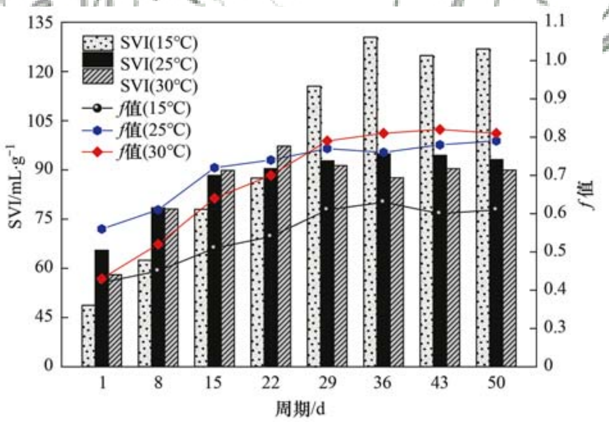


图 7　不同温度下 SBR 污泥性能变化特征

Fig. 7　Characteristics of SBR sludge performance changes at different temperatures

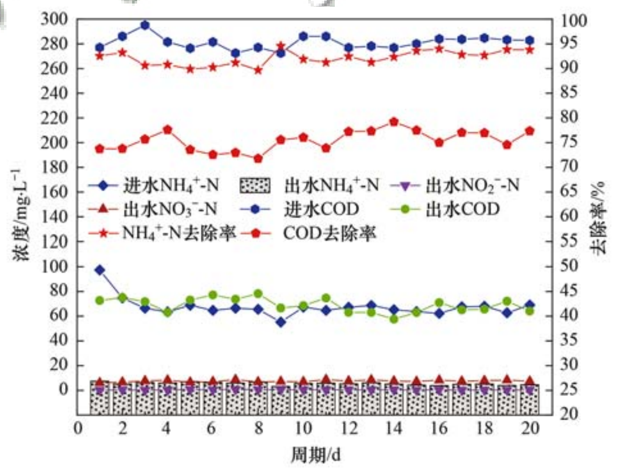


图 8　SBR-ASBR 组合工艺处理生活污水效果

Fig. 8　Treatment effect of the SBR-ASBR combined process on domestic sewage

导致除碳效果不理想,有研究表明有机物浓度在 150 mg·L^{-1}以下 AnAOB 可以和反硝化菌共存[35],且有机物对 AnAOB 具有双向作用[36],是否在较低有机物浓度下NO_2^--N的量决定了 ANAMMOX 协同反硝化脱氮除碳的进程,故通过投加亚硝酸钠调节 C/N 对两者协同性能作近一步考察.

2.4　厌氧氨氧化协同反硝化脱氮除碳性能优化

2.4.1　不同 C/N 下 ASBR 氮素和 COD 变化特征

ASBR 进水来自 SBR 出水,其进水 COD 和 NO_2^--N分别稳定在 113.05 和 37.48 mg·L^{-1}左右,投加 $NaNO_2$ 调整 ASBR 进水 C/N 分别为 2.5、2.0 和 1.5. 如图 9, C/N 为 3.0 是 SBR-ASBR 组合工艺处理实际生活污水 ASBR 段效果, C/N 从 3.0 降至 2.0 时, ARE 和 COD 去除率均呈上升趋势, C/N 降至 1.5 时, ARE 下降,而 COD 去除率保持稳定. C/N的变化对NO_2^--N的去除影响较小,其去除率接近 100%. C/N 从 3.0 降低到 1.5 过程中,出水

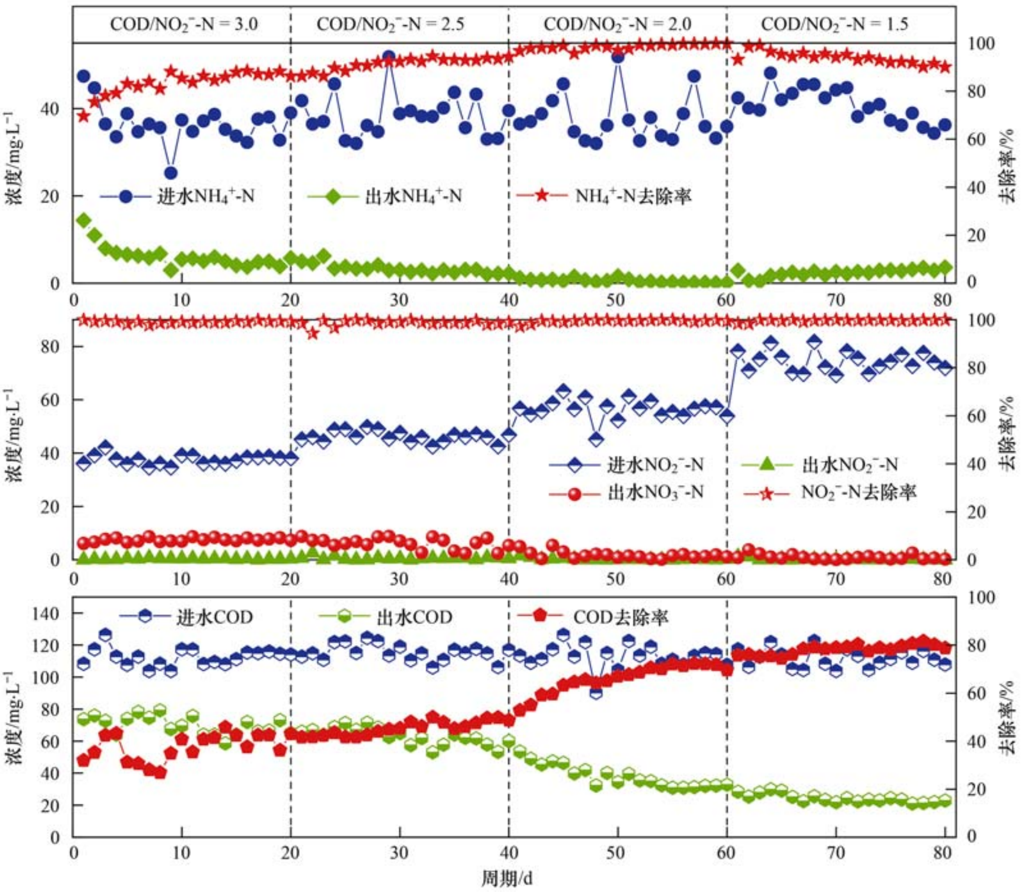


图9 不同C/N下ASBR氮素和COD变化特征

Fig. 9 Variation characteristics of nitrogen and COD during anaerobic ammoxidation under different C/N

NO_3^--N浓度由7.29 mg·L^{-1}降至0.22 mg·L^{-1}.

C/N为3.0时,试验初期菌体处于内源呼吸期,AnAOB对基质需求迫切,增加的NO_2^--N使AnAOB得到相对充足的电子受体,但NO_2^--N量不足使AnAOB难以继续与剩余NH_4^+-N进行ANAMMOX,异养菌反应微弱,对COD去除率不高[37]; C/N为2.0时,微过量的NO_2^--N为ANAMMOX和异养反硝化菌提供充足基质,反硝化菌为AnAOB解除了氧毒[38],促进ANAMMOX和反硝化反应,出水NH_4^+-N、NO_3^--N、COD浓度减幅明显; C/N为1.5时,ANAMMOX取决于NH_4^+-N的量,剩余NO_2^--N和ANAMMOX生成的NO_3^--N为反硝化菌提供充足的基质,使脱氮性能变差.

C/N降低过程中,NO_2^--N浓度逐渐增大,以ANAMMOX为主协同反硝化脱氮除碳作用逐渐增强; C/N<2.0时, AnAOB竞争优势减弱,系统内以反硝化为主,协同性能下降. 可见C/N是决定ANAMMOX协同反硝化的重要因素[39],马艳红等[40]的研究发现适当的COD浓度可以增强ANAMMOX协同反硝化的效果; 王凡等[41]的研究处理模拟废水在C/N为0.4时AnAOB和反硝化菌协同能力最强. 本试验C/N为2.0时系统协同性能最佳,出水NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N和COD分别为0.09、0.25、1.04和32.73 mg·L^{-1}.

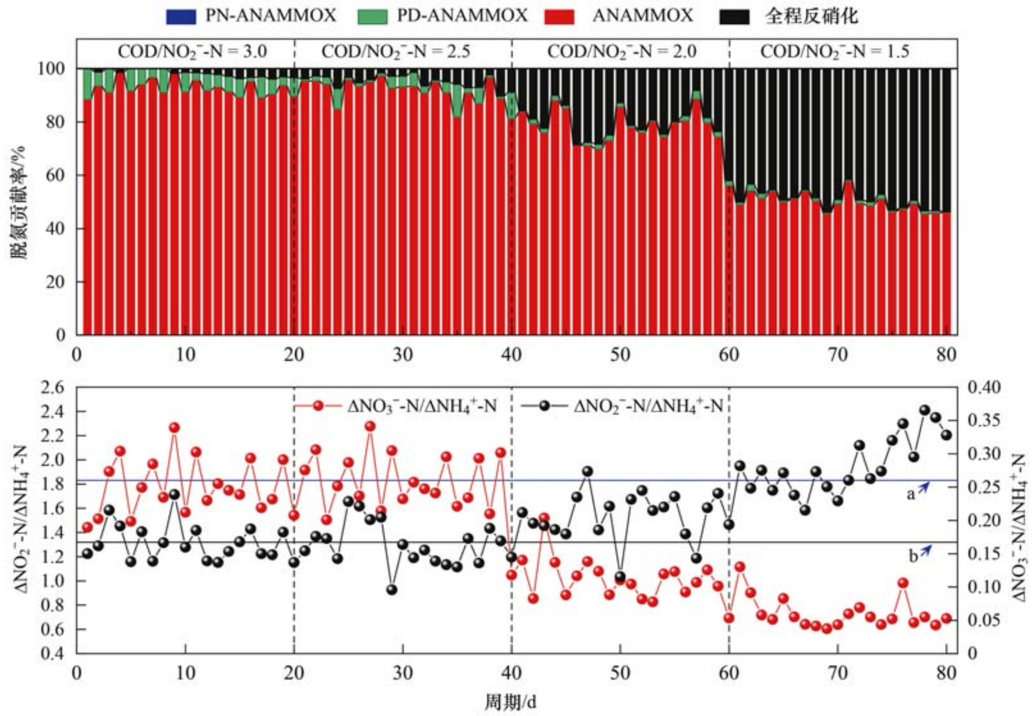
2.4.2 不同C/N下脱氮贡献率和化学计量比变化特征

如图10,整个过程中,全程反硝化脱氮占比逐渐增大. C/N为3.0系统脱氮贡献主要由ANAMMOX、部分反硝化和全程反硝化提供,ANAMMOX平均脱氮贡献率达89.64%,部分反硝化-ANAMMOX和全程反硝化平均脱氮贡献率共计7.03%, NO_2^--N不足使系统部分反硝化-ANAMMOX占比较全程反硝化大,另外系统内存在少量氮循环菌属参与其它脱氮途径; C/N为2.5 ANAMMOX脱氮贡献率相对稳定,部分亚硝化和部分反硝化脱氮贡献率降低,全程反硝化脱氮贡献率增至10.30%; C/N为2.0 ANAMMOX平均脱氮贡献率降至77.98%,而全程反硝化增至21.16%,可见C/N由3.0降至2.0过程中,系统ANAMMOX协同反硝化作用增至最大,脱氮性能上升; C/N降至1.5后, ANAMMOX平均脱氮贡献率降至49.72%,反硝化菌逐渐占据优势,这与Zhang等[42]的研究结果一致.

C/N为3.0和2.5时, ΔNO_2^--N/ΔNH_4^+-N和

ΔNO_3^--N/ΔNH_4^+-N分别在其理论值附近波动，且均值略低于理论值，因为在 ANAMMOX 为主反应的前提下，硝化、反硝化等氮循环菌属少量协同脱氮，且 ASBR 中存在少量的 AOB 和 DO 易造成实际比值低于理论值[43]；C/N 为 2.0，微过量的NO_2^--N促进了反硝化菌繁殖，NH_4^+-N 浓度相对不足，造成ΔNO_2^--N/ΔNH_4^+-N高于理论值，反硝化脱氮贡献率增大，造成ΔNO_3^--N/ΔNH_4^+-N进一步偏低，C/N 为 1.5 时这一趋势更加明显，不利于 AnAOB 协同其它菌属脱氮.

目前多探究 ANAMMOX 协同反硝化进水有机物的阈值，有关 COD 对 ANAMMOX 系统微生物的影响尚无确切定论[44,45]，且添加 COD 易造成反硝化菌大量繁殖，不易控制，本试验在 ASBR 进水 COD 均值为 113.05 mg·L^{-1}下，发现NO_2^--N的量决定了 ANAMMOX 协同反硝化脱氮除碳的程度.



a. ΔNO_3^--N/ΔNH_4^+-N理论值 0.26，b. ΔNO_2^--N/ΔNH_4^+-N理论值 1.32

图 10　不同 C/N 下脱氮贡献率和化学计量比变化特征

Fig. 10　Variation characteristics of nitrogen removal contribution ratio and stoichiometric ratio under different C/N

3　结论

(1)当温度为 25℃，缺氧/好氧时间比为 30 min∶30 min，交替次数为 3 时，实现高效稳定亚硝积累时间最短，SBR 部分亚硝化中 ARE、NiAR 和出水 NO_2^--N 浓度分别为 60.27%、99.38% 和 35.04 mg·L^{-1}.

(2)不同缺氧/好氧时间比下易发生同步硝化反硝化现象，好氧段的长短决定有机碳源的消耗量，从而影响同步硝化反硝化氮损失. 缺氧/好氧时间比分别为 30 min∶60 min、45 min∶45 min 和 30 min∶30 min 时，ΔTN 和 ΔCOD 分别稳定至 23.60，14.50、12.29 mg·L^{-1}和 138.54、104.17、110.36 mg·L^{-1}，缺氧/好氧时间比为 30 min∶30 min 下消耗 COD 较多的同时因同步硝化反硝化发生的氮损失最少.

(3)组合工艺脱氮性能良好，出水 TN、NH_4^+-N 和 COD 浓度分别稳定在 13.13、4.83 和 69.96 mg·L^{-1}，去除率分别为 83.10%、93.64% 和 75.11%. ASBR 进水 COD 为 113.05 mg·L^{-1} 下，NO_2^--N的量决定了 ANAMMOX 协同反硝化脱氮除碳的效果，当 C/N 为 2.0 协同性能最佳，出水 NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N和 COD 浓度分别为 0.09、0.25、1.04 和 32.73 mg·L^{-1}.

参考文献：

[1] Liu T, Hu S H, Yuan Z G, *et al*. High-level nitrogen removal by simultaneous partial nitritation, anammox and nitrite/nitrate-dependent anaerobic methane oxidation[J]. Water Research, 2019, **166**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115057.

[2] Wu L N, Yan Z B, Huang S, *et al*. Rapid start-up and stable maintenance of partial nitrification-anaerobic ammonium oxidation treatment of landfill leachate at low temperatures [J]. Environmental Research, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.envres.2020.110131.

[3] Han X Y, Zhang S J, Yang S H, *et al*. Full-scale partial nitritation/anammox (PN/A) process for treating sludge dewatering liquor from anaerobic digestion after thermal hydrolysis [J]. Bioresource Technology, 2020, **297**, doi: 10.1016/j.

biortech. 2019. 122380.

[4] Sui Q W, Di F, Zhang J Y, *et al*. Advanced nitrogen removal in a fixed-bed anaerobic ammonia oxidation reactor following an anoxic/oxic reactor: nitrogen removal contributions and mechanisms[J]. Bioresource Technology, 2021, **320**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124297.

[5] Pan Z Z, Dai R Z, Liao J S, *et al*. Spontaneous formation and mechanism of anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacteria in swine wastewater treatment system [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2020, **154**, doi: 10.1016/j.ibiod.2020.105058.

[6] Zhou X, Zhang Z Q, Zhang X A, *et al*. A novel single-stage process integrating simultaneous COD oxidation, partial nitritation-denitritation and anammox (SCONDA) for treating ammonia-rich organic wastewater[J]. Bioresource Technology, 2018, **254**: 50-55.

[7] Lin Z Y, Xu F Y, Wang Y M, *et al*. Autotrophic nitrogen removal by partial nitrification-anammox process in two-stage sequencing batch constructed wetlands for low-strength ammonium wastewater[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, **38**, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101625.

[8] Deng S Y, Peng Y Z, Zhang L, *et al*. Advanced nitrogen removal from municipal wastewater via two-stage partial nitrification-simultaneous anammox and denitrification (PN-SAD) process[J]. Bioresource Technology, 2020, **304**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.122955.

[9] 王思萌, 苗圆圆, 彭永臻. 低温投加短程硝化污泥下城市污水SPN/A工艺运行特性[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(4): 1456-1463.
Wang S M, Miao Y Y, Peng Y Z. Operation characteristics of the SPN/A process for municipal wastewater under low temperature shortcut nitrification sludge [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(4): 1456-1463.

[10] Cao Y S, Van Loosdrecht M C M, Daigger G T. Mainstream partial nitritation-anammox in municipal wastewater treatment: status, bottlenecks, and further studies [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, **101**(4): 1365-1383.

[11] Gao D W, Xiang T. Deammonification process in municipal wastewater treatment: challenges and perspectives [J]. Bioresource Technology, 2021, **320**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124420.

[12] 陈亚, 印雯, 张星星, 等. 反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2367-2372.
Chen Y, Yin W, Zhang X X, *et al*. Start-up of an integrated process of denitrifying phosphorus removal coupled with partial nitritation and anaerobic ammonium oxidation[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2367-2372.

[13] Miao J, Yin Q D, Hori T, *et al*. Nitrifiers activity and community characteristics under stress conditions in partial nitrification systems treating ammonium-rich wastewater [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **73**: 1-8.

[14] Yuan Y, Li X, Li B L. Autotrophic nitrogen removal characteristics of PN-anammox process enhanced by sulfur autotrophic denitrification under mainstream conditions [J]. Bioresource Technology, 2020, **316**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123926.

[15] Chen Y Z, Zhao Z C, Liu H, *et al*. Achieving stable two-stage mainstream partial-nitrification/anammox (PN/A) operation via intermittent aeration[J]. Chemosphere, 2020, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125650.

[16] 姜黎安, 隋倩雯, 徐东耀, 等. 部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理低氨氮废水研究进展[J]. 环境工程, 2019, **37**(1): 61-66.
Jiang L A, Sui Q W, Xu D Y, *et al*. Research progress on treatment of low ammonia nitrogen wastewater by partial nitrification-anammox process[J]. Environmental Engineering, 2019, **37**(1): 61-66.

[17] Sharp R, Khunjar W, Daly D, *et al*. Nitrogen removal from water resource recovery facilities using partial nitrification, denitratation-anaerobic ammonia oxidation (PANDA) [J]. Science of the Total Environment, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138283.

[18] Yan J, Wang S J, Wu L Y, *et al*. Long-term ammonia gas biofiltration through simultaneous nitrification, anammox and denitrification process with limited N_2O emission and negligible leachate production[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **270**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122406.

[19] APHA. Standard methods for the Examination of water and wastewater (21st ed.)[M]. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.

[20] 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 等. 游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1075-1081.
Sun H W, Lü X T, Wei X F, *et al*. Synergetic inhibitory effect of free ammonia and aeration phase length control on the activity of nitrifying bacteria[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1075-1081.

[21] 曹雁. 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮及微生物特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
Cao Y. Study on performance and microbial characteristics of co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen removal[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

[22] 刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 等. 不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4569-4577.
Liu A D, Zhao K L, Liu H, *et al*. Short-cut nitrification start-up and optimization of operating conditions under different control strategies[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4569-4577.

[23] Zheng Z M, Huang S, Bian W, *et al*. Enhanced nitrogen removal of the simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) biofilm reactor for treating mainstream wastewater under low dissolved oxygen (DO) concentration[J]. Bioresource Technology, 2019, **283**: 213-220.

[24] 刘宏, 南彦斌, 李慧, 等. 间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 865-871.
Liu H, Nan Y B, Li H, *et al*. Effect of aeration rate on shortcut nitrification recovery in intermittent aeration mode [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 865-871.

[25] 张立成, 党维, 徐浩, 等. SBR快速实现短程硝化及影响因素[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(5): 2272-2276.
Zhang L C, Dang W, Xu H, *et al*. Achievement and influencing factors of shortcut nitrification in SBR process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(5): 2272-2276.

[26] 刘宏. 间歇曝气SBR完全短程硝化+ASBR厌氧氨氧化脱氮性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
Liu H. Study on nitrogen removal performance using SBR complete shortcut nitrification under intermittent aeration + ASBR Anammox[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.

[27] 张杰, 劳会妹, 李冬, 等. 不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5097-5105.

Zhang J, Lao H M, Li D, *et al*. Effect of different ratios of anaerobic time and aeration time on the operation of a continuous-flow reactor with partial nitrification granules[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5097-5105.

[28] 杨玉兵. 两段式短程硝化-厌氧氨氧化脱氮性能及其N_2O产生途径研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
Yang Y B. Two-stage partial nitrification-anaerobic ammonium oxidation denitrification performance and its N_2O production pathway[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.

[29] 冯亮, 袁春燕, 杨超, 等. 好氧反硝化生物脱氮技术的研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, **47**(10): 3342-3354.
Feng L, Yuan C Y, Yang C, *et al*. Research progress in nitrogen removal by aerobic denitrification [J]. Microbiology China, 2020, **47**(10): 3342-3354.

[30] 赵智超, 黄剑明, 李健, 等. 间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 799-807.
Zhao Z C, Huang J M, Li J, *et al*. Simultaneous nitrification and denitrifying phosphorus removal in continuous flow reactor with intermittent aeration[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 799-807.

[31] Xu Z Z, Zhang L, Gao X J, *et al*. Optimization of the intermittent aeration to improve the stability and flexibility of a mainstream hybrid partial nitrification-anammox system [J]. Chemosphere, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127670.

[32] Jia W L, Chen Y F, Zhang J, *et al*. Response of greenhouse gas emissions and microbial community dynamics to temperature variation during partial nitrification[J]. Bioresource Technology, 2018, **261**: 19-27.

[33] Paredes D, Kuschk P, Mbwette T S A, *et al*. New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment-a review[J]. Engineering in Life Sciences, 2007, **7**(1): 13-25.

[34] Dong H, Zhang K Y, Han X, *et al*. Achievement, performance and characteristics of microbial products in a partial nitrification sequencing batch reactor as a pretreatment for anaerobic ammonium oxidation[J]. Chemosphere, 2017, **183**: 212-218.

[35] 李田, 曹家炜, 谢凤莲, 等. ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1390-1395.
Li T, Cao J W, Xie F L, *et al*. ABR decarbonization-nitrosation coupled with ANAMMOX to treat municipal wastewater [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1390-1395.

[36] Li J L, Li J W, Peng Y Z, *et al*. Insight into the impacts of organics on anammox and their potential linking to system performance of sewage partial nitrification-anammox (PN/A): a critical review [J]. Bioresource Technology, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122655.

[37] 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 等. 基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5058-5064.
An F J, Huang J M, Huang L, *et al*. Effect of substrate ratio on removal of nitrogen and carbon using anaerobic ammonium oxidation and denitrification[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5058-5064.

[38] 童颖. 有机物对厌氧氨氧化双向影响及抑制解除[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
Tong Y. Two-way role of organic matter on anammox and inhibition[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.

[39] Wang Z Z, Ji Y, Yan L N, *et al*. Simultaneous anammox and denitrification process shifted from the anammox process in response to C/N ratios: Performance, sludge granulation, and microbial community [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2020, **130**(3): 319-326.

[40] 马艳红, 赵智超, 安芳娇, 等. 不同 COD 浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2317-2325.
Ma Y H, Zhao Z C, An F J, *et al*. Start-up performance of low-substrate anaerobic ammonium oxidation under different COD concentrations[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2317-2325.

[41] 王凡, 刘凯, 林兴, 等. 不同 TOC/NH_4^+-N对厌氧氨氧化脱氮效能的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3415-3421.
Wang F, Liu K, Lin X, *et al*. Effect of different TOC to NH_4^+-N ratios on nitrogen removal efficiency in the ANAMMOX process [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3415-3421.

[42] Zhang X Y, Liu Y, Li Z R, *et al*. Impact of COD/N on anammox granular sludge with different biological carriers[J]. Science of the Total Environment, 2020, **728**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138557.

[43] 刘安迪. 部分亚硝化耦合厌氧氨氧化脱氮除碳性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
Liu A D. Experimental study on nitrogen and carbon removal performance of partial nitrification coupled with anaerobic ammonia oxidation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.

[44] Deng L Y, Peng Y Z, Li J W, *et al*. Enhanced simultaneous nitrogen and phosphorus removal from low COD/TIN domestic wastewater through nitritation-denitritation coupling improved anammox process with an optimal Anaerobic/Oxic/Anoxic strategy [J]. Bioresource Technology, 2021, **322**, doi: 10.1016/J.biortech.2020.124526.

[45] Pijuan M, Ribera-Guardia A, Balcúzar J L, *et al*. Effect of COD on mainstream anammox: Evaluation of process performance, granule morphology and nitrous oxide production[J]. Science of the Total Environment, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136372.

HUANJING KEXUE Vol. 42 No. 10
Environmental Science (monthly) Oct. 15, 2021

CONTENTS

Continuous $PM_{2.5}$ Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events ······ CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, *et al.* (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ on the Fen-Wei Plain ······ HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, *et al.* (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province ······ LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, *et al.* (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China ······ HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, *et al.* (4602)
Characteristics of O_3 Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring ······ HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, *et al.* (4611)
O_3 Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations ······ HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, *et al.* (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O_3 Pollution Between August to September, Langfang Development Zones ······ ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, *et al.* (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province ······ ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, *et al.* (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay ······ XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, *et al.* (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution ······ WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, *et al.* (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter ······ ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, *et al.* (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants ······ YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin ······ WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, *et al.* (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China ······ LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA ······ LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, *et al.* (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China ······ REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake ······ GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, *et al.* (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China ······ YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, *et al.* (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China ······ ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, *et al.* (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO_3-Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta ······ LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, *et al.* (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area ······ WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, *et al.* (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria ······ ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, *et al.* (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co^{2+} System: Influencing Factors and Mechanisms ······ WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, *et al.* (4789)
Degradation 2,2′,4,4′-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α-MnO_2 ······ LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, *et al.* (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate ······ ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar ······ WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process ······ LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, *et al.* (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China ······ GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, *et al.* (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types ······ YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitritation and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage ······ QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, *et al.* (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitratation Granular Sludge ······ ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China ······ ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, *et al.* (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin ······ CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, *et al.* (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area ······ LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, *et al.* (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi ······ LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, *et al.* (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil ······ DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, *et al.* (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province ······ YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, *et al.* (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches ······ MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan ······ ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, *et al.* (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil ······ LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, *et al.* (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China ······ LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, *et al.* (4951)
Denitrification Rates and *nirS*-type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau ······ LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, *et al.* (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain ······ WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, *et al.* (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvo-aquic Soil Under Different Rotation Fallow ······ NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, *et al.* (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil ······ LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, *et al.* (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of *Phragmites australis* and Their Limiting Factors in Iron Tailings ······ CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, *et al.* (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils ······ ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, *et al.* (5010)
Response of Yield, CH, and N_2O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO_2 Concentrations ······ YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, *et al.* (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars ······ YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, *et al.* (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities ······ LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials ······ ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)