

新型分层生物滴滤池去除污水中氮磷的性能研究

崔婷婷¹, 何小娟², 凌 然¹, 孙 鑫¹, 李旭东^{1*}

(1.上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240; 2.上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘 要:生物滴滤池是农村生活污水处理的主要技术之一,但其存在氮、磷去除能力有限,稳定性不高等缺点。为提高新型分层生物滴滤池的氮磷去除效率,探索最佳工艺条件,本文采用新型分层生物滴滤池为试验装置,考察了滤料种类、水力负荷、回流比等对装置去除污水中氮磷性能的影响。结果表明,当滤料为炉渣、水力负荷为 $4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、回流比为 2:1 时滤池去除氮磷的效果最好,对 NH_4^+-N 、TN、TP、COD 的平均去除率分别可达到 87.08%、57.37%、66.04%、80.78%; 采用较高的回流比是滴滤池提高脱氮效果的一条有效途径。

关键词:分层生物滴滤池;滤料;水力负荷;回流比;氮;磷

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)01-0089-06

doi: 10.13254/j.jare.2013.0178

Nitrogen and Phosphorus Removal Performance in the Novel Multi-Layered Biological Tricking Filter

CUI Ting-ting¹, HE Xiao-juan², LING Ran¹, SUN Xin¹, LI Xu-dong^{1*}

(1.School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2.School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Biological trickling filter is one of the main rural sewage treatment technology, but it still has the shortcomings such as lower removal efficiency for nitrogen and phosphorus or lower stability. In order to improve the nitrogen and phosphorus removal efficiency of the device and find out its optimum technological conditions, the study took the novel multi-layered biological trickling filter as the device to test the contribution of filter medium, hydraulic loading, recirculation ratio on the treatment of nitrogen and phosphorus removal. The results showed that when the hydraulic loading of $4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, the recirculation ratio rate of 2:1 and slag as filter medium were applied, the best effect could be achieved in the filter. The highest mean efficiency of NH_4^+-N , TN, TP and COD were 87.08%, 57.37%, 66.04% and 80.78%, respectively. The results also indicated that higher recirculation ratio was one of effective paths to improve nitrogen removal efficiency.

Keywords: multi-layered biological tricking filter; filter medium; hydraulic loading; recirculation ratio; nitrogen; phosphorus

据统计,中国农村每年产生的生活污水超过 80 亿 t,导致了广大村镇地区水污染问题严重,因此对农村污水的净化和处理已经迫在眉睫^[1]。目前农村污水处理工艺主要有:人工湿地、快速渗滤系统、氧化塘、土壤渗滤系统和生物滴滤池等。国内外大量的研究证实了生物滴滤池去除污水中 COD、SS 具有良好的效

果,但普通生物滴滤池具有易堵塞、对氮和磷的去除能力有限、稳定性不高、不卫生等缺点,因此近年来学者们致力于研究改进生物滴滤池的工艺并强化其脱氮除磷效果^[2-3]。

张文坤等^[4]对滴滤池的结构做了改进,形成了新型分层生物滴滤池,不仅具有污泥量少、能耗低、供氧充分等优点,而且与普通生物滴滤池相比,分层生物滴滤池还具有启动周期更短、出水稳定性更高、氮磷去除率更高的优点。为了探索该新型分层生物滴滤池的去除氮磷的最佳工艺条件,本试验选取不同的滤料、不同回流比、不同水力负荷 3 个因素,较为系统地研究了不同工艺条件下新型分层生物滴滤池去除污

收稿日期:2013-10-16

基金项目:公益性行业(农业)科研专项“平原水网区农业源污染防治技术集成与示范”(201303089)

作者简介:崔婷婷(1987—),女,山西太原人,在读硕士,主要从事水污染控制与治理研究。E-mail:cuittsjtu@163.com

* 通信作者:李旭东 E-mail:lixudong@sjtu.edu.cn

水中氮磷的性能。

1 材料与方法

1.1 试验材料和装置

如图 1 所示,试验采用自行设计的分层生物滴滤池反应器,反应器为敞开式多孔分层结构,材质为 304 号不锈钢,尺寸为 420 mm×310 mm×2 200 mm。装置共分为 6 层,每层设 1 个镂空滤料装填容器,使其中滤料可与外界空气充分接触。每个装填容器尺寸为 360 mm×270 mm×220 mm,相邻滤料层间距离均为 150 mm。

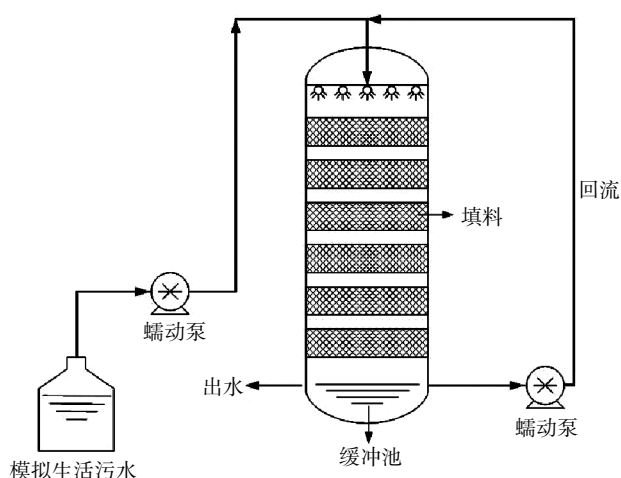


图 1 新型分层生物滴滤池的工艺流程图

Figure 1 Process of multi-layered biological filter

污水经蠕动泵提升进入复合生物滤池处理系统顶部,由上而下流经长有丰富生物膜的滤料层,最后进入滤池底部的缓冲池,缓冲池中的上清液经蠕动泵提升再次进入滴滤池形成内回流。

1.2 试验水质

试验用水参考我国南方农村生活污水水质指标,以葡萄糖为主要碳源,氯化铵为主要氮源。污水配方为:葡萄糖 281.25 mg·L⁻¹、氯化铵 57.25 mg·L⁻¹、磷酸二氢钾 13.25 mg·L⁻¹、碳酸氢钠 75 mg·L⁻¹、硫酸镁 16.5 mg·L⁻¹、硫酸锰 1.5 mg·L⁻¹、硫酸铁 0.1 mg·L⁻¹。污水的 C:N:P 控制在 100:10:1 左右,其中 COD 的浓度为 300 mg·L⁻¹ 左右。

1.3 试验方法

试验选用多孔性且具有高效除氮磷性质的炉渣(不完全燃烧的碳灰渣,粒径为 20~30 mm)、气块砖(粒径为 30 mm 左右)和复合树脂(交错装填的阴离子交换树脂,粒径为 0.5 mm,包裹在尼龙布后装填于滤池内)作为滤料^[5-6]分别装填于 3 组滤池系统内,每

套系统内装填的滤料体积相同,均为 128 L。通过改变蠕动泵的流速,控制系统水力负荷在 4.0~8.0 m³·m⁻²·d⁻¹ 之间;通过改变回流蠕动泵的流速,选取 1:2、1:1、2:1 进行回流比试验。试验分为 3 个阶段。表 1 为试验运行方案,装置启动周期在 2 周左右,系统稳定后进入运行阶段,运行周期为 2013 年 1 月—6 月,试验测试方法如表 2 所示。

表 1 试验运行方案

Table 1 The scheme of the experiment

项目	阶段 1	阶段 2	阶段 3
运行时间	1 月—2 月	3 月—4 月	5 月—6 月
滤料种类	A	炉渣	炉渣
负荷/m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹	6	B	6
回流比	0	0	C

注:A 为不同滤料:炉渣、气块砖、复合树脂;B 为不同负荷:4、6、8 m³·m⁻²·d⁻¹;C 为不同回流比:1:2、1:1、2:1。

表 2 指标检测方法

Table 2 Testing methods of different index

检测项目	检测方法	检测标准
COD	快速消解分光光度法	HJ/T 399—2007
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂比色法	GB/T 7479—1987
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	GB/T 11894—1989
TP	钼酸铵分光光度法	GB/T 11893—1989

2 结果与讨论

2.1 滤料种类对脱氮除磷性能的影响

图 2(a)为 3 种滤料滤池氨氮的进出水浓度值和去除率变化。在进水氨氮浓度为 16~21 mg·L⁻¹ 条件下,气块砖、炉渣的出水浓度均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918—2002)》一级 B 排放标准。3 种滤料对氨氮的去除率分别在 9.95%~58.83%、28.08%~55.07%、62.06%~90.75%波动,其对氨氮的去除呈现出炉渣>气块砖>复合树脂。本试验中采用的复合树脂为阴离子交换树脂,对于 NH₄⁺-N 的去除主要依靠树脂与溶液接触时对溶液中非电解质产生的吸附作用,这种吸附作用弱于气块砖和炉渣对于氨氮的吸附作用^[7]。

图 2(b)为 3 种滤料滤池 TP 的进出水浓度值和去除率变化。如图所示,TP 的进水浓度在 2.9~4.1 mg·L⁻¹ 之间波动,复合树脂、气块砖和炉渣 3 种填料的出水浓度分别在 1.5~3.1 mg·L⁻¹、2~2.7 mg·L⁻¹、0.7~2.1 mg·L⁻¹ 之间波动,图中可看出只有炉渣滤池出水接近

国家一级B排放标准。复合树脂、气块砖和炉渣对应的去除率分别在12.16%~60.58%、18.91%~50.96%、46.06%~81.78%之间波动。炉渣对TP的去除明显高于另外2种,这缘于炉渣本身的物理化学结构,炉渣的空隙率大且钙铝含量高,有利于溶液中磷均匀的吸附在基质表面,促进钙铝离子和磷的物理化学反应完全,进而产生Ca-P化合物^[8]。

图2(c)为3种滤料滤池TN的进出水浓度变化曲线,3种滤料的TN出水浓度变化趋势上下波动幅度较大,推断其原因,主要受厌氧环境下的反硝化过程影响,由于生物膜存在生长、脱落过程,对于需要厌氧过程去除的氮元素来说,生物膜的增厚会使得污水难以进入生物膜的内部进行充分的厌氧处理,从而导致氮元素处理效果的不稳定^[9]。复合树脂、气块砖、炉渣的去除率分别在11.90%~54.64%、20.39%~58.82%、9.10%~62.15%内波动。

图2(d)为3种滤料滤池COD的进出水浓度变化情况,3种滤料COD出水浓度均表现出先降低再趋于平缓的趋势。滴滤池滤料分层的结构提供了较为充足的好氧环境,可以增加污水中溶解氧含量,继而增强好氧微生物对氧气的利用,通过降解作用使COD的变化趋于平缓。如图所示,复合树脂、气块砖、炉渣

的去除率分别在38.74%~87.27%、45.90%~87.27%、41.99%~87.27%波动。3种滤料对COD的去除效果差别不大。

2.2 水力负荷对脱氮除磷性能的影响

图3为不同水力负荷条件下各指标的进出水浓度变化情况,由图3(a)可知,水力负荷为4、6 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和8 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时氨氮出水浓度分别在5.3~1.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、1.8~5.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、4~10.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动。对应的去除率分别在65.40%~87.23%、70.66%~91.93%、43.90%~74.32%间波动。可见,4 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和6 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 为本试验去除 NH_4^+-N 的较佳水力负荷参数。分析认为,一方面是由于随着水力停留时间的缩短, NH_4^+ 和硝化细菌膜接触时间过短,硝化反应不完全;另一方面,水力负荷增加导致有机负荷随之也增加,在较高的有机物浓度下,降解有机质的异养菌处于绝对优势,抑制了自养性硝化细菌的增殖和活性^[10]。

由图3(b)可知,当进水TP浓度为3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,TP的出水浓度随着水力负荷的增加而增加。水力负荷4、6 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和8 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 对应的TP去除率分别在48.50%~77.36%、28.77%~59.46%、27.77%~74.68%内波动,呈现出随着水力负荷的增加而降低的特点。理论研究表明,水力负荷越大,污水的停留时间越短,

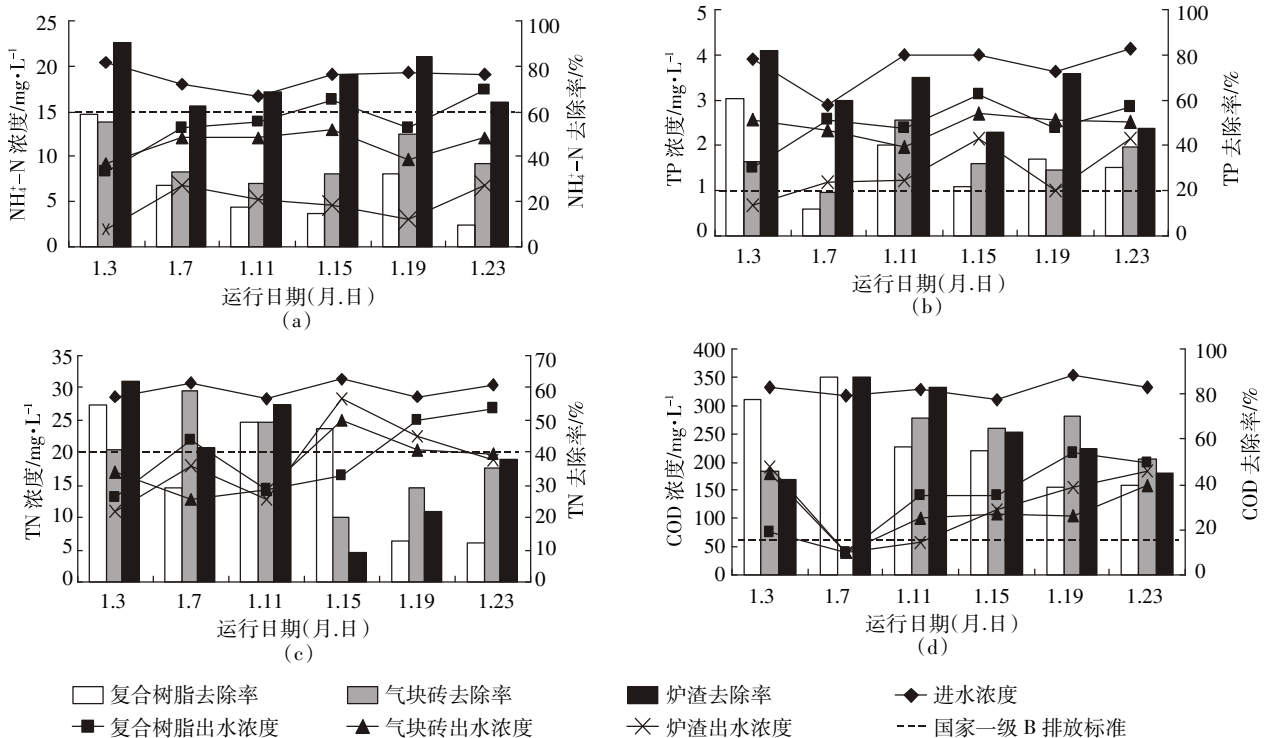


图2 不同滤料各指标进出水浓度及去除率变化

Figure 2 Variation of index concentration and removal percentage in different filter medium

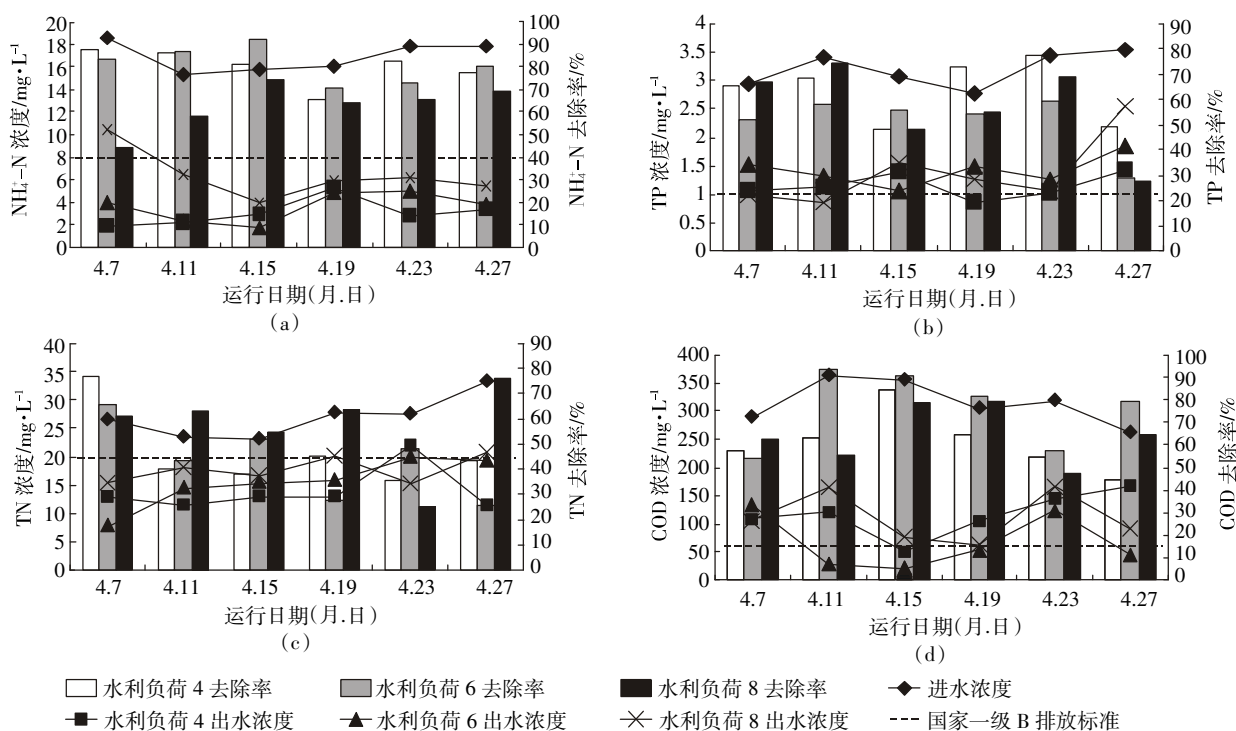


图 3 不同水力负荷时各指标进出水浓度变化

Figure 3 Variation of index concentration and removal percentage in different hydraulic loading

磷素向滤料扩散和向吸附点位靠近的机会就减少,磷的去除率越低^[11]。

图 3(c)中,3 种水力负荷 4、6、8 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 对应的 TN 去除率分别在 24.89%~76.01%、35.74%~77.03%、25.33%~65.56%内波动,呈现出随着水力负荷的增加而逐渐降低的特点,这可能是由于硝化细菌的世代期较长,而随着水力负荷的增大,生物膜的更新速度加快,不利于硝化细菌的附着和增殖,也不利于反硝化反应的进行^[12]。

图 3(d)中,3 种水力负荷 COD 出水浓度也表现出了先降低再趋于平缓的趋势。水力负荷 4、6、8 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的平均去除率分别为 65.23%、68.80% 和 64.32%。本试验中最佳水力负荷为 6 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,这与余浩^[13]的滴滤池水力负荷 4~7 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 对于 COD 有最好去除效果的结论相一致。

2.3 回流比对脱氮除磷性能的影响

由图 4(a)可知,氨氮的出水浓度在 0.5~4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间波动,与回流比 0 相比波动幅度较小,由此得出装置污水的内回流能够提高装置的稳定性,这是因为内回流可以使污水更充分地、与滤料接触,使硝化作用更加充分,从而使出水稳定在一定的范围内。回流比 0、1:2、1:1、2:1 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别在 57.83%~

91.43%、37.45%~94.51%、67.64%~95.92%、71.27%~95.71%波动,基本表现随着回流比的增加而增加的趋势,回流比 1:1 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率最高。这是因为回流比的增加会降低污水中 COD 的浓度,进而降低 COD/N,减少有机物与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对氧的竞争,提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率^[14]。

图 4(b)中,回流比 0、1:2、1:1、2:1 的 TP 去除率分别在 28.77%~59.46%、27.26%~49.34%、53.00%~72.80%、55.39%~78.23%间波动,最佳除磷效果的回流比为 2:1。可以看出回流比对 TP 的去除没有明显的影响。多项研究证明无机化学反应,诸如磷吸附、沉淀通常是很迅速的过程,因此磷去除率并不会因为污水与介质的接触时间增加,而明显增加^[15]。

图 4(c)中,回流比 0、1:2、1:1、2:1 对应的 TN 去除率分别在 5.13%~48.15%、33.6%~50.76%、29.33%~64.81%、44.33%~74.05%内波动,呈现出 TN 的去除是随着回流比的增加而增大的趋势,这一方面是因为回流比的增加会降低 COD 的浓度,而 COD 又是生物脱氮的重要影响因素;另一方面是因为回流比的增加加大了污水中氮元素与滤料的接触时间,使反硝化脱氮的过程更加充分导致的。

从图 4(d)中还可知,回流比对 COD 的去除影响

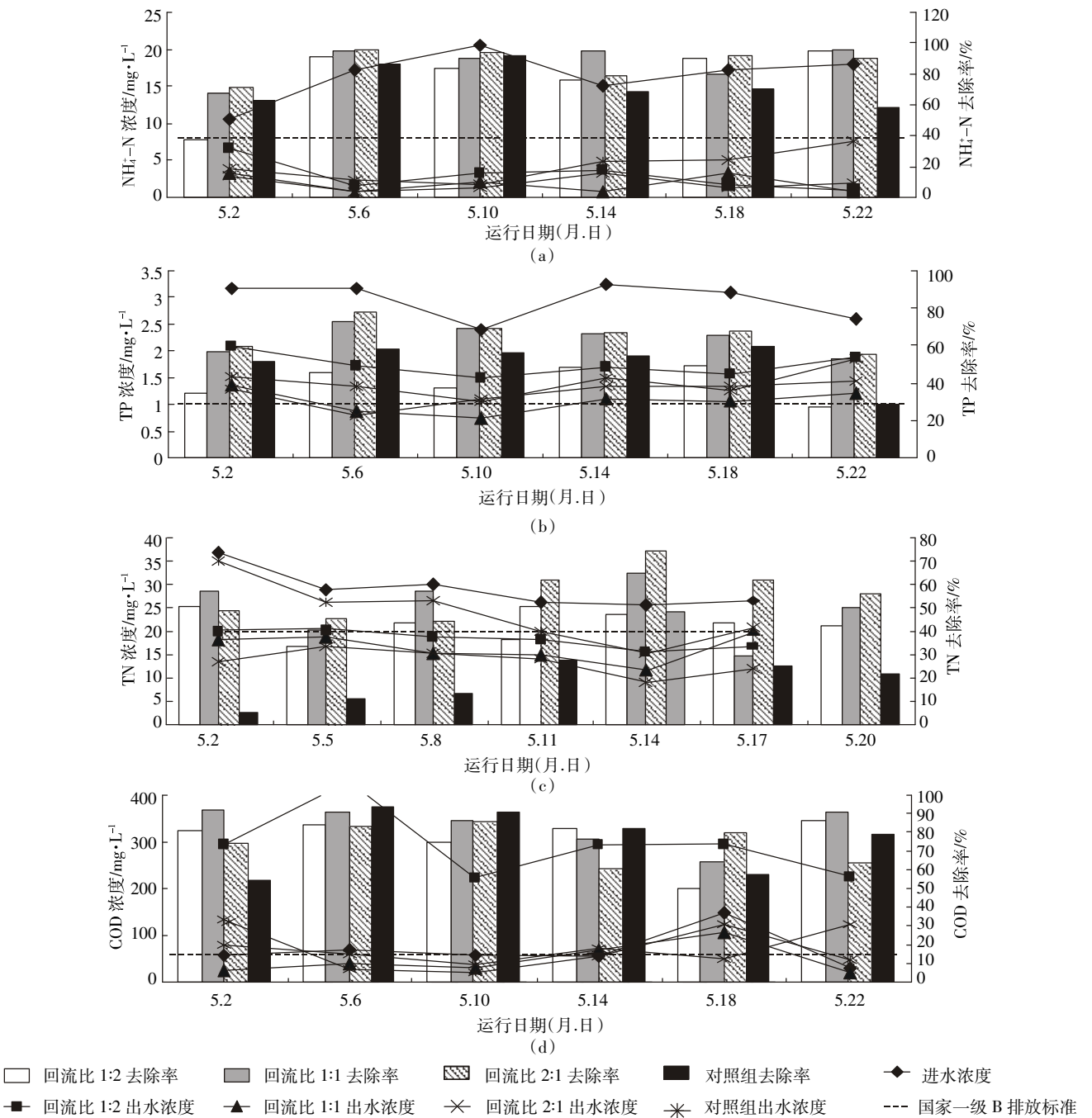


图 4 不同回流比各指标进出水浓度变化

Figure 4 Variation of index concentration and removal percentage in different recirculation ratio rate

不大, 回流比 0、1:2、1:1、2:1 的 COD 去除率分别在 54.20%~93.65%、49.78%~86.45%、64.16%~91.81%、60.28%~85.82%内波动, 均对 COD 有很好的处理效果。回流比 1:1 为本试验最佳回流比, 去除率达 80% 以上。

3 结论

(1) 3 种不同滤料分层生物滴滤池对氨氮和 TP

的去除有明显影响, 但对 TN 和 COD 去除影响不大。炉渣对氨氮和 TP 的处理效果最好, 平均去除率分别达到 74.32% 和 62.69%; 气块砖对 TN 和 COD 的处理效果最好, 平均去除率达到 38.99% 和 64.84%。

(2) 不同水力负荷对各个指标的去除均表现出一定的影响。TN、TP 的去除率随着水力负荷的增加而降低, 在水力负荷 $4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的条件下, TN、TP 的处理效果最好, 平均去除率分别达到 57.37% 和 64.18%。

在水力负荷为 $6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 装置对氨氮和 COD 的去除效果最好, 平均去除率分别达到 80.94% 和 68.80%。

(3) 回流比对 TN 的去除有明显的影响, 对其他指标影响不大, 但基本都表现出了去除率随着回流比增加而增加的趋势。分层滴滤池对氨氮、TP、TN、COD 去除的最佳回流比分别为 1:1、2:1、2:1、1:1, 平均去除率分别为 87.08%、66.04%、56.02% 和 80.78%。采用较高的回流比是滴滤池提高脱氮效果的一条有效途径。

参考文献:

- [1] 徐和胜, 付融冰, 褚衍洋. 芦苇人工湿地对农村生活污水磷素的去除及途径[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1372-1375.
XU He-sheng, FU Rong-bing, CHU Yan-yang. Phosphorus removal from rural domestic wastewater and removal pathways analysis using reed wetlands[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5): 1372-1375. (in Chinese)
- [2] Sidney Biesterfeld, Greg Farmer, Linda Figueroa. Quantification of denitrification potential in carbonaceous trickling filters[J]. *Water Research*, 2003, 37(16): 4011-4017.
- [3] Hui-Ping Chuang, Akiyoshi Ohashia, Hiroyuki Imachi, et al. Effective partial nitrification to nitrite by down-flow hanging sponge reactor under limited oxygen condition[J]. *Water Research*, 2007, 41: 295-302.
- [4] 张文昆, 欧阳矜盈, 潘劭皓, 等. 新型组合式分层生物滴滤池启动性能研究[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2013, 29(3): 281-291.
ZHANG Wen-kun, OUYANG Jin-ying, PAN Jie-hao, et al. Performance of novel multi-layered biological filter in early operation[J]. *Journal of Harbin University of Commerce*, 2013, 29(3): 281-291. (in Chinese)
- [5] Chris Pratt, Simon A Parsons, Ana Soares. Biologically and chemically mediated adsorption and precipitation of phosphorus from wastewater[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23: 890-896.
- [6] 刘文涛, 李旭东, 庞浩然, 等. 组合式分层生物滤池与人工湿地联合工艺处理农村生活污水试验研究[J]. 净水技术, 2009, 28(4): 28-31.
OU Wen-tao, LI Xu-dong, PANG Hao-ran, et al. Treatment of rural sewage by using combined processes of multi-layered biological filter and constructed wetland [J]. *Water Purification Technology*, 2009, 28(4): 28-31. (in Chinese)
- [7] 赖 华. 离子交换树脂处理中低浓度氨氮废水的研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012.
- [8] LAI Hua. Research on low concentration of ammonia nitrogen wastewater treatment using Ion exchange resin[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] Van de Moortel, Rousseau A M K, Tack D P L, et al. Comparative study of surface and subsurface flow constructed wetlands for treatment of combined sewer overflows: A greenhouse experiment[J]. *Ecol Eng*, 2009, 35: 175-183.
- [9] 李桂荣, 薛素勤, 方 虎, 等. 生物滴滤池不同进水负荷处理生活污水试验研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(11): 84-87.
LI Gui-rong, XUE Su-qin, FANG Hu, et al. Study on different influence loading of bio-trickling filter[J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 37(11): 84-87. (in Chinese)
- [10] 杨长生. 两段上向流曝气生物滤池脱氮性能的研究[J]. 工业水处理, 2012, 32(2): 55-58.
YANG Chang-sheng. Research on denitrification performance of two-stage up-flow biological aerated filter[J]. *Industrial Water treatment*, 2012, 32(2): 55-58. (in Chinese)
- [11] 闫立龙, 李 娟, 张宝杰. 曝气生物滤池中氨氮去除影响因素试验分析[J]. 城市环境与城市生态, 2006(3): 31-33.
YAN Li-long, LI Juan, ZHANG Bao-jie. Factor of influencing ammonium removal efficiency in biological aerated filter[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2006(3): 31-33. (in Chinese)
- [12] Pujol R, Tarallo S. Total nitrogen removal in two step bio-filtration[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(4/5): 65-68.
- [13] 余 浩. 水解池-滴滤池-人工湿地处理农村生活污水研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
YU hao. Hydrolysis of pool-trickling filter-studies of rural sewage treatment using artificial wetland[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [14] Zhang Peng, Hai Reti, Zhou Dongkai, et al. Synergism of novel sequence bio-ecological process and biological aerated filter for sewage treatment in cold climate[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2011, 19(5): 881-890.
- [15] Noorvee A, Pöldvere E, Mander. The effect of pre-aeration on the purification processes in the long-term performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 380: 229-236.