王　昶, 胡　洁, 王耀琛, 等. 无回流生物滤床净化槽脱氮效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 316-322.
WANG Chang, HU Jie, WANG Yao-chen, et al. Study on nitrogen removal effect of non-circumfluence bio-filter purifying tank[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 316-322.

无回流生物滤床净化槽脱氮效果的研究

王　昶, 胡　洁, 王耀琛, 马越凡, 曾　明, 李　丽

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘　要: 构建一种脱氮的无回流生物滤床家庭生活污水处理一体化净化槽, 研究其处理效果; 改变各区内的曝气形式, 形成 A/O/A/O 的脱氮工艺, 通过测定各区 COD、NH_4^+-N、NO_3^--N 和 TN 的浓度变化, 考察其处理效果。结果表明: 随着净化槽各区生物滤床的加入, 反应器抗冲击性增强, 处理效果明显提高。但 A/O/A/O 系统中第二级厌氧过程因碳源不足, 脱氮效果不佳, 改用分段进水后, 净化槽不仅运行稳定, 而且取得了很好的处理效果, 出水 COD 平均浓度 12.3 mg·L^{-1}, NH_4^+-N 平均浓度 2.7 mg·L^{-1}, TN 平均浓度 13.0 mg·L^{-1}, 均达到国标(GB 18918—2002)一级 A 标准。A/O/A/O 生物滤床新型净化槽不仅在结构上形成一体化, 而且由于生物滤床的使用, 不需要污泥回流, 节省能耗, 通过分段进水可以实现过程脱氮。

关键词: 生活污水; 净化槽; 生物滤床; A/O/A/O 工艺; 分段进水; 脱氮
中图分类号: X52　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1672-2043(2018)02-0316-07　　doi:10.11654/jaes.2017-1021

Study on nitrogen removal effect of non-circumfluence bio-filter purifying tank

WANG Chang, HU Jie, WANG Yao-chen, MA Yue-fan, ZENG Ming, LI Li
(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: A non-circumfluence multi-functional integrated bio-filter purifying tank was developed to study the removal performance of nitrogen and chemical oxygen demand(COD) in rural domestic sewage. The influence of support media on pollutant biodegradation was investigated by adding support media in each zone in a stepwise manner. Subsequently, the aeration condition was changed to anaerobic/oxide/anoxic/oxide(A/O/A/O) mode and variations of COD, NH_4^+-N, NO_3^--N, and total nitrogen(TN) concentrations in each zone were detected. Stable effluent quality and good resistance to shock-loading were achieved in the purifying tank when the support media were employed. In the A/O/A/O system, the denitrification efficiency was unsatisfactory because of the lack of carbon source in the second anoxic stage. However, when the step-feed strategy was adopted, the treating performance of the purifying tank became stable and afforded highly efficient nitrogen removal. Specifically, the average effluent concentration of COD, NH_4^+-N, and TN reached 12.3, 2.7 mg·L^{-1} and 13.0 mg·L^{-1}, respectively, which satisfies the national primary A of discharge standard(GB 18918—2002). Overall, the purifying tank with the A/O/A/O operation mode not only performed as a compact reactor to remove nitrogen by step-feed, but also avoided the recirculation of sludge by employing the bio-filter and saved energy costs.

Keywords: domestic sewage; purifying tank; bio-filter; A/O/A/O process; step-feed; nitrogen removal

水是人类生存必不可少的一种生活资源, 是保证社会和谐稳定与生产发展的重要因素[1]。2010 年第一次全国污染源普查结果显示[2], 农业源污染物化学需氧量(COD)、总氮(TN)的排放量分别占总排放量的 43.7%、57.2%。农村污水具有排放源分散、污水产生量小、水质水量波动大等特点, 因此, 在处理农村污水时需因地制宜, 选择投资费用少、运行管理简单的分散式处理工艺[3-5]。小型污水净化槽是一种非常适合农

收稿日期: 2017-07-22　　**录用日期**: 2017-10-16
作者简介: 王　昶(1958—), 男, 江苏人, 教授, 从事水处理技术研究。E-mail: wangc88@163.com
基金项目: 天津市科委重大专项([2014]14ZCDGNC00097); 天津市农委重大专项合作项目(201404140)
Project supported: The Science and Technology Commission of Tianjin, China([2014]14ZCDGNC00097); The Agricultural Commission of Tianjin, China (201404140)

村生活污水原位处理的技术,具有抗冲击性好、固液分离、安装简便等优点,该技术方法已经成为国内外生活污水处理的一种新理念[3,6]。

到 2010 年我国沿海地区全面实行了自来水化,改变了农村的生活环境,提高了农民的生活质量。但由于后续的家庭生活污水处理设施未能衔接,生活污水已逐步成为农村水环境污染的重要原因之一。为了加快农村水环境的污染治理,建设美丽乡村,农村生活污水的处理需要更加严格。众所周知,传统的净化槽虽然采用了厌氧和好氧的组合工艺,但出水 TN往往很高[7],仍然会消耗水体溶解氧[8]并造成农村水环境的富营养化[9-11],为此,开辟节能减排的脱氮工艺成为必要。

本研究采用无回流的方法, 降低过程的能耗,建立了 A/O/A/O 工艺系统。通过滤床挂膜的形式,提高了生物反应器内部的有效利用率,减少过程中污泥的产生。对比传统 A/O 工艺[12-15],探讨生物滤床对生活污水处理的效果,研究各区域在生物滤床的作用下,出水 COD、TN、氨氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、亚硝态氮(NO_2^--N)等浓度变化。调查一级好氧产生的 NO_3^--N 在后续厌氧反硝化的过程中借助剩余的碳源或者分点投加污水碳源脱氮的作用,构建净化槽脱氮的新工艺。为今后的实际应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1 实验装置与工艺流程

本研究所使用的无动力自流式反应器采用有机玻璃制成,共分为六个区域,前四个区域采用水平推流模式,各区域之间不存在返混,第二和第四个区域可以通过曝气的方式实现有氧全混。由于不采用回流,各区域内相应的微生物不易流失[16]。采用生物滤床,降低了过程的能耗,后续再连接沉淀槽和消毒槽,形成一个完整的处理装置。采用小型曝气机为所需要的区域供给氧气。净化槽总体积为 48 L,前四个区域体积均为 10 L,后两个区域体积分别为 4.5、1.5 L。小型净化槽装置及工艺流程如图 1 所示。

1.2 实验材料

1.2.1 实验用水

实验用水样为天津科技大学泰达校区生活污水,其水质参数见表 1。由表可知,校园污水水质虽然有较大波动,但仍属于常规生活污水。

1.2.2 填料

填料是本研究小组专门开发的有孔波纹聚乙烯材料,不同区域充填体积有所不同,基本占整个体积的 40%~60%,具体情况见参考文献[17]。

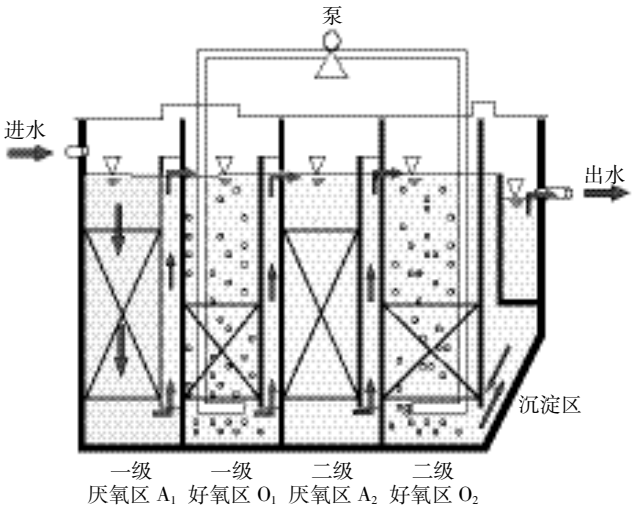


图 1 生活污水一体化净化槽装置

Figure 1 Schematic diagram of the integrated purifying tank for the treatment of domestic sewage

表 1 生活污水主要水质参数

Table 1 Main water quality parameters of domestic sewage

指标	范围值	平均值	标准差
COD/mg·L^{-1}	213~419	316.4	75.5
BOD_5/mg·L^{-1}	120~320	155.0	62.0
TN/mg·L^{-1}	47.1~120.2	85.5	24.6
NH_4^+-N/mg·L^{-1}	35.6~87.9	61.7	18.3
NO_3^--N/mg·L^{-1}	0.1~0.9	0.2	0.3
TP/mg·L^{-1}	4.3~9.3	6.1	3.9
pH	7.37~8.51	7.9	0.9
浊度/NTU	30.9~80.7	61.2	15.7
T/℃	16.1~23.7	19.1	2.8
DO/mg·L^{-1}	0	0	0

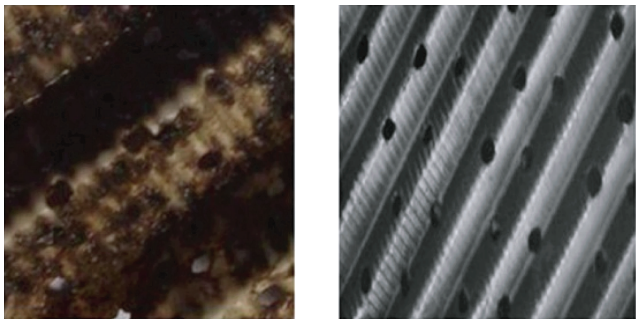
1.2.3 分析仪器与试剂

研究主要跟踪水中的 COD、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N 等浓度变化,来考察工艺的脱氮效果。定期采集净化槽的进水及各级反应区出水口水样进行检测。水样经过 0.45 μm 滤膜过滤去除悬浮颗粒物,各指标测定方法:TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度计法(GB 11894—1989);NO_2^--N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法(GB/T 7493—1987);COD 采用重铬酸钾法(GB 11914—1989);TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)。NH_4^+-N 和 NO_3^--N 采用氨氮、硝氮水质在线分析仪测定(德国 WTW,DIQ/S 182)。所有检测中使用的试剂均为符合国家标准的分析纯和优级纯试剂。

1.3 实验方法

本试验采用生活污水动态培养自然挂膜法，填料经表面活性剂全面清洗，去除油垢，交叉叠合捆扎一体，分别占厌氧槽和好氧槽体积的 60%和 40%。

好氧挂膜采用常规的活性污泥法，取生活区污水和污水厂活性污泥放入容器内，进行连续曝气，每天用生活污水更换三分之一的上清液，大约一周后基本形成如图 2A 所示的絮状棕褐色好氧膜[18]。厌氧挂膜是将填料置于天津科技大学校园生活区化粪池出水的厌氧井中，不定期搅拌水体并跟踪观察。厌氧污泥亲水性很差，挂膜较难，需要微生物分泌粘性代谢物质在填料表面附着，增加微生物的附着能力。约一个月后，波纹板填料表面形成了不易剥落、质地均匀的黑色厌氧生物膜，如图 2B 所示。



A B

图 2 挂膜完成的好氧(A)和厌氧波纹板料表面(B)

Figure 2 The pictures of aerobic(A) and anaerobic(B) biofilm on the surface of support media

将挂好的膜根据实验要求置于相应的区域，调节曝气量以及进水流量，定期观察各区域生物膜的颜色以及运行状况的变化，同时分别从各区域取水样进行分析，检测各区域中 COD、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N 等水质指标，研究其变化规律和去除率。

为强化工艺脱氮效果，解决 $A_1/O_1/A_2/O_2$ 工艺厌氧反硝化区污水中碳源不足造成的出水 NO_3^--N 浓度高的现象[18]，对 A_2 区进行分段进水，保持进水总流量13 L·d^{-1} 不变，A_1 和 A_2 反应区污水流量配比 Q_1:Q_2 为 2:1[19-22](即 Q_1=8.7 mg·L^{-1}，Q_2=4.3 mg·L^{-1})。

2 结果与讨论

2.1 生物滤床对净化槽出水水质的影响

众所周知，大多数生活污水处理都是采用活性污泥法，但对于农村单户型或多户型净化槽而言，活性污泥法因污泥回流等原因，能耗大，需要动力装置和人员管理，所以生物滤床更具有适用性。

2.1.1 一级好氧区中生物滤床对净化槽出水水质的影响

本研究采用了四个区域分段连续处理，最后一段实行曝气，让前段厌氧水解的污水在好氧生物滤床作用下进一步降解。图 3 表示的是各区域 COD 的经时变化规律，横坐标为连续的处理时间，纵坐标表示 COD 浓度及去除率。实验条件为连续进水，进水流量为 13 L·d^{-1}，反应器平均停留时间为 72 h。

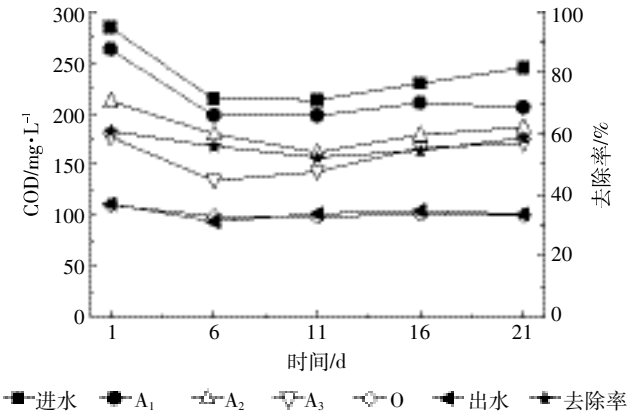


图 3 仅添加好氧滤床条件下净化槽各区 COD 浓度及去除率的变化

Figure 3 Variations of COD concentration and COD removal efficiency when support media was put in oxide stage of purifying tank

由图 3 可知，进水 COD 浓度在 213~285 mg·L^{-1} 范围波动(平均 237.2 mg·L^{-1})，由于各区域没有搅拌装置，且前三个区域的厌氧微生物自身具有不亲水性，再加上平推流的作用，往往底部微生物浓度高，单位体积有效利用率低。即使经过三级厌氧处理，COD 平均浓度仍然在 158 mg·L^{-1}，平均去除率也只有 33.2%，其作用和普通化粪池一样。该污水进入生物滤床好氧区后，COD 浓度明显降低，其平均浓度降低至 103.2 mg·L^{-1}，这不仅说明好氧微生物的降解能力大，而且还表明好氧微生物负载在填料上，提高了单位体积利用率，降低了出水中的污泥浓度，使最终沉淀槽出水 COD 的平均浓度为 103.7 mg·L^{-1}，平均去除率达到 56.0%。

图 4 表示在相同条件下各区域的 NH_4^+-N、NO_3^--N 和 TN 浓度的沿程变化。由于各区域检测出的 NO_2^--N 浓度极低，故在图中不做讨论。本实验期间校园生活污水 NH_4^+-N 和 TN 浓度都较高，分别在 83.3~87.9 mg·L^{-1} 和 110~120 mg·L^{-1} 浓度范围变化，NO_3^--N 浓度低于 1 mg·L^{-1}。由图可知，污水经过三级无生物滤

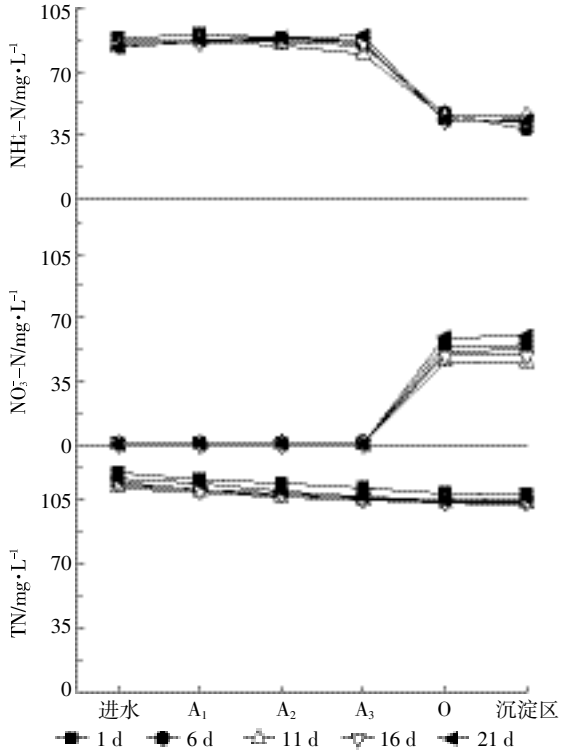


图 4　仅添加好氧滤床条件下净化槽沿程各区 NH_4^+-N、NO_3^--N 及 TN 浓度变化

Figure 4　Variations of NH_4^+-N, NO_3^--N and TN concentration in each reaction zone when support media was put in oxide stage of purifying tank

床的厌氧区,因氨化微生物的作用,有机氮分解,NH_4^+-N 稍有增加。进入好氧区后,在硝化菌的作用下发生硝化反应,NH_4^+-N 浓度显著下降,由平均 85.9 mg·L^{-1} 降低至平均 42.4 mg·L^{-1},NO_3^--N 浓度相应增加至平均 52.0 mg·L^{-1},但是 NO_3^--N 浓度变化量大于 NH_4^+-N 浓度的变化量,这是由于有机氮含量降低并转化为氨氮。沉淀槽出水中 NH_4^+-N 平均浓度为 42.4 mg·L^{-1},平均去除率为 50.0%; 由于无反硝化过程,NO_3^--N 平均浓度为 52.5 mg·L^{-1};TN 平均浓度为 105.1 mg·L^{-1}。

2.1.2　三级厌氧一级好氧生物滤床对净化槽出水水质的影响

一级好氧区生物滤床稳定运行下,将在学校化粪井中挂膜一个月的波纹板填料分别置于前置的三个厌氧区内,形成三级厌氧一级好氧生物滤床生物反应器。连续进水,7 d 之后,分别取样,测定其 COD、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N 浓度,考察这些水质指标的变化情况。

图 5 表示在生物滤床存在条件下各区域 COD 浓度及其去除率的经时变化。由图可知,污水经过第一级生物滤床厌氧反应区后,COD 浓度明显下降,平均

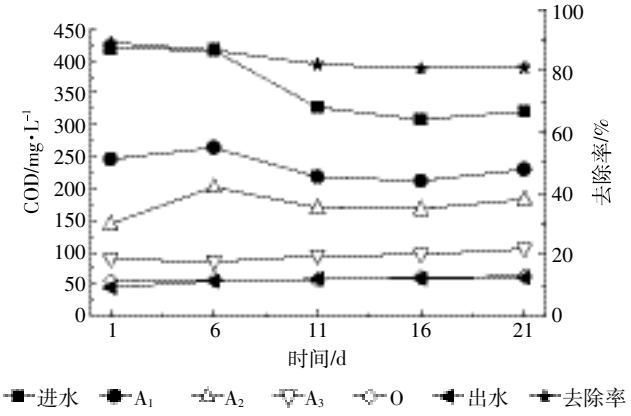


图 5　三级厌氧一级好氧生物滤床净化槽各区 COD 浓度及去除率变化

Figure 5　Variations of COD concentration and COD removal efficiency in A/A/A/O operation mode

去除率为 34.2%,最大可达 41.4%。污水经过第三级生物滤床厌氧反应区后,COD 浓度大幅下降,从原水平均 358.2 mg·L^{-1},下降到平均 94.2 mg·L^{-1},平均去除率为 73.0%, 远高于仅添加好氧生物滤床的情况(33.2%),这是由于厌氧生物滤床的添加,增加了反应器厌氧微生物的平均浓度以及单位体积利用率,促进污染物的酸化水解。污水再经过生物滤床好氧反应区的进一步氧化分解,沉淀槽出水水质稳定,COD 平均浓度 55.6 mg·L^{-1},平均去除率 84.0%。从各区 COD 浓度的经时变化看,第一级、第二级厌氧过程受进口浓度影响较大, 而第三极厌氧和好氧区域相对稳定,表明生物滤床的抗冲击性能较强。

图 6 表示各区域内 NH_4^+-N、NO_3^--N 和 TN 浓度的沿程变化,由于各区域检测出的 NO_2^--N 浓度极低,故在图中不做讨论。由图可知,在 21 d 连续跟踪检测中,NH_4^+-N、NO_3^--N 和 TN 浓度在各区内的变化呈现规律性。厌氧区氮化合物主要以 NH_4^+-N 形式存在,NO_3^--N 含量很少。在好氧区,NH_4^+-N 在硝化菌的作用下显著降低(平均 14.9 mg·L^{-1}),并转化为 NO_3^--N(平均 20.4 mg·L^{-1})。沉淀槽出水 TN 浓度有了轻微减少,平均浓度为 55.8 mg·L^{-1}, 但仍然远高于出水一级 A 标准(TN 15 mg·L^{-1}),平均去除率为 28.7%;NH_4^+-N 平均浓度为 15.2 mg·L^{-1},平均去除率为 74.4%。沉淀区是一个稳定区,由于污泥量极少,对水质的影响也很小,NH_4^+-N、NO_3^--N 和 TN 的浓度变化很小。

2.1.3　A/O/A/O 生物滤床对净化槽出水水质的影响

将上述三级厌氧一级好氧生物滤床净化槽中的第二级厌氧生物滤床改换成好氧生物滤床,并进行曝气,形成 A/O/A/O 工艺,观察其填料表面生物膜生

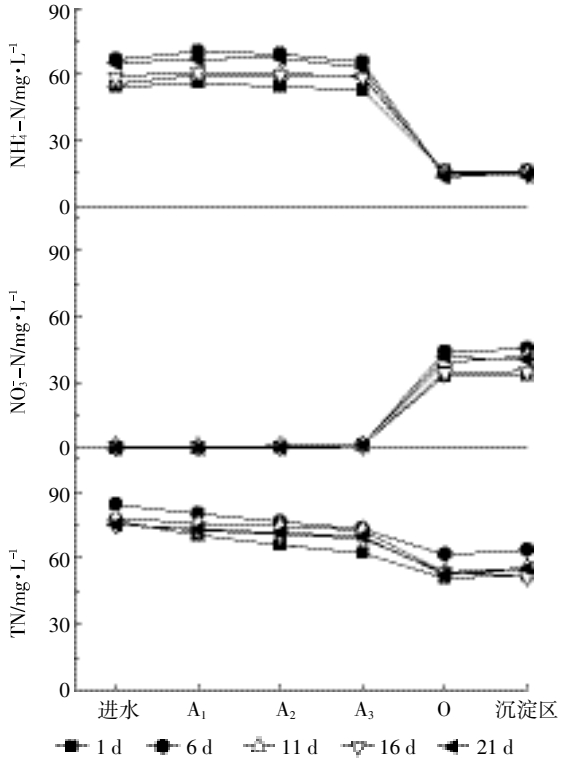


图 6 三级厌氧一级好氧生物滤床净化槽沿程各区 NH_4^+-N、NO_3^--N 及 TN 浓度的变化

Figure 6 Variations of NH_4^+-N, NO_3^--N and TN concentration in each reaction zone in A/A/A/O operation mode

长状况和出水水质情况,稳定进水运行 7 d 后,定期检测各区 COD、NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N 和 TN 浓度变化。

图 7 表示 A/O/A/O 生物滤床对 COD 浓度及其去除率的影响。污水经过第一级厌氧反应区(A_1)后,COD 浓度变化基本与图 5 相同;经过第一级好氧区(O_1)后,COD 明显下降,其平均浓度在 65 mg·L^{-1} 左右。经过第二级厌氧区(A_2)后,由于 COD 浓度很低,厌氧过程的降解效果不如第一级厌氧效果明显。最后污水经过第二级好氧区(O_2)后,COD 浓度降低至平均 20.6 mg·L^{-1},沉淀槽出水 COD 平均浓度为 21.6 mg·L^{-1},远低于国标(GB 18918—2002)一级 A 标准规定的 50 mg·L^{-1}。A/O/A/O 生物滤床反应器因增加了一个好氧过程,处理效果显著增加,处理能力也相应增加。

图 8 表示净化槽各级反应区沿程 NH_4^+-N、NO_3^--N 和 TN 浓度变化。本阶段校园生活污水 NH_4^+-N 和 TN 的浓度范围分别在 40.1~63.9 mg·L^{-1} 和 62.7~82.9 mg·L^{-1},NO_3^--N 浓度低于 1 mg·L^{-1}。由图可知,污水经过第一级好氧区(O_1)后,NH_4^+-N 浓度降低至平均 20.9 mg·L^{-1},而 NO_3^--N 浓度升高至 30.5 mg·L^{-1},TN 浓

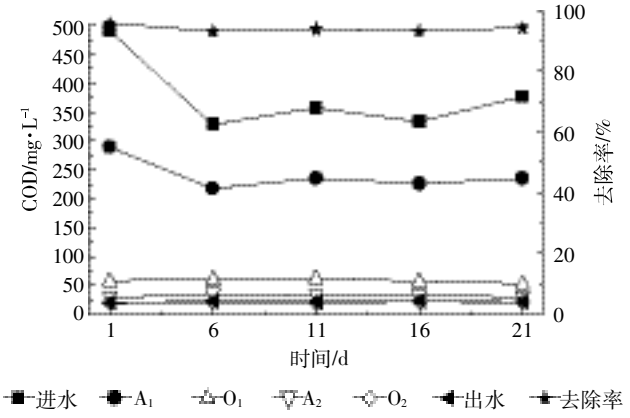


图 7 A/O/A/O 生物滤床净化槽各区 COD 浓度及去除率变化

Figure 7 Variations of COD concentration and COD removal efficiency in A/O/A/O operation mode

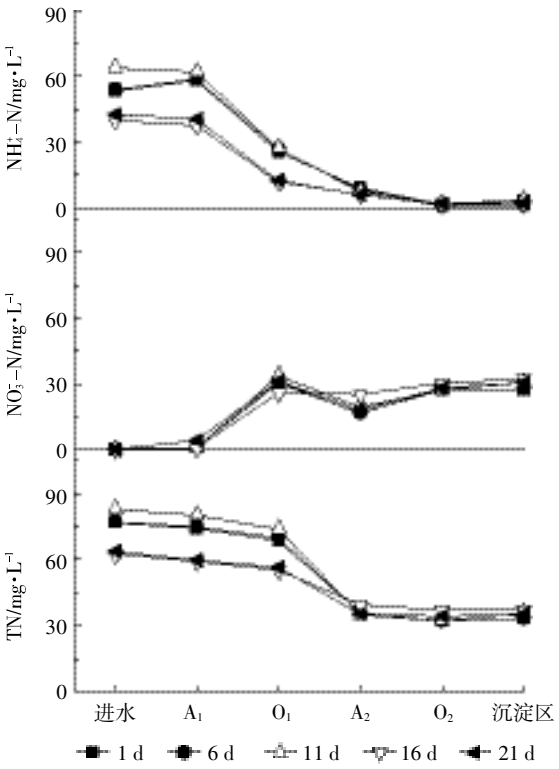


图 8 A/O/A/O 生物滤床净化槽沿程各区 NH_4^+-N、NO_3^--N 及 TN 浓度的变化

Figure 8 Variations of NH_4^+-N, NO_3^--N and TN concentration in each reaction zone in A/O/A/O operation mode

度仅有微小变化;污水经过第二级厌氧反应区(A_2)后,NO_3^--N 浓度减少至平均 19.3 mg·L^{-1},TN 浓度降低至 36.4 mg·L^{-1},这是由反硝化菌作用造成的;经过第二级好氧区(O_2),NH_4^+-N 平均浓度为 1.6 mg·L^{-1},沉淀槽出水 NH_4^+-N 平均浓度为 2.5 mg·L^{-1},低于国家一级 A 排放标准,其平均去除率达到 95.0%。但由于第二级厌氧反硝化区污水中碳源不足,沉淀槽出水中

NO_3^-–N 平均浓度(30.3 mg·L^{-1})和 TN 平均浓度(34.9 mg·L^{-1})偏高,所以,要使得反硝化过程发挥作用,提供碳源十分重要。

2.2 A/O/A/O 生物滤床工艺下分段进水对净化槽出水水质的影响

为强化 $A_1/O_1/A_2/O_2$ 工艺脱氮效果,对 A_2 区进行分段进水,保持进水总流量 13 L·d^{-1} 不变,A_1 和 A_2 反应区污水流量配比 Q_1:Q_2 为 2:1(即 Q_1=8.7 mg·L^{-1},Q_2=4.3 mg·L^{-1}),稳定 7 d 左右,定期测量各反应区 COD、NH_4^+–N、NO_3^-–N、NO_2^-–N 和 TN 浓度变化,测定结果分别见图 9、图 10。

图 9 表示分段进水后各区的 COD 浓度及其去除率的经时变化。由图可知,连续进水经过第一级 A/O 后,COD 浓度下降很多,后续的第二级 A/O 的作用则显示不出。采用分段进水,不仅有效利用了第一级 A/O 的降解作用,而且还加大了第二级 A/O 的降解功能。沉淀槽出水的 COD 浓度已降至 12.3 mg·L^{-1} 左右,平均去除率达到 95.3%。

图 10 表示 A/O/A/O 生物滤床工艺分段进水条件下净化槽各级反应区沿程 NH_4^+–N、NO_3^-–N 和 TN 浓度变化。由图可知,虽然进水和分段进水各水质浓度有波动,但这些水质指标沿着各段的变化规律相同。第一级好氧区(O_1)出水 NH_4^+–N 浓度明显下降,NO_3^-–N 浓度明显升高,而 TN 浓度下降较少。由于第二级厌氧区(A_2)分段进水提供了碳源,强化了该段的反硝化脱氮效果,NO_3^-–N、TN 浓度下降显著,NH_4^+–N、NO_3^-–N 和 TN 平均浓度分别为 12.6、3.1、17.4 mg·L^{-1}。污水经过第二级好氧区后,NH_4^+–N 进一步氧化,沉淀槽出水 NH_4^+–N、NO_3^-–N 和 TN 平均浓度分别为 2.7、10.0、13.0 mg·L^{-1},其浓度均低于国家一级 A 排放标准,NH_4^+–N 和 TN 的平均去除率分别为 93.1%、73.8%。由此可见,在净化槽第二级厌氧区实行分段进水可以很好地解决碳源不足的问题,强化了工艺的脱氮功能。

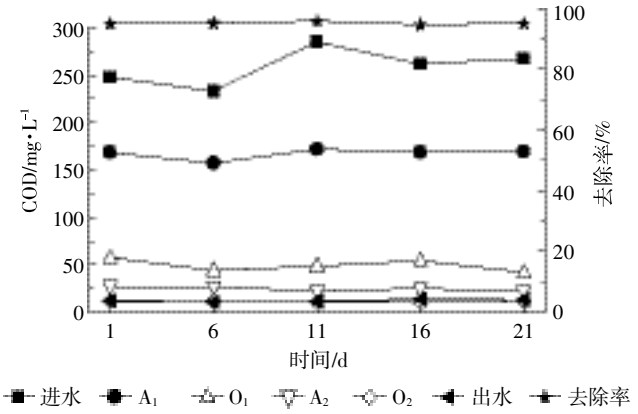


图 9 A/O/A/O 生物滤床工艺分段进水净化槽各区 COD 浓度及去除率变化

Figure 9 Variations of COD concentration and COD removal efficiency in step-feed A/O/A/O operation mode

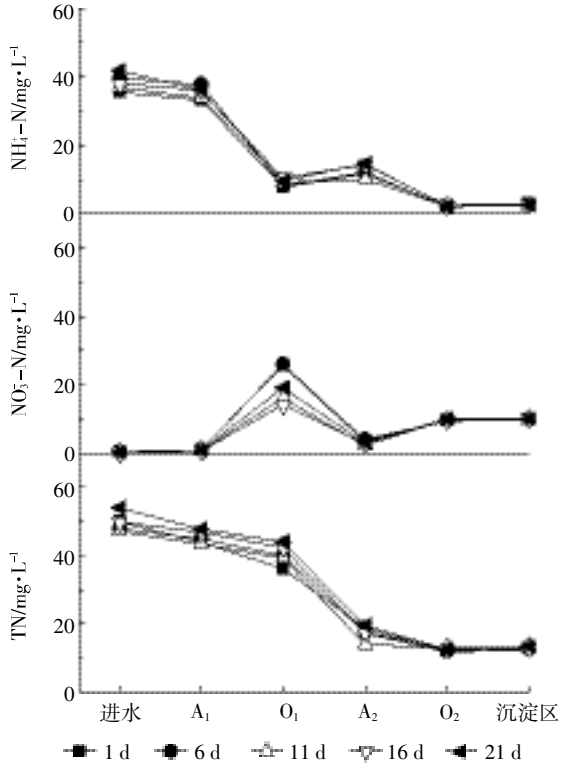


图 10 A/O/A/O 生物滤床分段进水净化槽沿程各区 NH_4^+–N、NO_3^-–N 及 TN 浓度的变化

Figure 10 Variations of NH_4^+–N, NO_3^-–N and TN concentration in each reaction zone in steep-feed A/O/A/O operation mode

3 结论

(1)净化槽在 A/A/A/O 运行条件下,当只在好氧区添加生物滤床时,出水 COD、NH_4^+–N、TN 平均浓度分别为 103.7、42.4、105.1 mg·L^{-1},水质不佳,平均去除率分别为 56.0%、50.0%、8.9%;当各区填料全部放入且稳定运行时,出水 COD、NH_4^+–N、TN 平均浓度分别为 55.6、15.2、55.8 mg·L^{-1},平均去除率分别为84.0%、74.4%、28.7%,出水水质仍然未达到排放标准。但生物滤床的添加有助于过程的去除效率。

(2)净化槽在 A/O/A/O 运行条件下,各段均添加生物滤床时,出水水质显著提高,出水 COD、NH_4^+–N、TN 平均浓度分别为 20.6、2.5、34.9 mg·L^{-1},平均去除率分别为 94.1%、95%、51.3%,只有 TN 浓度欠佳,这是由于二级厌氧反应区碳源不足所致。

(3)净化槽在添加生物滤床,A/O/A/O 运行且分段进水条件下,出水 COD、NH_4^+-N、TN 平均浓度分别为 12.3、2.7、13.0 mg·L^{-1},平均去除率分别为 95.3%、93.1%、73.8%,出水水质均达到国家一级 A 排放标准。

(4)A/O/A/O 生物滤床新型净化槽不仅在结构上形成一体化,而且由于生物滤床的使用,不需要污泥回流,节省能耗,通过分段进水可以实现过程脱氮,解决了传统净化槽不易脱氮难题,可对农村分散式生活污水处理发挥重要的指导作用。

参考文献:

[1] 杨 庆, 王淑莹, 杨岸明, 等. 城市污水 SBR 法短程生物脱氮的中试研究[J]. 中国环境科学, 2007, 27(2):150-154.
YANG Qing, WANG Shu-ying, YANG An-ming, et al. A pilot scale study on short-cut biological nitrogen removal of municipal wastewater with SBR process[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(2):150-154.

[2] 孙秀艳. 第一次全国污染源普查结果发布[N]. 人民日报, 2010-02-10(15 版).
SUN Xiu-yan. The first national pollution source census results released [N]. People's Daily, 2010-02-10(15th Edition).

[3] 吴光前, 孙新元, 张齐生. 净化槽技术在中国农村污水分散处理中的应用[J]. 环境科技, 2010, 23(6):36-40.
WU Guang-qian, SUN Xin-yuan, ZHANG Qi-sheng, et al. Application of purification tank in distributed rural sewage treatment in China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 23(6):36-40.

[4] 冯 欣, 赵 军, 郎咸明, 等. 净化槽技术在我国农村污水处理中的应用前景[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(7):4165-4166.
FENG Xin, ZHAO Jun, LANG Xian-ming, et al. Application prospect of johkasou to the treatment of rural sewage in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(7):4165-4166.

[5] 曾 明. 归一模块化农村生活污水处理模式的开发与应用[J]. 天津科技大学学报, 2016, 31(6):2.
ZENG Ming. Development and application of normalized moderate rural sewage treatment model[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2016, 31(6):2.

[6] Philippi L S, Costa R H R D, Sezerino P H. Domestic effluent treatment through integrated system of septic tank and root zone[J]. *Water Science & Technology*, 1999, 40(3):125-131.

[7] 龚 正, 龙腾锐, 曹艳晓, 等. 分点进水 A/O 工艺处理低碳源生活污水的脱氮性能研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(1):85-89.
GONG Zheng, LONG Teng-rui, CAO Yan-xiao, et al. Study on performance of step-feed biological nitrogen removal A/O process[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(1):85-89.

[8] Kumar M, Lin J G. Co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen and carbon removal -strategies and issues [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1/2/3):1-9.

[9] 李子成, 邓义祥, 郑丙辉. 中国湖库营养状态现状调查分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(增刊):209-213.
LI Zi-cheng, DENG Yi-xiang, ZHENG Bing-hui. Investigation of the eutrophication status of the lakes and reservoirs in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(Suppl):209-213.

[10] Du R, Peng Y Z, Cao S B, et al. Advanced nitrogen removal from wastewater by combining anammox with partial denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179:497-504.

[11] Kosari S F, Rezania B, Lo K V, et al. Operational strategy for nitrogen removal from centrate in a two-stage partial nitrification-anammox process[J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(9):1110-1120.

[12] Chang H Y, Ouyang C F. Improvement of nitrogen and phosphorus removal in the anaerobic-oxic-anoxic-oxic(AOAO) process by stepwise feeding[J]. *Water Science & Technology*, 2000, 42:89-94.

[13] Lim E T, Jeong G T, Bhang S H, et al. Evaluation of pilot-scale modified A_2O processes for the removal of nitrogen compounds from sewage [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(24):6149-6154.

[14] Tao C, Peng T, Feng C P, et al. The feasibility of an up-flow partially aerated biological filter(U-PABF) for nitrogen and COD removal from domestic wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218:307-317.

[15] Jiang S, Zhou J T, Guo H Y, et al. Study on nitrogen removal characteristics of an integrative A/O biofilm reactor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 28(2):71-73.

[16] 王 然, 王 昶, 杜晓雪, 等. 高效自流式家庭生活污水净化槽的研究[J]. 环境工程, 2007, 25(5):21-24.
WANG Ran, WANG Chang, DU Xiao-xue, et al. Study on compact household sewage purifying-tank with natural flowing process[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 25(5):21-24.

[17] 王智成, 王 昶, 酒井裕司, 等. 净化槽中生物滤床种类对家庭生活污水处理效果的影响[J]. 水处理技术, 2011, 37(2):81-84.
WANG Zhi-cheng, WANG Chang, Sakai Yuji, et al. Effect of different kinds of bio-filter on treatment of household sewage in purifying tank [J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 37(2):81-84.

[18] Luo W S, Peng X X, Jing F, et al. Simultaneous microbial removal of carbon, nitrogen, and phosphorus in a modified anaerobic/aerobic(A/O) bioreactor with no phosphorus release[J]. *Water and Environment Journal*, 2017, 31(2):158-167.

[19] 王 伟, 王淑莹, 孙亚男, 等. 分段进水 A/O 工艺流量分配专家系统的建立与应用[J]. 化工学报, 2008, 59(10):2608-2615.
WANG Wei, WANG Shu-ying, SUN Ya-nan, et al. Establishment and application of influent flow distribution expert system in step-feed A/O process[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)*, 2008, 59(10):2608-2615.

[20] 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 Wei, WANG Shu-ying, SUN Ya-nan, 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.

[21] 赵剑强, 胡 博, 陈 莹. 分段进水 A/O 工艺的一些关系式[J]. 环境工程学报, 2010, 4(11):2532-2536.
ZHAO Jian-qiang, HU Bo, CHEN Ying. Some relation equations for step-feed anoxic/oxic process[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(11):2532-2536.

[22] Zhu G B, Peng Y Z, Zhai L M, et al. Performance and optimization of biological nitrogen removal process enhanced by anoxic/oxic step feeding[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 43(3):280-287.