

溅水充氧生物滤池处理农村污水的研究

李先宁¹ 李孝安² 吕锡武¹

(1. 东南大学环境科学与工程系, 南京 210096;

2. 杭州市城市规划设计研究院, 杭州 310012)

摘要 开发了一种处理农村污水的低能耗埋地式一体化溅水充氧生物滤池装置,通过拔风和溅水复合充氧技术实现了大幅度节能条件下的好氧生物处理。考察了在不同水力负荷及 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷条件下本装置的处理效果,结果表明,在水力负荷小于 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、COD及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷分别小于 $0.3 \text{ kg COD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 和 $0.08 \text{ kg NH}_4^+\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的条件下,可以取得较高的去除效果和良好的出水水质, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN的平均出水浓度分别为 58.94 mg/L 、 2.78 mg/L 和 8.23 mg/L ,平均去除率分别为 51.7%、86.4%和 70.6%。

关键词 溅水充氧生物滤池 农村生活污水 低能耗 有机物 氮

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2008)02-0175-05

Research on spattering trickling filter for treatment of rural domestic wastewater

Li Xianning¹ Li Xiaolan² Lu Xiwu¹

(1 Department of Environmental Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096;

2 Hangzhou City Planning and Design Academy, Hangzhou 310012)

Abstract An underground integrated wastewater treatment system with low energy consumption, which was called spattering trickling filter(STF), was researched and developed. Aerobic treatment with great energy conservation was achieved through combined aeration technologies with spattering trickling filter. Removal effects under different hydraulic loadings and volumetric loadings of COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were analyzed. The results showed that good effluent quality and high removal efficiencies could be obtained on the condition that hydraulic loading of $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, COD volumetric loadings of $0.3 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ volumetric loadings of $0.08 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, respectively. The effluent average concentrations of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN were 58.94 mg/L , 2.78 mg/L and 8.23 mg/L , and their average removal rates were 51.7%, 86.4% and 70.6%, respectively.

Key words spattering trickling filter; rural domestic wastewater; low energy consumption; organic matter; nitrogen

湖泊水体的富营养化问题已经成为了我国水环境污染的主要问题之一,在实施大规模点源污染控制后,水质没有得到明显改善的主要原因之一在于农村面源污染尚未得到有效控制^[1,2]。农村生活污水作为农村面源污染的主要组成部分,虽然其污染贡献率较大,但由于排放较为分散,收集与处理困难以及长期受农村经济条件制约等因素的影响,一直没有得到有效处理^[3]。

目前,在我国对农村生活污水处理的研究及示范应用大部分都集中在厌氧沼气发酵以及人工湿地处理等方面,取得了良好的效果^[4,5]。在我国太湖流域,由于农村经济高度发达,土地资源严重短缺,

针对太湖的富营养化问题,农村生活污水处理必须实现在低运行费用下氮、磷的高效去除。本研究开发的溅水充氧生物滤池是一种一体化埋地式农村生活污水处理装置,该装置完全埋于地下,能耗设备仅为一台小型提升水泵,通过溅水充氧实现好氧生物处理,无需曝气,能耗及运行费用低廉。该装置完全

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601012-1A);江苏省环保厅项目(2005012)

收稿日期:2007-06-24;修订日期:2007-11-14

作者简介:李先宁(1964~),男,教授,博士,主要从事水污染控制方面研究。E-mail: lxn@seu.edu.cn

覆土后,地表可恢复原有土地利用状况,基本不占用土地资源。本文以实际运行的污水处理装置为研究对象,重点考察了该装置对有机物、氮的去除效果及其主要影响因素。

1 试验装置与研究方法

1.1 试验装置

该装置设置于江苏省宜兴市大浦镇一村落(约 100 户),设计处理能力为 $2.5\text{ m}^3/\text{d}$ 。装置如图 1 所示,主体由缺氧池、溅水充氧生物滤池和沉淀池 3 部分组成,采用钢板焊接,内衬玻璃钢防腐。污水首先自流进入圆形缺氧池,其容积为 5.0 m^3 ,高度为 1.95 m ,HRT 为 36 h 。污水通过折流板往复来回于缺氧池内,折流板间距为 24 cm ,高度为 1.6 m ,折流板间挂组合填料,组合填料高度为 1.6 m ,组合填料间距为 12 cm 。缺氧池出水通过半管式溢流布水器自流进入溅水充氧生物滤池。滤池为 1.2 m (长) $\times 1.0\text{ m}$ (宽) $\times 1.85\text{ m}$ (高)的立方体,由溅水区和填料区 2 部分组成。布水装置为 2 条半管式溢流布水器,间距为 50 cm 。溅水区由 2 块交错的开缝 PVC 板(上层盘缝宽度为 15 mm ,板缝比为 $8:1$;下层盘缝宽度为 15 mm ,板缝比为 $4:1$)组成,2 块板相距 35 mm 。溅水区下部为滤料区,滤料区总高度为 80 cm ,滤料由陶粒和球形塑料组合而成,滤料层由下部穿孔钢板承托。滤池内通风利用图 1 所示拔风管进行强制通风,拔风管净高 3.5 m ,高出地面部分沿附近居民房屋外墙设置。滤池出水自流进入沉淀池,尺寸为 1.0 m (长) $\times 1.0\text{ m}$ (宽) $\times 0.65\text{ m}$ (高)。在沉淀池中部设置隔板,高度为 0.45 m ,前部为污泥截留区,设人孔定期清泥,后部为清水区,上清液通过自吸泵提升后,部分回流和部分排放。

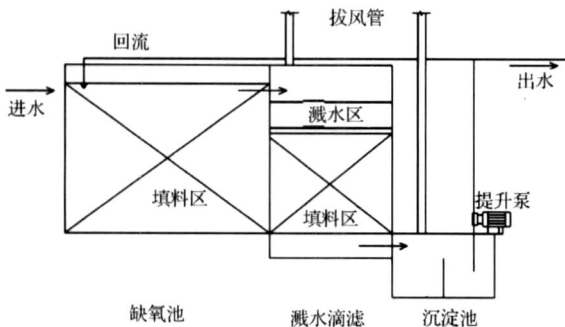


图 1 试验装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of experimental tanks

前置缺氧池的作用在于去除部分有机物,减小进入滤池的有机物负荷,从而降低滤池生物需氧量,有利于维持滤池内溶解氧浓度以及回流硝化液进行生物脱氮。装置的核心部分溅水充氧滤池利用水头落差,通过两层溅水盘的分散作用,形成水滴和水膜进行充氧满足滤池生物需氧量的要求,在滤池内部通过拔风管强制拔风,进一步提高充氧效果。整个装置仅设一台出水提升泵,实现了大幅度节能条件下的好氧生物处理。

1.2 试验方法

装置从 2006 年 9 月初开始调试运行到 12 月下旬,其间保持连续运行,试验分为调试运行、中水力负荷运行和高水力负荷运行 3 个阶段。

调试运行期:运行时间从 9 月 2~20 日,调试的主要内容包括:进出水管路的调整、半管式溢流布水器及溅水盘的水平调整和进出水流量调节。

中水力负荷运行期:运行时间从到 9 月 21 日到 10 月 19 日。在此期间装置的平均进水流量为 100 L/h ,硝化液回流比为 400% ,滤池水力负荷为 $10\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

高水力负荷运行期:分为 2 个阶段,第 I 阶段从 10 月 20 日~11 月 2 日,在此期间装置的平均进水流量为 200 L/h ,硝化液回流比在 10 月 20~27 日为 200% ,10 月 28 日~11 月 2 日为 400% ,滤池水力负荷分别为 $12\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $20\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。第 II 阶段从 11 月 3~20 日,进水流量为 300 L/h ,硝化液回流比为 300% ,水力负荷为 $24\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

试验期间的进水水质见表 1。

表 1 进水水质指标

Table 1 Inflow wastewater quality (mg/L)				
项目	COD	NH_4^+-N	TN	TP
范围	56.19~358.33	8.39~38.23	21.04~50.68	0.45~3.10
平均值	164.4	23.73	30.54	1.04

1.3 水质分析方法

本研究主要的水质分析指标为 COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、TP、pH 和 DO,其中 COD 的分析采用河北承德华通环保仪器厂 CIL-12 型 COD 仪。DO 及 pH 的分析采用德国 WTW 便携式溶氧仪和 pH 计。 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN 和 TP 的分析分别参照《水和废水监测分析方法》(第三版)的纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法、过硫酸钾紫外分光光度法和钼酸盐可见分光光度法进行。

2 试验结果和讨论

2.1 COD 的去除

图 2 显示了处理装置在运行期间的 COD 进出水浓度和去除率的变化。如该图所示,在 9 月 7 日以前的调试运行前期 COD 出水浓度较高,随着运行的稳定,出水 COD 浓度逐步降低,平均达到 60.80 mg/L。在中水力负荷运行期,进水 COD 浓度最低时为 73.03 mg/L,最高时为 301.87 mg/L,波动较大,但出水 COD 平均浓度为 58.94 mg/L,平均 COD 去除率达到 57.1%。运行期间缺氧池段平均去除的 COD 占整套装置的 78%,滤池占 22%。大部分有机物在缺氧池得到有效去除,为滤池段硝化细菌的生长和硝化活性的充分发挥提供了有利条件,同时有机物的去除减少了滤池的生物好氧量,为实现无曝气条件下的好氧处理奠定了基础。

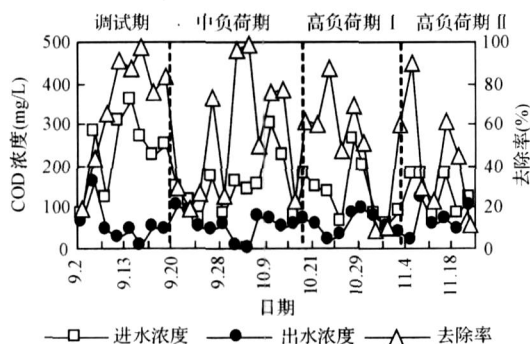


图 2 COD 浓度及去除率随时间的变化

Fig 2 Variation of COD concentration and removal rate with time

在高水力负荷运行期 I,由于加大了进水水力负荷,出水 COD 浓度在 17.69 ~ 94.69 mg/L 之间变化,平均出水浓度为 56.53 mg/L,平均去除率为 49.4%,虽然平均去除率略有下降,但平均 COD 出水水质基本与中负荷持平。以上结果表明,对于 COD 去除,在滤池水力负荷为中水力负荷及高水力负荷运行期 I 的运行条件下,装置具有较高的有机物去除效果,平均出水 COD 浓度低于 60 mg/L,可以达到国家城镇污水处理厂排放标准 (GB18918-2002) 一级排放 B 标准。在高水力负荷运行期 II,滤池水力负荷为 $24 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的条件下,平均 COD 出水浓度为 70.11 mg/L,平均 COD 去除率为 43.5%,出水水质及去除率下降较大。

图 3 显示了处理装置的 COD 去除率与 COD 容

积负荷的关系,如图 3 所示,COD 去除率随 COD 容积负荷的增加而减小,容积负荷对去除率的影响较大,当 COD 容积负荷大于 $0.3 \text{ kg COD} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时去除率将低于 50%。

溅水充氧生物滤池对有机物的去除的机理包括:滤料的过滤与截留,以及滤料表面附着的生物膜对有机物吸附与降解。滤池水力负荷的增加导致了水流对滤料表面冲刷作用的增大,以及污水与生物膜接触时间的减少。因此,过大的水力负荷不利于滤池对有机物处理效果的发挥。

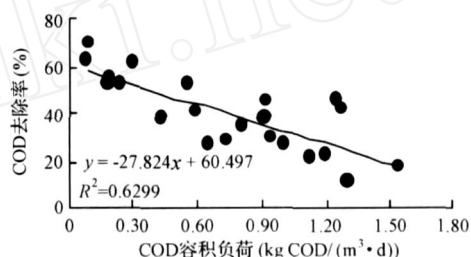


图 3 COD 去除率与 COD 容积负荷的关系

Fig 3 Variation of COD removal rate with COD volumetric loading rate

2.2 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除

图 4 显示了溅水充氧生物滤池运行期间进出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度和去除率的变化。如该图所示,随着调试运行期结束,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度大幅度降低且趋于稳定。在中水力负荷运行期,滤池进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在 11.21 ~ 28.58 mg/L 之间变化,平均浓度为 21.76 mg/L。滤池出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在 0.58 ~ 4.71 mg/L 之间,平均为 2.78 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率为 86.4%。出水水质稳定,低于国家城镇污水处理厂排放标准 (GB18918-2002) 一级排放 A 标准,表明溅水充氧生物滤池对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 具有良好的去除效果。

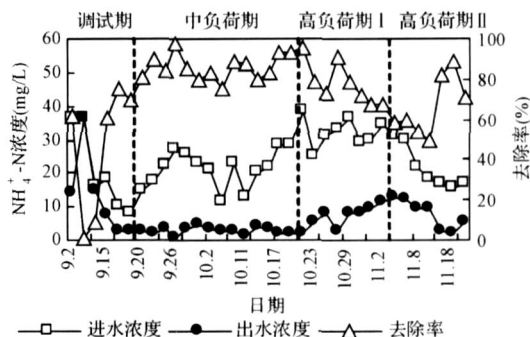


图 4 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度及去除率随时间的变化

Fig 4 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration and removal rate with time

在高水力负荷运行期 I,随着水力负荷的增加,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈上升趋势,在滤池水力负荷为 $12 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的条件下 (10月 20 ~ 27 日),平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 4.60 mg/L ,当滤池水力负荷为 $20 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时 (10月 28 日 ~ 11月 2 日),平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度上升到 9.26 mg/L ,平均去除率下降至 71.2%。而在高水力负荷运行期 II,表观上出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈明显的下降趋势,分析其原因在于在此期间进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度持续下降,导致了出水浓度的下降,同时增加硝化液回流比,回流硝化液的稀释作用也进一步导致了出水表观浓度的下降,在此期间的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出水水质的提高,并不是由于滤池硝化能力提高而产生的。综合以上分析可以得出,对于溅水充氧生物滤池, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果随水力负荷的增加而减小,合理的水力负荷设置对于滤池 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除具有较大的影响,本装置在水力负荷设置时,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水质如需稳定达到较高标准,滤池水力负荷应设置在 $10 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 左右为宜。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除除受到水力负荷的影响外,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度等引起的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷变化对其去除也会造成较大的影响,图 5 表示了溅水充氧生物滤池 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷与去除率的关系。滤池 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率随 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷的增加基本呈直线型下降,当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷小于 $0.08 \text{ kg NH}_4^+\text{-N} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率将大于 80%。

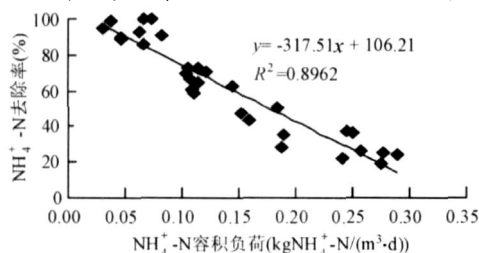


图 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷的关系

Fig 5 Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal rate with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ volumetric loading rate

图 6 显示了溅水充氧生物滤池沿滤料深度方向 a 点 (距滤料表面 0 cm, 滤池进水)、b 点 (距滤料表面 25 cm)、c 点 (距滤料表面 50 cm)、d 点 (距滤料表面 80 cm) 4 个取样点的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_x\text{-N}$ ($\text{NO}_3^-\text{-N} + \text{NO}_2^-\text{-N}$) 的浓度变化。

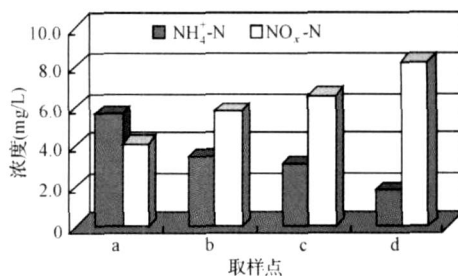


图 6 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度随滤池深度的变化

Fig 6 Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_x\text{-N}$ concentrations with biofilter tank depth

如该图所示,随着污水沿滤料深度方向的流动以及硝化反应的进程 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈下降趋势,与此同时 $\text{NO}_x\text{-N}$ 则对应呈上升趋势。比较各点浓度变化绝对值的大小可以看出,在滤池的底部 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的下降值与 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度的升高值较大,其中底部 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的下降值高于滤料表层和中层的 1.5 倍和 3.5 倍,表明在滤池的底部硝化反应较为强烈,底部滤料层是硝化细菌的活性区域。分析滤池中 DO 的变化,在溅水充氧和拔风充氧的复合作用下各采样点中 DO 浓度在 $5.42 \sim 5.78 \text{ mg/L}$ 之间变化,各点均具有较高的溶解氧水平且变化不大,不会成为影响硝化细菌硝化活性的限制因素。滤料层下部为硝化反应活性区域的主要原因与滤池的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除机理有关,滤池中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除机理主要包括硝化反应对进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除,以及进水中有机物在滤池中发生的氨化反应生成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 后,硝化反应对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除。由于滤池进水中有机物浓度较高,平均 COD 浓度为 79.95 mg/L ,导致在滤料的上层和中层主要发生有机物降解和氨化反应,异养型有机物降解及氨化细菌成为优势菌群,抑制了自养型硝化细菌的活性,而在滤料底层随着有机物的降解及氨化作用产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度升高,使得以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为底物的硝化细菌在溶解氧充足的条件下得以充分发挥其生物活性。

2.3 TN、TP 的去除

图 7 显示了处理装置运行期间进出水 TN 浓度和去除率的变化。在中水力负荷运行期,进水 TN 浓度最高为 33.39 mg/L ,最低为 21.12 mg/L ,平均浓度为 27.84 mg/L 。出水 TN 浓度最高为 14.35 mg/L ,最低为 5.40 mg/L ,平均为 8.23 mg/L ,平均去除率达到 70.6%。出水水质良好, TN 浓度低于

国家城镇污水处理厂排放标准 (GB18918-2002) 一级排放 A 标准。

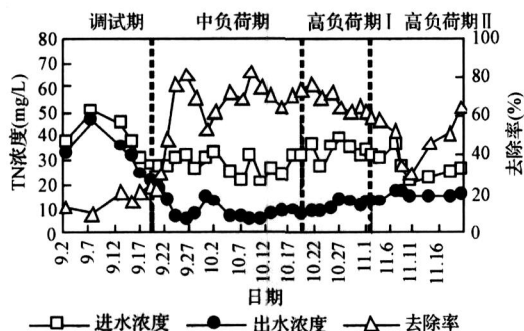


图 7 TN 浓度及去除率随时间的变化
Fig 7 Variation of TN concentration and removal rate with time

在高水力负荷运行期 I, 出水 TN 浓度在 8.38 ~ 14.02 mg/L 变化, 平均为 11.47 mg/L, 平均去除率为 66.2%, TN 去除效果随着水力负荷的增加有所下降。而在高水力负荷运行期 II, 出水平均 TN 浓度进一步上升至 15.44 mg/L, 平均去除率下降至 47.9%。以上结果表明, 水力负荷对装置的 TN 去除效果影响较大, 较大水力负荷引起 TN 容积负荷增加, 水力停留时间的缩短导致了 TN 去除效果的下降。

对于 TP 的去除, 在中水力负荷运行期及高水力负荷运行期 I II, 进水 TP 浓度在 0.45 ~ 1.68 mg/L 之间变化, 平均浓度为 0.81 mg/L, 出水浓度在 0.29 ~ 0.73 mg/L 之间变化, 平均浓度为 0.51 mg/L, 平均去除率为 30.3%。虽然装置的除磷主要依靠微生物的同化作用, 其除磷效果较低, 但由于进水 TP 浓度较低, 使得出水 TP 浓度仍保持在较低水平。

3 结 论

(1) 在水力负荷为 $10 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的条件下, 处理装置对 COD 去除具有较好的效果, 平均 COD 去除率为 57.1%。COD 去除率随 COD 容积负荷的增加而减小, 当 COD 容积负荷大于 $0.3 \text{ kg COD} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时去除率将低于 50%。

(2) 在水力负荷为 $10 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的条件下, 滤池 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率达到 86.4%, 滤池平均出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 2.78 mg/L。当 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 容积负荷小于 $0.08 \text{ kg NH}_4^+ - \text{N} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率大于 80%。滤料层下部成为硝化反应活性区域。

(3) 在水力负荷为 $10 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的条件下, TN 平均去除率达到 70.6%, 出水平均 TN 浓度为 8.23 mg/L。

参 考 文 献

- [1] 国家环境保护总局编. “三河” “三湖” 水污染防治计划及规划. 北京: 中国环境科学出版社, 2000
- [2] 金相灿, 叶春, 颜昌宙, 等. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究. 环境科学研究, 1999, 12(5): 1 ~ 5
- [3] 李先宁, 吕锡武, 孔海南, 等. 农村生活污水处理技术与示范工程研究. 中国水利, 2006, 17: 19 ~ 22
- [4] 沈东升, 贺永华, 冯华军, 等. 农村生活污水埋式无动力厌氧处理技术研究. 农业工程学报, 2005, 21(7): 111 ~ 115
- [5] 孙亚兵, 冯景伟, 田园春, 等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究. 环境科学学报, 2006, 26(3): 404 ~ 408
- [6] 黄明, 张学洪, 王敦球, 等. 城市生物脱氮除磷技术进展. 广西科学院学报, 2004, 20(1): 29 ~ 32