

曝气量对家庭生活污水处理净化槽的水质影响

王 昶¹, 王 莹¹, 杨晓娇¹, 李 琳¹, 谈玉琴²

(1.天津科技大学海洋科学与工程系, 天津 300457; 2.无锡金鑫集团, 江苏 无锡 214121)

摘要:为了满足农村多用户化粪池联用处理要求,对单独净化槽进行了改造。将原有的两级厌氧一级好氧工艺改为一级厌氧两级好氧工艺,提高净化过程的生物处理能力。针对这种新型净化槽,调查了不同曝气量下的生活污水净化能力,分别测定了各区出水水质 COD、BOD₅、NH₃-N 和浊度的变化情况。实验表明,一级好氧和二级好氧中的溶解氧随着曝气量的不断增加表现出先快速增加,然后缓慢增加,最后又快速增加的特点。在曝气量均为 1.8 L·min⁻¹ 时,一级和二级好氧区溶解氧分别为 2.4 mg·L⁻¹ 和 3.1 mg·L⁻¹,出水 COD、BOD₅、NH₃-N 和浊度分别为 23、13、7.6 mg·L⁻¹ 和 9 NTU。若再增加曝气量,出水水质变化将趋缓,因二级好氧区生物降解的底物浓度较低,已成为主要的控制因素,所以基于能耗的考虑,曝气量的优化就变得更为重要。

关键词:曝气量;生活污水;净化槽

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)07-1436-06 doi:10.11654/jaes.2014.07.026

Influence of Different Aeration Rates on Domestic Sewage Treatment in Purifying Tank Connecting Multiple Septic Tanks

WANG Chang¹, WANG Ying¹, YANG Xiao-jiao¹, LI Lin¹, TAN Yu-qin²

(1.Department of Marine Science & Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2.Wuxi Jinxin Group, Wuxi 214121, China)

Abstract: One purifying tank for one septic tank is difficult to be implemented in rural area in China, owing to the cost. So it is necessary to develop one purifying tank for multiple septic tanks. In this study, an individual purifying tank was reformed to meet the treatment requirements for multiple septic tanks. The original process of two-stage anaerobic and one-stage aerobic digestion was changed into one-stage anaerobic and two-stage aerobic digestion. The ability of biological treatment for purification process was improved. For the new tank, sewage purifying capacity under different aeration intensities was investigated, and chemical oxygen demand (COD), five-day biochemical oxygen demand (BOD₅), NH₃-N and turbidity of effluent from different zones were measured. As aeration rates increased, the dissolved oxygen (DO) in the first aerobic and second aerobic zones increased rapidly at the beginning, then slowly, and finally rapidly again. The DO was 2.4 mg·L⁻¹ and 3.1 mg·L⁻¹ in the first and second aerobic zones respectively, at the aeration rate of 1.8 L·min⁻¹. The values of COD, BOD₅, NH₃-N and turbidity of the effluent were 23 mg·L⁻¹, 13 mg·L⁻¹, 7.6 mg·L⁻¹ and 9 NTU, respectively. However, further increasing aeration did not improve water quality much. The biodegradable substrates in the second aerobic zone were a major controlling factor due to low concentration. Therefore, the optimization of aerobic rates would be important for treating domestic sewage in purifying tank.

Keywords: aeration rate; domestic sewage; purifying tank

随着开放改革,新农村建设有了很大的进步,乡村人民的生活水准也有了大幅度提高,农民对生活质量有了越来越高的要求,大部分城乡结合部以及农村都趋于自来水化,冲厕、洗涤、洗浴以及生活杂水排量

相对剧增。由于公共下水道设施建设落后,生活污水处理仍然处于很低水平,大量生活污水直接排放已成为江河湖泊水体水质下降的一个主要原因^[1-3]。开发运行农村生活污水分散式处理技术,建立一套完整的处理系统已成为当务之急。

目前,国内针对农村家庭生活污水处理研究较多的处理技术主要是人工湿地生态处理系统、稳定塘系统、高效藻类塘以及城市化集中生物处理方法等^[4],但都

收稿日期:2013-12-16

基金项目:科技部专项课题(2011BAC11B04)

作者简介:王 昶(1958—),男,博士,教授,主要研究方向为污水处理、光催化反应、生物质资源化。E-mail:wangc88@163.com

因农村生活污水的特殊性,分散不连续、污水量少、地理复杂以及气候变化等原因,难以推广应用,为此开发适合于农村分散式处理设施更为重要。小型净化槽分散式处理装置以特有的小型高效、抗冲击性强、操作费用低、埋地式不受场地限制、不受自然环境影响、易于管理等特点,特别是具有可以实现标准化和产业化,安装便捷等优势,必将成为未来分散处理重要模式之一^[5]。本项目研究小组从2004年开始,对净化槽进行了系统研究,调查了多种影响因素对出水水质的影响,示范工程也获得了成功,三台单独净化槽在天津市西青区第六阜村至今连续运行4年多。但由于农村生活污水处理的财政投资有限,一户一台净化槽很难推广应用,必须在经济投资上以及运行费用上更加经济实用,因而需要继续开发多户化粪池联用的净化槽,实现四至五户联用。这不仅可以减少投资,操作费用也会减少,更加适用于农村多农户分散相对集中处理和相对集中楼宇居住农户的分散处理。

本研究是在原有的一户一台的净化槽基础上进行改进,借助于家庭自来水化相配备的化粪池,将原有的二级厌氧减为一级厌氧,一级好氧增为二级好氧,提高新型净化槽的好氧降解处理能力,实现出水达标排放。本论文主要讨论二级好氧区的溶解氧随曝气量的变化情况,对不同曝气量下稳定运行时各区水质指标COD、BOD、氨氮以及浊度进行测定,进一步研究不同曝气量对出水水质的影响,从而确定最佳曝气量,为实际运行和选择气泵规格提供必要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置与工艺流程

多户化粪池联用净化槽(以下称为新型净化槽)与一家一户的单独净化槽^[6]相比,在体积上没有变化,主要变化的是工艺过程。一家一户单独净化槽与家庭生活污水直接相连,所以它是由二级厌氧和一级好氧串联而成的,通过对生活污水的厌氧处理,降低好氧处理的负荷,减少处理的曝气能耗;而新型净化槽是与多户化粪池联用,也就是说家庭生活污水先进入三格化粪池,经过一定的厌氧处理后,再进入新型净化槽进行处理,充分发挥现有农村与自来水化相配备的三格化粪池作用,实现低投资高效处理的新模式。结合预处理三格化粪池,既可以使分散农户的生活污水相对集中处理,又可以针对新农村建设楼宇式相对集中农户的分散处理,原位解决楼宇农户生活污水的处理问题。由于三格化粪池自身就是一个厌氧生物反应器,能够将

生活污水酸化水解,COD的去除率大约为50%,而这些被部分降解的污水更容易被好氧菌处理,且好氧分解的速度远大于厌氧的速度,这也是新型净化槽设计成一级厌氧二级好氧的工艺过程的科学依据。为了调查曝气量对处理效果的影响,研究所使用的污水处理量确定为一家一户的4倍。实验装置图如图1所示。

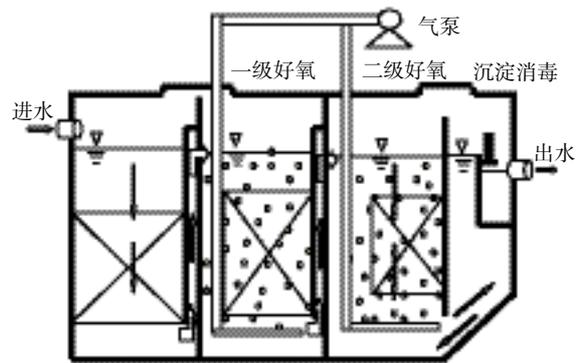


图1 多功能新型净化槽实验装置

Figure 1 Schematic diagram of integrated purifying tank

实验用新型净化槽为实际体积的1/132,各部分体积分别为:厌氧槽14L,一级好氧槽13L,二级好氧槽11L,沉淀槽6L。实验选定不同规格的波纹板作为最佳填料:一种是波纹较粗的,单位体积表面积为 $40\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$,作为好氧区的滤床填料,占好氧槽体积的40%;另一种是波纹较细的,单位体积表面积为 $70\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$,作为厌氧区的滤床填料,占厌氧槽体积的60%。曝气装置选用市场销售的曝气头。

实验装置采用有机玻璃材质,基于生物反应动力学、流体力学以及生物滤床等原理,将厌氧区、一级好氧区、二级好氧区、沉淀区、消毒区五区连在一起,两区共用一壁。这样一体化的设计既节省了材料和能耗,又节省了一定的空间,使其在实际中的安置更加简单方便。厌氧部分采用平推流的原理,通过静压差实现水体的自然流动,抑制了高浓度水体向低浓度区流动;好氧区域采用全混流的模式,通过曝气的搅拌,实现溶解氧的传递,从而实现微生物在稳定的有氧条件下对污染物的去除。厌氧在前,好氧在后,能够大大降低好氧区的有机负荷,达到减少能耗的效果。生物滤床的应用,发挥着固液分离、生物膜吸附以及生物降解的作用,提高了单位体积内的微生物量,从而实现更好的净化效果^[7]。

1.2 实验运行条件和方法

COD:COD-571型化学需氧量分析仪,上海精密科

学仪器有限公司。BOD₅:OxiTop ISI2 BOD, 德国 WTW。NH₃-N:752 型可见分光光度计, 上海精密科学仪器有限公司。溶解氧:Oxi3210 便携式溶解氧仪, 德国 WTW。浊度:Turb355IR 便携式浊度测量仪, 德国 WTW。各种化学药品均采用专业厂家生产的分析纯以上的试剂。

在稳定运行的条件下分别对进水、一级厌氧、一级好氧、二级好氧和出水取样, 同时分别对 COD、BOD、氨氮和浊度进行分析。处理量设计为 30 L·d⁻¹, 是单独净化槽的 4 倍流量, 采用连续进水方式。

装置的启动关键在于挂膜好坏, 考虑到在实际应用中装置启动时间越短越好, 故在试验中采用了污泥接种方式。厌氧区生物滤床挂膜选取校园生活区的厌氧井进行, 不定期搅拌水体并跟踪观察。好氧区生物滤床挂膜利用校园生活区污水借用污水厂的活性污泥在实验室的特定容器内曝气培养。待两种生物滤床挂膜后再放置在新型净化槽中连续进水运行。

净化槽启动成功后, 空气泵的曝气量通过 LML-1 型湿式气体流量计(长春仪表总厂)测定, 同时利用溶氧仪测定好氧槽内的溶解氧。每改变一个曝气量的条件, 装置需要运行 7~8 d 使填料上微生物达到稳定, 测定出水水质的变化情况以及观察生物膜的生长情况, 待系统稳定后进行 2~3 d 测定, 得出曝气量与溶解氧间的关系曲线, 通过分析得出最佳曝气量。同时, 对不同曝气量条件下新型净化槽各个区域的 COD、BOD、氨氮以及浊度进行测定。

1.3 实验水质

实验采用天津科技大学泰达校区学生生活区生活污水。由于污水经过化粪池的初步处理, 污染物浓度有所降低, 在试验中将生活污水进行了一定的调配, 生活污水水质指标如表 1 所示, 该水质参数是由 20 个进水样分析后得到的平均值。为了确保实际过程中与三格化粪池的联用效果, 调配的水质 BOD 高于三格化粪池出水, 大约在 144 mg·L⁻¹, 而 NH₃-N 浓度和浊度分别为 37.9 mg·L⁻¹ 和 135 NTU。

2 结果与讨论

2.1 曝气量对各个区域内溶解氧的影响

好氧区内溶解氧的浓度对污染物的去除起着关键的作用, 溶解氧浓度过低, 不能满足好氧微生物降

解有机物和进行硝化亚硝化反应的需求, 从而使污染物的去除率降低; 曝气量过大, 会产生强烈水力冲刷, 导致填料上的微生物脱落, 使填料上微生物的浓度降低, 同时也会破坏生物膜内的微生态系统, 从而达不到理想的处理效果。因此, 控制溶解氧浓度在最佳的范围内是必要的。在实际应用中, 曝气量的提高无疑会增加过程能耗, 所以在保证较好的处理条件下, 曝气量的优化就极为重要。

溶解氧的浓度与微生物的活性和曝气量有密切关系, 在曝气过程中, 氧分子通过气-液界面由气相转移到液相, 充足的溶解氧保证了水中微生物生长繁殖和新陈代谢^[8]。图 2 表示的是一级好氧区和二级好氧区的溶解氧浓度与曝气量的关系。可以看出, 当曝气量在 0~0.6 L·min⁻¹ 范围内, 溶解氧的浓度随曝气量的增加迅速增大。这是因为在低溶解氧状态下, 微生物的活性很低, 进行的新陈代谢活动较少, 所以对溶解氧的消耗也就比较少^[9]。当溶解氧的浓度增加到一定程度后, 水中的微生物快速繁殖, 新陈代谢活动增强, 同时一些硝化和亚硝化反应也会消耗大量的溶解氧, 所以曝气量在 0.6~1.8 L·min⁻¹ 的范围内, 溶解氧的增长趋势有所降低。由于营养物质浓度是有限的, 好氧区内溶解氧与生物膜的生化反应达到平衡后, 溶解氧的浓度随曝气量的增加又有一个显著上升的趋势。随着溶解氧在水中的饱和, 气体由气相到液相的传递阻力变大, 溶解氧又会呈现平缓的变化趋势^[10]。从图 2 中可以看出, 在曝气量为 1.8 L·min⁻¹ 时有一个比较明显的拐点, 此时一级好氧区和二级好氧区的溶解氧浓度分别为 2.4 mg·L⁻¹ 和 3.1 mg·L⁻¹, 好氧微生物在此溶解氧下仍然具有很好的活性。因此以该操作为条件进行研究, 而且实际运行的曝气量应不低

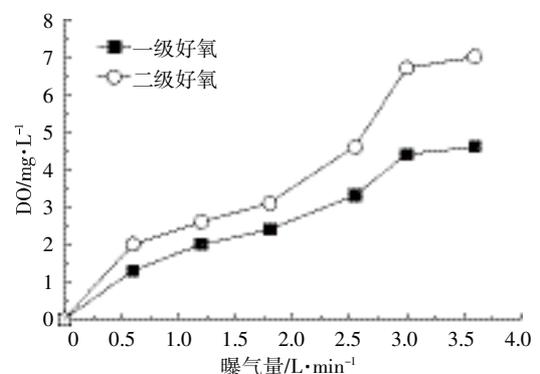


图 2 一级好氧区和二级好氧区内溶解氧随曝气量的变化
Figure 2 Dissolved oxygen in two aerobic zones with different aeration rates

表 1 生活污水主要水质指标

Table 1 Main water quality index of domestic sewage

COD/mg·L ⁻¹	BOD/mg·L ⁻¹	氨氮/mg·L ⁻¹	浊度/NTU
171.0	144	37.9	135

于该值,具体操作的曝气量要以出水水质来决定。

2.2 曝气量对各槽内 COD 的影响

不同的曝气量对净化槽内各区 COD 的影响如图3、图4所示。横坐标分别为一级、二级好氧区的曝气量,纵坐标分别为 COD 浓度和去除率。

生活污水中部分的大颗粒悬浮物、不溶性污染物以及胶体物质经过厌氧区厌氧微生物的发酵水解以及生物滤床的吸附分离作用得到一定程度的去除,出水 COD 约为 $119 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可见仅仅对生活污水进行类似化粪池的厌氧处理是不够的。厌氧产生的水解酸化产物对环境也有较大的危害,所以必须对其进行进一步的好氧处理,达到国家排放标准的同时也使其转化为对环境无害的 CO_2 和 H_2O 。从图4可以看到,溶解氧的浓度越大,COD 的去除效率越好,当曝气量为 $1.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,出水 COD 的浓度为 $23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,已经低于国家一级排放标准(GB 18918—2002),当曝气量增大至 $2.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右时,出水 COD 的浓度为 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

L^{-1} ,随着曝气量的增大,COD 的去除率已经相差不多。在一定污染物浓度下,尤其是生物滤床的作用,降解所需最大耗氧量也是一定的,过高的氧气供给也不会对 COD 去除产生明显的影响,反而会因气速过大引起生物膜的脱落。从降低能耗的角度来说,适度的曝气量有利于节能,降低处理成本。

2.3 曝气量对各槽内 BOD 的影响

生活污水中虽然 COD 含量不很高,但由于含有大量粪便,BOD 的浓度相对较高,所以在实际处理中需要对 BOD 有较高的降解能力,不同曝气量对各区 BOD 的影响如图5、图6所示。横坐标分别为一级、二级好氧区曝气量,纵坐标分别为 BOD 浓度和去除率。

经过厌氧处理后,出水 BOD 的浓度降至 $85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,远未达标,还需要进行有效的好氧降解。溶解氧的浓度是影响处理效率的重要因素之一,经过两级好氧后,BOD 得到更大程度的降解,在曝气量为 $1.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,出水 BOD 的浓度为 $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,当曝气

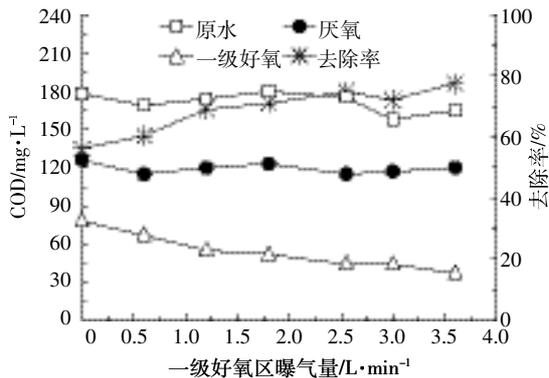


图3 一级好氧区污水 COD 随曝气量的变化

Figure 3 Variation of COD with different aeration rates in the first aerobic zone

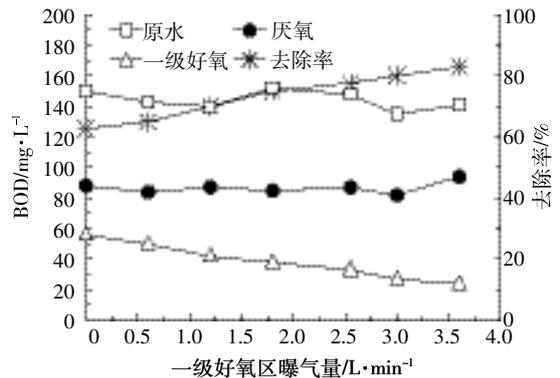


图5 一级好氧区污水 BOD 随曝气量的变化

Figure 5 Variation of BOD with different aeration rates in the first aerobic zone

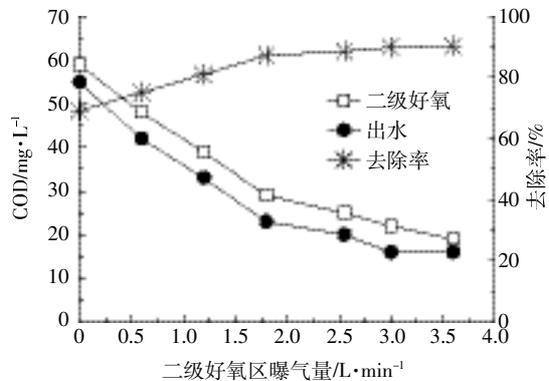


图4 二级好氧区污水 COD 随曝气量的变化

Figure 4 Variation of COD with different aeration rates in the second aerobic zone

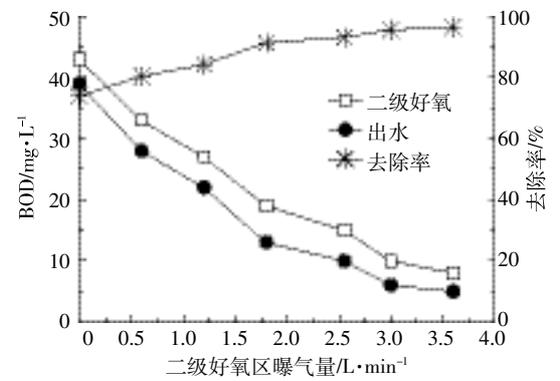


图6 二级好氧区污水 BOD 随曝气量的变化

Figure 6 Variation of BOD with different aeration rates in the second aerobic zone

量增至 $2.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右时, 出水 BOD 的浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这可能是由于好氧槽, 特别是二级好氧槽内污染物浓度已很低, 即使溶解氧浓度升高, BOD 的去除率变化也不大, 此时生物降解的底物已成为控制的主要因素。这也说明出水水质越好, 即 BOD 越低, 曝气量就会增加更多, 所以选择适度的曝气量极为重要, BOD 所对应的曝气量是一个重要的参考指标。广阔的农村具有较大的自然净化能力, 除了特殊地域, 所有的生活污水都能够真正严格处理, 将出水 BOD 控制在 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内, 无疑更加符合国情。

2.4 曝气量对各槽内氨氮的影响

氨氮是造成水体富营养化的主要物质之一, 如果未经处理直接排放会对水体环境造成影响, 因此氨氮的去除对于改善水质十分重要^[11]。目前研究得出, 氨氮的去除主要是通过硝化细菌和亚硝化细菌的硝化和亚硝化过程进行的, 曝气有利于氨氮的去除, 图 7、图 8 所表示的是不同曝气量下各区域氨氮的浓度变

化及其去除率。横坐标分别为一级、二级好氧区的不同曝气量, 纵坐标分别为氨氮浓度及去除率。

在厌氧区内, 经过厌氧微生物的脱氨基作用, 将污水中的含氮有机物分解, 转化为氨态氮, 所以厌氧区氨氮的浓度增加, 高于原污水。在溶解氧浓度为零或很低的厌氧环境中, 氨氮几乎不能去除, 而在好氧区, 由于硝化细菌的世代周期较长, 对溶解氧的亲合力要低于异养菌, 在溶解氧较低的情况下, 大量的溶解氧被异养菌消耗, 硝化作用受到抑制, 因而氨氮的硝化过程缓慢。但随着曝气量的增加, 好氧区内溶解氧的浓度随之增加, 从图 8 可以看到, 一旦曝气量达到 $1.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 尽管本研究所调配的污水本身氨氮浓度比较大, 但出水氨氮浓度仍然可降解到 $7.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率达到 81.69% 。这要归功于充足的溶解氧和反应完全的硝化作用, 此后尽管曝气量增大, 但氨氮的去除率变化很小, 可能是由于二级好氧区在全混流状态下的底物浓度已很低, 是生物降解控制过程的缘故。

2.5 曝气量对各槽内浊度的影响

虽说浊度不是水质指标, 但浊度的高低也能够反映污水中固体悬浮物和胶体物质存在的程度, 而这些污染物也在生物降解的过程发生降解。图 9、图 10 所表示的是不同曝气量下各个区域浊度的变化及其去除率。横坐标分别为一级、二级好氧区曝气量, 纵坐标分别为浊度和去除率。虽然进水浊度较大, 但是经过厌氧滤床后降低很多, 说明生物滤床的分离、吸附以及酸化水解的作用很大, 被截留的有机物在厌氧区生物滤床的上部形成了便于发酵水解的高浓度区, 抑制了固体颗粒向低浓度区域的流动。在好氧区域内, 污水在曝气的作用下处于全混流状态, 使固体颗粒能够更加充分地跟微生物接触, 达到更好的吸附降解。当曝气量为 $1.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 出水浊度为 9 NTU , 去除率达到 93.33% , 出水清澈透明。由于反应中悬浮有机物的浓度是一定的, 过高的曝气量也不能使浊度的去除率明显增加。

3 结论

使用技术提升的、低能耗高效率的新型净化槽, 通过不同曝气量条件下对生活污水的净化效果的研究, 得到了如下结论:

(1) 借助于化粪池的厌氧预处理的作用, 在体积不变的条件下将单独净化槽的二级厌氧和一级好氧提升为一级厌氧和二级好氧, 大大提高了污水的处理能力, 并且可以有效地降低单户的投资以及运行成本。

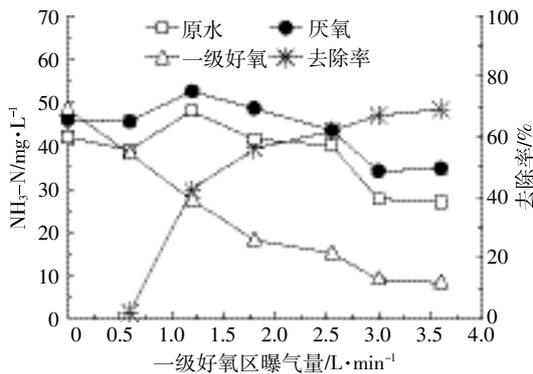


图 7 一级好氧区污水氨氮随曝气量的变化

Figure 7 Variation of NH₃-N with different aeration rates in the first aerobic zone

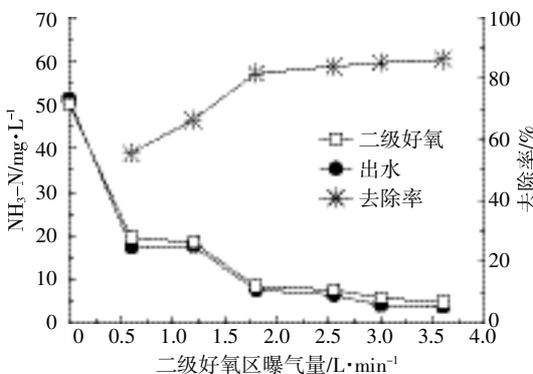


图 8 二级好氧区污水氨氮随曝气量的变化

Figure 8 Variation of NH₃-N with different aeration rates in the second aerobic zone

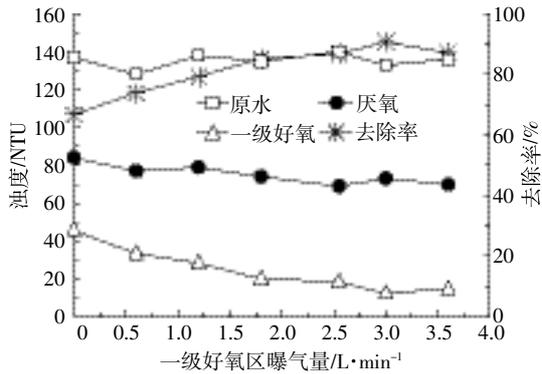


图9 一级好氧区污水浊度随曝气量的变化

Figure 9 Variation of turbidity with different aeration rates in the first aerobic zone

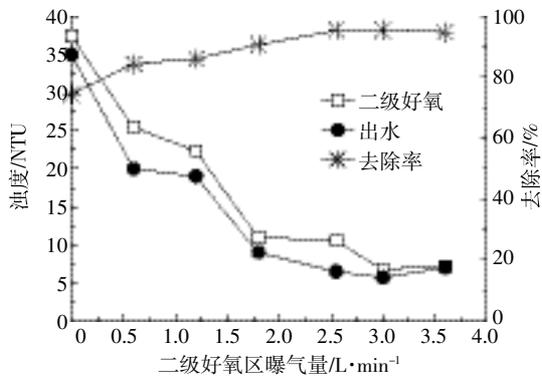


图10 二级好氧区污水浊度随曝气量的变化

Figure 10 Variation of turbidity with different aeration rates in the second aerobic zone

(2)当曝气量为 $1.8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,一级好氧区和二级好氧区溶解氧浓度分别为 $2.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此条件下的出水 COD、BOD、氨氮、浊度分别为 23、13、 $7.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 9 NTU。

(3)随着曝气量的再度增加,出水水质提高变得缓慢,二级好氧区生物降解的底物因浓度较低而成为主要的控制因素,曝气量的选择已显得十分重要。

参考文献:

- [1] 王青颖. 中国农村生活污水处理技术应用现状及研究方向[J]. 污染防治技术, 2007, 20(5): 37-41.
WANG Qing-ying. Present situation and prospect on rural sewage treatment in China[J]. *Pollution Control Technology*, 2007, 20(5): 37-41.
- [2] 苏东辉, 郑正, 王勇, 等. 农村生活污水处理技术探讨[J]. 环境科

学与技术, 2005, 28(1): 79-81.

- SU Dong-hui, ZHENG Zheng, WANG Yong, et al. Discussion on treatment technology of rural domestic wastewater[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 28(1): 79-81.
- [3] 张悦, 段华平, 孙爱伶, 等. 江苏省农村生活污水处理技术模式及其氮磷处理效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 172-178.
ZHANG Yue, DUAN Hua-ping, SUN Ai-ling, et al. Study on rural domestic sewage treatment technology mode as well as the effect of nitrogen and phosphorus processing in Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2013, 32(1): 172-178.
- [4] 冯华军. 分散式生活污水处理工艺开发及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
FENG Hua-jun. Research on mechanisms of decentralized treatment process for domestic sewage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [5] 齐瑶, 常杪. 小城镇和农村生活污水分散处理的适用技术[J]. 中国给水排水, 2008, 24(18): 24-27.
QI Yao, CHANG Miao. Technical applicability for decentralized sewage treatment in small towns and rural areas[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(18): 24-27.
- [6] 王昶, 王智成, 刘楠, 等. 生物滤床对净化槽处理生活污水水质的影响[J]. 环境工程, 2010, 28(4): 35-39.
WANG Chang, WANG Zhi-cheng, LIU Nan, et al. Influence of bio-filter bed on domestic sewage treatment in purifying tank[J]. *Environmental Engineering*, 2010, 28(4): 35-39.
- [7] 王昶, 王然. 高效自流式生活污水净化处理器[P]. 中国, 200510122530.4. 2005-12-22.
WANG Chang, WANG Ran. Sewage purification with high efficient scoop[P]. China, 200510122530.4. 2005-12-22.
- [8] 刘星. 曝气技术中氧传质影响因素的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
LIU Xing. Experimental study on influencing factors of oxygen transfer in aeration technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [9] Achilli A, Marchand E A, Childress A E. A performance evaluation of three membrane bioreactor systems: Aerobic, anaerobic, and attached-growth[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(12): 2999-3005.
- [10] 王昶, 刘继辉, 李桂菊, 等. 净化槽不同曝气量对出水水质的影响[J]. 水处理技术, 2009, 35(5): 35-39.
WANG Chang, LIU Ji-hui, LI Gui-ju, et al. Influence of different aeration rates on domestic sewage treatment in purifying-tank[J]. *Water Treatment Technology*, 2009, 35(5): 35-39.
- [11] 冯欣, 师晓春, 陶丹. 净化槽反应器处理生活污水及曝气量对处理效果的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(15): 9160-9161.
FENG Xin, SHI Xiao-chun, TAO Dan. Johkasou reactor for the treatment of domestic sewage and the influence of different aeration on the treatment effect of sewage[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(15): 9160-9161.