

刘世杰, 赵凯杰, 李宏辞. 农村生活污水处理的脉冲生物滤池工艺改良与调试[J]. 净水技术, 2023, 42(2):93-102.

LIU S J, ZHAO K J, LI H C. Improvement and commissioning of pulsed biofilter process for rural domestic wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2): 93-102.

农村生活污水处理的脉冲生物滤池工艺改良与调试

刘世杰, 赵凯杰, 李宏辞

(东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210018)

摘要 脉冲生物滤池在江苏省农村生活污水处理中有着广泛的应用,但脉冲水箱故障导致生物滤池水力负荷过大是运维过程中普遍存在的问题。为此,本研究尝试取消脉冲水箱,通过时间控制开关和流量控制模块联合控制水力负荷的方式对生物滤池进行了改良,开展了进水时间分别控制为8、12、16、20 h工作模式的现场调试对比研究。结果表明,在进水水质 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP质量浓度分别为30~156、14.2~85.0、21.4~96.0、0.97~7.50 mg/L的情况下,相同容积负荷下改良型生物滤池在12 h工作模式下对 COD_{Cr} 、氨氮、TP的整体去除率最高,最高分别为63.0%、87.4%、53.4%,在16 h工作模式下对TN的整体去除率最高,最高为33.0%。12 h工作模式下进水 COD_{Cr} 、氨氮、TN和TP的容积负荷分别在 $0.3\sim 0.5$ 、 0.05 、 0.06 、 0.005 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 以内,可保证 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP去除率在57.3%、65%、19.7%、43.8%以上,比原脉冲生物滤池平均去除率分别高23.8%、36.5%、9.6%、28.8%。8、12、16 h和20 h工作模式下,改良型生物滤池出水溶解氧平均质量浓度分别为4.7、5.5、3.8 mg/L和3.1 mg/L,表明12 h工作模式下复氧效果最好, COD_{Cr} 、氨氮去除率最高。同时对改良型生物滤池在12 h工作模式下,氨氮平均质量浓度为50 mg/L时,水力负荷与 COD_{Cr} 、氨氮、TN污染物去除率之间的关系进行了研究,结果表明水力负荷控制在 $1\sim 3$ $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, COD_{Cr} 、氨氮、TN去除率分别可达到62.4%、76.1%、20.7%以上。

关键词 农村生活污水 脉冲生物滤池 改良与调试 时间控制模式 水力负荷

中图分类号: X799 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)02-0093-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.02.012

Improvement and Commissioning of Pulsed Biofilter Process for Rural Domestic Wastewater Treatment

LIU Shijie, ZHAO Kaijie, LI Hongci

(College of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract Pulsed biofilter has been widely used in rural domestic wastewater treatment in Jiangsu Province. However, the hydraulic load of biofilter caused by pulsed water tank failure is a common problem in its operation and maintenance. To solve this problem, this study attempted to cancel the pulsed water tank, and improved the biofilter by combining the time control switch and the flow control module to control the hydraulic load. The on-site commissioning and comparative study of the influent time of 8, 12, 16 h and 20 h were carried out. The results showed that when the concentrations of COD_{Cr} , ammonia nitrogen, TN and TP in the influent water were 30~156, 14.2~85.0, 21.4~96.0, 0.97~7.50 mg/L, respectively, under the same volume load, the overall removal rates of COD_{Cr} , ammonia nitrogen and TP in the improved biofilter were the highest under the 12 h working mode, with the highest removal rates of 63.0%, 87.4%, 53.4%, respectively. Under the 16 h working mode, the overall removal rate of TN was the highest, with the highest removal rate of 33.0%. When the influent volume load of COD_{Cr} , ammonia nitrogen, TN and TP were within $0.3\sim 0.5$, 0.05 , 0.06 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ and 0.005 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ under the 12 h working system; the removal rates of COD_{Cr} , ammonia nitrogen, TN and TP were above 57.3%, 65%, 19.7% and 43.8%, respectively, which were 23.8%, 36.5%, 9.6% and 28.8% higher than those of the original pulse biofilter, respectively. The average concentrations of dissolved oxygen were 4.7, 5.5, 3.8 mg/L and 3.1 mg/L at 8,

[收稿日期] 2021-08-30

[基金项目] 分散式农村生活污水潜流人工湿地建设标准研究

[作者简介] 刘世杰(1996—),男,硕士,主要从事水污染控制研究,E-mail:2045230269@qq.com。

12, 16 h and 20 h, respectively, which indicated that the effect of reoxygenation was the best and the removal rates of COD_{Cr} and ammonia nitrogen were the highest at 12 h. At the same time, the relationship between the hydraulic load and the removal rates of COD_{Cr} , ammonia nitrogen and TN was studied when the average concentration of ammonia nitrogen was 50 mg/L and the modified biofilter was operated for 12 h. The results showed that when the hydraulic load was controlled within $1\sim 3 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, the removal rates of COD_{Cr} , ammonia nitrogen and TN were more than 62.4%, 76.1% and 20.7%, respectively.

Keywords rural domestic wastewater pulsed biofilter improvement and commission time control mode hydraulic load

农村生活污水治理是实施乡村振兴战略的重要内容。脉冲生物滤池工艺因为其占地面积小、运维成本低、操作简洁等优点,在江苏省农村污水治理中被广泛采用^[1-3],但是处理效果不稳定。为此调研了南京市高淳区采用该工艺的 475 个农村污水处理站点,发现常见的问题是脉冲生物滤池顶部的脉冲水箱损坏,导致运行过程中水力负荷高,出水不能稳定达标。

过去 10 年国内外多个学者对生物滤池进行优化研究^[4-8],如田昕茹等^[9]通过三级串联分层生物滤池降解模拟生活污水,有机负荷为 $0.328\sim 0.392 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,组合工艺处理效果最佳;金秋等^[1]通过将脉冲滴滤池分为两层从而提高组合工艺处理效率;张文宁^[10]研究发现,使用浮石填料的生物滴滤池在水力负荷为 $0.85 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,对化学需氧量(COD)、氨氮、总氮(TN)和总磷(TP)去除率分别能达到 83.04%、79.68%、45.6% 和 38.4%;Vianna 等^[11]用丝瓜果皮做脉冲生物滤池填料,发现比传统的填料上生物膜更加丰富,处理效率更高;张国珍等^[12]利用一体化 ABR-生物滴滤池,在滤池前通过 ABR 反应器削减负荷,研究表

明水力负荷为 $1.75 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,对各种污染物去除效果最好;Diez-montero 等^[13]对生物滤池工艺进行改造,在其前增加了厌氧和缺氧反应器,有效降低系统出水 TN 浓度;也有学者^[14]研究了使用生物炭屑两相生物滴滤塔处理高氮磷废水,TP 去除率达到 68%。

上述改进都取得了一定效果,由此可见,水力负荷是生物滤池的重要运行参数。为此,本研究提出取消脉冲水箱,并采用时间控制开关和流量控制模块联合控制水力负荷的改良型生物滤池的方案,依托高淳区某自然村村站点进行改良和现场调试对比研究。该村站点建成于 2015 年,设计处理水量为 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

图 1 为站点原(未改良)脉冲生物滤池与改良型生物滤池示意图。脉冲水箱的蓄水和集中布水使原脉冲生物滤池水力负荷达到 $13.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。现将原生物滤池顶端的脉冲水箱拆除,使生物滤池进水直接通过穿孔布水管向填料表面均匀布水,有效缓解水力冲击负荷,脉冲水箱如图 2 所示。

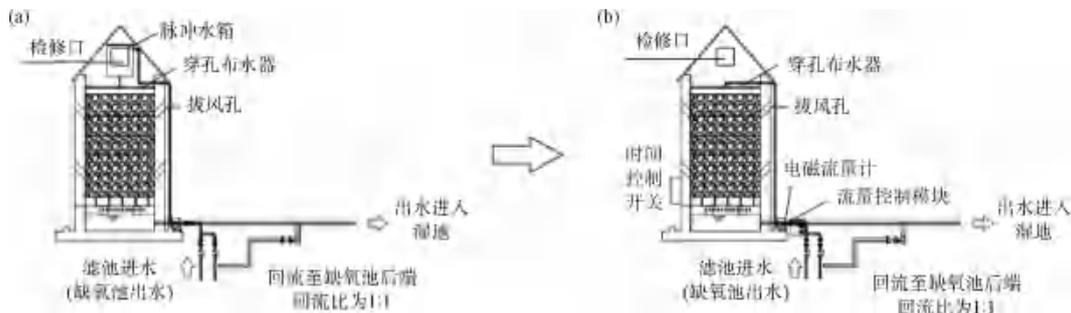


图 1 (a) 原脉冲生物滤池与(b)改良型生物滤池示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of (a) Original Pulsed Biofilter and (b) Improved Biofilter

图 3~图 4 为改良型生物滤池及配件的实物图。该滤池中填料实际有效面积为 6.43 m^2 ,高度为 2 m,填料体积为 10.86 m^3 。实际环境下该处理站点可调控的措施有限。安装组合泄水开关(流量控制

模块),如图 3 所示,通过调节该开关,控制滤池进水流量,从而降低水力负荷。采用时间控制开关控制水泵提水频率代替脉冲水箱,来调整滤池布水周期,分别对时间控制开关设置 8、12、16 h 和 20 h 工



图2 脉冲水箱

Fig. 2 Pulsed Water Tank



图3 组合泄水开关

Fig. 3 Combined Drain Valve

作模式,进而对生物滤池均时均匀地布水,时间控制开关如图4所示。

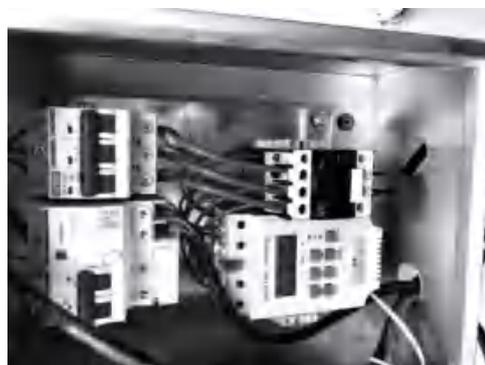


图4 时间控制开关

Fig. 4 Time Control Switch

1.2 试验分析方法

时间控制开关设置8、12、16、20 h工作模式的具体操作说明如表1所示。

调试试验在运行稳定期间进行,改良型生物滤池出水回流比为1:1。试验基本环境:进水pH值为6.5~7.7,出水pH值为6.1~7.1,试验水温为27~32℃。用溶解氧(DO)仪测出不同工作模式下滤池DO进出水浓度。

试验过程中水力负荷通过改变组合泄水开关大小,调节滤池进水流量来控制,水力负荷的计算如式(1)。

表1 时间控制开关各种时间控制模式的操作说明及对应的流量和水力负荷

Tab. 1 Operation Instructions of Various Time Control Modes of Time Control Switch and Corresponding Flow and Hydraulic Load

工作模式	说明	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	水力负荷/[m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹]
8 h	控制水泵每工作1 h,停止2 h	1.50	5.6
12 h	控制水泵每工作1 h,停止1 h	1.00	3.7
16 h	控制水泵每工作2 h,停止1 h	0.75	2.8
20 h	控制水泵每工作5 h,停止1 h	0.60	2.2

$$S_{\text{水}} = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

其中: $S_{\text{水}}$ ——滤池水力负荷,m³/(m²·d);
 Q ——滤池进水流量,m³/d;
 A ——改良型生物滤池填料有效面积,m²;

不同的滤池进水流量对应不同水力负荷。容积负荷通过控制一定滤池水力负荷,同时根据实际过程中改良型生物滤池进水污染物浓度,容积负荷的

计算如式(2)。

$$S_{\text{容}} = \frac{Q}{V} \times C_0 = \frac{Q}{A \times H} \times C_0 = S_{\text{水}} \times \frac{C_0}{H} \quad (2)$$

其中: $S_{\text{容}}$ ——滤池容积负荷,kg/(m³·d);
 V ——滤池填料体积,m³;
 C_0 ——滤池进水污染物质量浓度,mg/L;
 H ——滤池填料高度,m。

通过多次取样检测,收集足量滤池进水污染物

浓度数据,进而获得多组实际情况下的容积负荷,分析4种模式下污染物负荷与相应污染物去除率的关系。

1.3 试验设备

时间控制开关:型号为XT不锈钢箱380V+空气开关。电磁流量计:型号为BLDLD-DN40,电压为220V,额定压力为1.6MPa。组合泄水开关:两个DN100球阀开关和1个DN100管段组合而成。

1.4 试验仪器及测量方法

试验检测的指标和方法如表2所示。

表2 试验检测项目及检测方法

Tab. 2 Experimental Detection Indices and Detection Methods

水质指标	检测方法
氨氮	纳氏试剂紫外分光光度法
COD _{Cr}	重铬酸钾消解法
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法
TP	钼酸铵分光光度法
DO	仪器测定
温度	仪器测定
酸碱性	仪器测定

2 结果与讨论

试验于2020年7月7日—2020年11月15日在某农村污水处理站进行,用电磁流量计测出改良型生物滤池实际平均处理量为12m³/d。统计2020年5月1日以前的原脉冲生物滤池COD_{Cr}、氨氮、TN和TP进水浓度及其对各污染物的平均去除率,结果如表3所示。可见水质波动范围较大,原脉冲生物滤池对各污染物去除率低。

表3 原脉冲生物滤池进水浓度及对各污染物的平均去除率
Tab. 3 Concentration of Influent and Average Removal Rate of Pollutants in Original Pulsed Biofilter

项目	COD _{Cr}	氨氮	TN	TP
质量浓度/(mg·L ⁻¹)	30~156	14.2~85.0	21.4~96.0	0.97~7.50
平均去除率	33.5%	28.5%	10.1%	15.0%

2.1 改良型生物滤池不同工作模式下的出水DO浓度变化情况

图5为4种工作模式下的滤池出水DO浓度变化试验结果。测量DO浓度的时间为8月1日—9月29日,改良型生物滤池进水DO质量浓度为0.8~1.4mg/L,气温稳定在29~31℃,pH值在6.5~7.0。8h工作模式出水DO最高质量浓度为

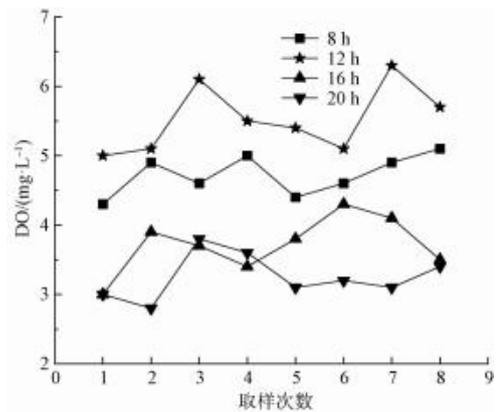


图5 不同时间控制模式下滤池出水DO浓度变化
Fig. 5 Changes of DO Concentration in Effluent of Filter under Different Time Control Modes

5.1 mg/L,最低质量浓度为4.3 mg/L,平均质量浓度为4.7 mg/L;12h工作模式出水DO最高质量浓度为6.3 mg/L,最低为5.0 mg/L,平均质量浓度为5.5 mg/L;16h工作模式出水DO最高质量浓度为4.4 mg/L,最低为3.1 mg/L,平均质量浓度为3.8 mg/L;20h工作模式出水DO最高质量浓度为3.8 mg/L,最低质量浓度为2.8 mg/L,平均质量浓度为3.1 mg/L。从滤池出水DO平均浓度可以看出,12h工作模式下改良型生物滤池复氧能力更强。12h和8h两种工作模式下DO平均浓度差距不大,16h和20h两种工作模式DO平均浓度与12h模式下的DO浓度差距较大,说明在实际控制中,运用时间控制开关调节生物滤池复氧存在时间分区界限,即滤池在8h和12h工作模式下间歇运行能更有效地恢复DO。白永刚^[15]通过延长滤池布水周期发现氨氮去除率提高了30%,可以看成是一种变相时间控制。试验时气温较高,8h工作模式停止运行时长为16h,12h工作模式停止运行时长为12h,两种工作模式下滤池停止运行时间较长,待滤池下次开始运行工作时,滤池内残留在填料上的水分蒸发需要吸收周围热量,导致滤池内填料间的温度降低,滤池内外温差变大。温差会引起空气流动,充足的停止运行时长能恢复填料上生物膜的DO量更多,因此,能在满足降解有机物的同时,提高氨氮去除率。而16h和20h工作模式下工作时间较长,污水流动过程中滤池外的氧气难以接触到填料上生物膜表面,复氧效果欠缺,待下次污水流经填料表面,DO含量不能满足有机物氧化和氨氮氧化的需要,污染物去

除率下降。

在实际应用中,通过时间控制开关工作模式,合理控制水力停留时间(HRT),在降低水力负荷的同时优化滤池复氧机制,增强滤池 DO 恢复能力,平衡了 HRT 因素与复氧能力因素,进而提高改良型生物滤池内 DO 浓度。

2.2 改良型生物滤池容积负荷与污染物去除率之间的关系

2.2.1 滤池进水 COD_{Cr} 容积负荷与 COD_{Cr} 去除率

图 6 为改良型生物滤池在时间控制开关下的 8、12、16 h 和 20 h 工作模式时 COD_{Cr} 容积负荷与 COD_{Cr} 去除率之间变化规律试验结果。COD_{Cr} 去除率呈现先上升后下降的趋势。4 种工作模式下容积负荷从 0.10 kg/(m³·d) 增长到 0.35 kg/(m³·d) 时, COD_{Cr} 去除率随着容积负荷的增大而增大,从 28.0%~38.5% 提高到 48.1%~63.0%,说明该阶段可能异养菌工作能力未达到饱和^[16],时间控制模式下 DO 供应比较充足,限制反应速率的主要因素是 COD_{Cr} 浓度。当 COD_{Cr} 容积负荷从 0.35 kg/(m³·d) 增长到 0.75 kg/(m³·d) 时,有机污染物未被填料上的微生物充分降解就从滤池流出, COD_{Cr} 去除率呈现下降趋势,去除率从 48.1%~63.0% 降低到 25.2%~40.0%。12 h 工作模式下进水 COD_{Cr} 容积负荷在 0.3~0.5 kg/(m³·d) 时,可保证 COD_{Cr} 去除率在 57.3% 以上,比原脉冲生物滤池平均去除率高 23.8% 以上。

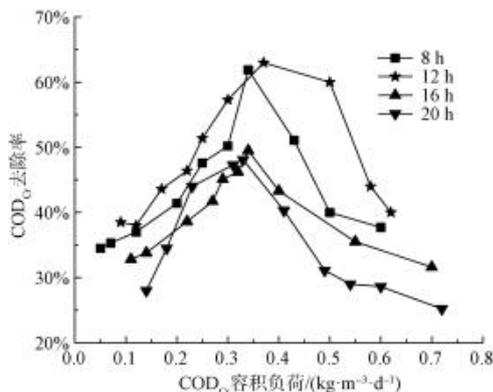


图 6 不同时间控制模式下滤池进水 COD_{Cr} 容积负荷与 COD_{Cr} 去除率的关系

Fig. 6 Relationship between Influent COD_{Cr} Volumetric Load and COD_{Cr} Removal Rate under Different Time Control Modes

8 h 和 12 h 工作模式下的 COD_{Cr} 平均去除率高于 16 h 和 20 h,试验过程中测出 8、12、16 h 和 20 h

工作模式下滤池出水 DO 平均质量浓度分别约为 4.7、5.5、3.8 mg/L 和 3.1 mg/L,8 h 与 12 h 工作模式下恢复的 DO 较 16 h 和 20 h 工作模式更多,说明可能是异养菌在更充足的 DO 条件下降解有机物反应更加高效。

2.2.2 滤池进水 COD_{Cr} 容积负荷与氨氮去除率

图 7 为改良型生物滤池在时间控制开关下的 8、12、16 h 和 20 h 工作模式时 COD_{Cr} 容积负荷与氨氮去除率之间的变化规律试验结果,氨氮去除率呈现下降的趋势。4 种工作模式下氨氮去除率随着 COD_{Cr} 容积负荷的增大而减小,其中 8 h 和 12 h 工作模式,在 COD_{Cr} 容积负荷为 0.05~0.60 kg/(m³·d) 时,氨氮去除率分别从 79.6% 和 87.4% 降低到 27.4% 和 27.6%。此时随着 COD_{Cr} 浓度的增大,硝化细菌繁殖受到抑制,有利于异养菌的生长^[17],DO 急剧消耗,导致氨氮去除率快速下降。段化杰等^[18]通过实际试验沿程测量和 Matlab 软件模拟也发现氨氮去除率和有机负荷呈现负相关的趋势。16 h 和 20 h 工作模式下的氨氮下降速率较上两组缓慢,表明 DO 不足时,异养菌不会快速大量繁殖,异养菌与硝化细菌 DO 竞争程度较前两组弱,所以随着 COD_{Cr} 负荷增大对氨氮去除率的波动影响较小。

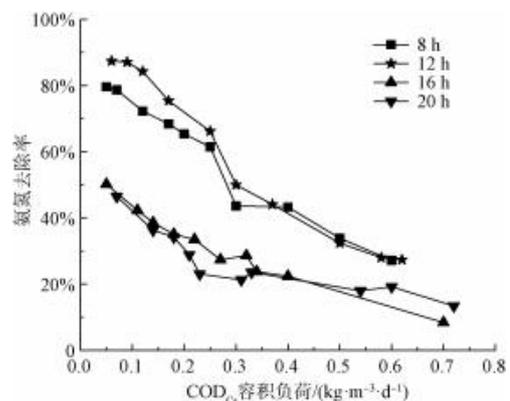


图 7 不同时间控制模式下滤池进水 COD_{Cr} 容积负荷与氨氮去除率的关系

Fig. 7 Relationship between COD_{Cr} Volumetric Load and Ammonia Nitrogen Removal Rate under Different Time Control Modes

总体上,在 COD_{Cr} 容积负荷变动时,8 h 和 12 h 两种工作模式比 16 h 和 20 h 两种工作模式的氨氮去除率整体高 30% 左右。4 条去除率曲线下下降较快,说明改良型生物滤池处理能力较不稳定,需要控制进水氨氮浓度尽可能地低,如在 12 h 工作模式下

控制 COD_{Cr} 容积负荷小于 $0.25 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 可保证氨氮去除率在 60% 以上。

2.2.3 滤池进水氨氮容积负荷与氨氮去除率的关系

图 8 为改良型生物滤池在时间控制开关下的 8、12、16 h 和 20 h 工作模式时氨氮容积负荷与去除率之间的变化规律试验结果。当氨氮容积负荷为 $0.010 \sim 0.075 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, 8 h 和 12 h 工作模式下氨氮去除率在 43.3% ~ 87.4%。低氨氮容积负荷伴随着低 COD_{Cr} 容积负荷, 且试验测得此两种工作模式 DO 平均质量浓度分别为 $4.7 \text{ mg}/\text{L}$ 和 $5.5 \text{ mg}/\text{L}$, DO 浓度较为充足, 能在满足异养菌降解有机物的同时满足硝化细菌降解氨氮。当氨氮负荷从 $0.075 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增大到 $0.200 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 左右时, 两种工作模式的氨氮去除率降低到 13% ~ 25%, 此时较高氨氮容积负荷因 HRT 不足致使部分氨氮未被消耗就流出, 造成滤池出水氨氮浓度高。16 h 和 20 h 工作模式也表现出相似的变化规律, 但是去除率整体较 8 h 与 12 h 工作模式低 20% ~ 30%。12 h 工作模式属于一种间歇进水模式, 有助于滤池内的空气流动, 强化复氧, 这与张毅^[19] 研究相一致。12 h 工作模式下进水氨氮容积负荷在 $0.05 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 以内, 可保证氨氮去除率在 65% 以上, 比原脉冲生物滤池平均去除率高 36.5% 以上。

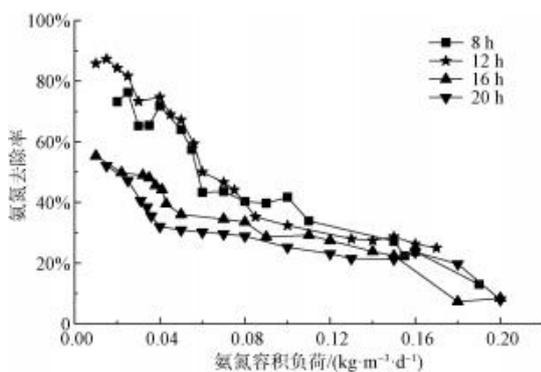


图 8 不同时间控制模式下滤池进水氨氮容积负荷与氨氮去除率的关系

Fig. 8 Relationship between Ammonia Nitrogen Volumetric Load and Ammonia Nitrogen Removal Rate under Different Time Control Modes

在实际应用中, 本改良型生物滤池进水氨氮浓度偏高, 可在 12 h 工作模式下增加回流到缺氧池后端的回流量, 进而降低改良型生物滤池进水的氨氮浓度, 限制氨氮容积负荷小于 $0.05 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 使

氨氮去除率保持在 65% 以上。

2.2.4 滤池进水 TN 容积负荷与 TN 去除率的关系

图 9 为改良型生物滤池在时间控制开关下的 8、12、16 h 和 20 h 工作模式时 TN 容积负荷与去除率之间的变化规律试验结果, 4 种工作模式下的 TN 去除率呈现逐步下降的规律。当 TN 容积负荷从 $0.01 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 提高到 $0.18 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, 8、12、16 h 和 20 h 4 种工作模式下 TN 去除率分别在 3.3% ~ 16.3%、6.7% ~ 20.9%、12.5% ~ 33.0%、8.1% ~ 28.4%, 数值逐渐下降。4 种工作模式在 TN 容积负荷变化的过程中 TN 去除率比较为 $16 \text{ h} \approx 20 \text{ h} > 12 \text{ h} > 8 \text{ h}$, 其中 16 h 工作模式下对 TN 的整体去除率最高, 最高为 33.0%。而滤池填料上生物膜由内到外为厌氧区、缺氧区、好氧区, 16 h 和 20 h 工作模式滤池 DO 恢复效果不如 8 h 和 12 h 工作模式, 所以更容易形成缺氧环境, 导致生物膜缺氧区域向外扩展, 更有利于反硝化反应, 脱氮效果更佳。12 h 工作模式下进水 TN 容积负荷在 $0.06 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 以内, 可保证 TN 去除率在 19.7% 以上, 比原脉冲生物滤池平均去除率高 9.6% 以上。16 h 和 20 h 工作模式试验结果相比于黄涛^[20] 滤池中 16% 的 TN 去除率提高了 5% ~ 17%。

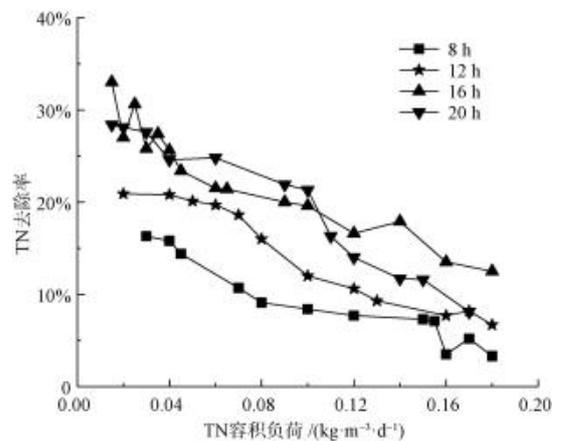


图 9 不同时间控制模式下滤池进水 TN 容积负荷与 TN 去除率的关系

Fig. 9 Relationship between Influent TN Volumetric Load and TN Removal Rate under Different Time Control Modes

2.2.5 滤池进水 TP 容积负荷与 TP 去除率的关系

图 10 为改良型生物滤池在时间控制开关下的 8、12、16 h 和 20 h 工作模式时 TP 容积负荷与 TP 去除率之间的变化规律试验结果, TP 去除率随着 TP 容积负荷的增大而降低。因为试验站点旁存在公共

卫生间, TP 容积负荷整体偏高, TP 容积负荷从 $0.002 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增大到 $0.006 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 4 种工作模式下 TP 去除率从 $43.2\% \sim 53.4\%$ 急剧降低到 $23.3\% \sim 36.9\%$ 。在进水 TP 浓度较低时, 滤池中的填料有充分的空间和生物膜处理吸附 TP, 使滤池保持较高的 TP 去除率。在 TP 容积负荷从 $0.006 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增大到 $0.014 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, TP 去除率降低到 $13.4\% \sim 16.5\%$, 因为此阶段 TP 容积负荷已经过高, 陶粒填料表面会形成对 TP 吸附限制, 填料小孔吸附与脱附达到动态平衡, 多余的 TP 未被及时吸附就流出滤池。

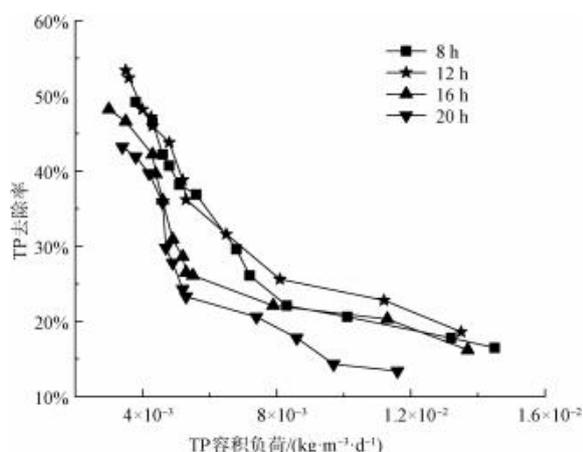


图 10 不同时间控制模式下滤池进水 TP 容积负荷与 TP 去除率的关系

Fig. 10 Relationship between TP Volumetric Load and TP Removal Rate under Different Time Control Modes

上述研究表明, 12 h 工作模式在不同 TP 容积负荷阶段对 TP 去除率都是最高的。因此, 在 12 h 工作模式下将 TP 容积负荷控制在 $0.005 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 以内, 可以保证 TP 去除率在 43.8% 以上, 比原脉冲生物滤池高出 28.8% 以上。

2.3 改良型生物滤池水力负荷与污染物去除率的关系

2.3.1 滤池进水水力负荷与 COD_{Cr} 去除率的关系

图 11 为时间控制开关为 12 h 工作模式下改良型生物滤池的水力负荷与 COD_{Cr} 去除率之间的关系情况。在前一阶段试验基础上, 研究得出时间控制开关控制为 12 h 工作模式的改良型滤池工作方式有利于 DO 恢复, 同时兼顾 TN 的去除。本研究阶段, 当水力负荷从 $0.80 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增大到 $2.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, COD_{Cr} 去除率随着水力负荷的增大而

增大, 去除率从 58.8% 增加到 63.0% 。水力负荷较小, 水力剪切力小, HRT 就长, 更有利于生物膜上的异养菌降解 COD_{Cr} , 且 COD_{Cr} 容积负荷较低, 所以此时 COD_{Cr} 去除率上升。当水力负荷从 $2.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增大到 $4.80 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, COD_{Cr} 容积负荷增大, COD_{Cr} 去除率在 $61.0\% \sim 63.0\%$, 较为稳定, 仍保持在一个高效阶段。当水力负荷在从 $4.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 上升到 $9.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 一方面, 水力负荷的增大, 冲刷破坏填料上的生物膜, 导致 HRT 降低; 另一方面, 水力负荷增大时 COD_{Cr} 容积负荷也增大, COD_{Cr} 去除率急剧下降, 从 61.0% 降到 33.8% 。上述研究表明, COD_{Cr} 去除率大致随着水力负荷增大而减小, 与黄媛媛等^[21]在改进滤池的研究结论具有一致性。

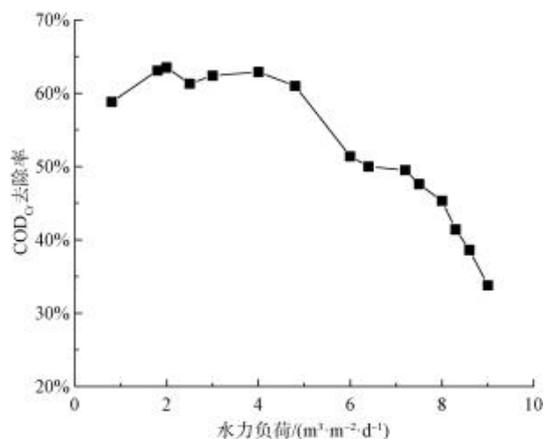


图 11 时控开关设置 12 h 工作模式时滤池进水水力负荷与 COD_{Cr} 去除率的关系

Fig. 11 Relationship between Influent Hydraulic Load and COD_{Cr} Removal Rate as Control Switch Setup for 12 h

该工艺水力负荷在 $1.00 \sim 3.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, COD_{Cr} 去除率稳定在 62.4% 以上, 与原脉冲生物滤池水力负荷为 $13.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 下的 COD_{Cr} 平均去除率 33.5% 相比, 提高了 28.9% 以上。从降解 COD_{Cr} 的角度考虑, 水力负荷应选择 $1.00 \sim 3.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

2.3.2 滤池进水水力负荷与氨氮去除率的关系

图 12 为时间控制开关为 12 h 工作模式下改良型生物滤池的水力负荷与氨氮去除率之间的关系。当水力负荷在 $1.00 \sim 4.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 氨氮去除率下降略为缓慢, 从 87.4% 降到 69.5% , 氨氮去除率保持在较高水平, 时间控制开关 12 h 工作模式能显著恢复滤池内基质表面的 DO, 促进降解氨氮。本

研究阶段水力负荷略小, HRT 较长, 填料上的微生物能充分接触氨氮。水力负荷低时氨氮容积负荷也较低, 由 2.2.3 小节研究结果可知此时氨氮的去除率较高。且较低的水力负荷导致 COD_{Cr} 容积负荷低, 研究^[22]表明 COD_{Cr} 容积负荷越小会促进氨氮降解。水力负荷从 $4.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 升高到 $5.55 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 氨氮去除率迅速从 69.5% 下降到 32.4%, 当水力负荷到 $4.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 稍微加大水力负荷导致 COD_{Cr} 容积负荷增大, 进而抑制硝化细菌利用 DO 使氨氮被氧化为 NO_3^- -N 的过程, 氨氮去除率下降。王康萍等^[23]的研究也表明了水力负荷过大导致 HRT 降低, 影响对氨氮去除率。当水力负荷超过 $5.55 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 滤池处理能力弱, 继续增大水力负荷, 氨氮去除率维持在一个低水平范围内稳定变化。因此, 降低水力负荷, 可有效提高氨氮去除率。

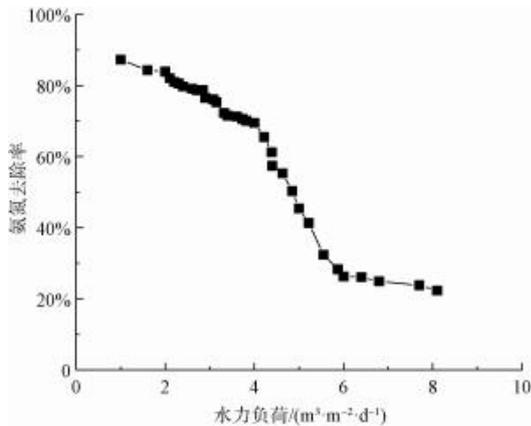


图 12 时控开关设置 12 h 工作模式时滤池进水水力负荷与氨氮去除率的关系

Fig. 12 Relationship between Influent Hydraulic Load and Ammonia Nitrogen Removal Rate as Control Switch Setup for 12 h

上述研究表明, 时间控制开关设置为间歇式工作的 12 h 工作模式, 控制组合泄水开关, 使滤池在低水力负荷 $1.00 \sim 3.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 运行处理农村生活污水, 可保证去除率稳定在 76.1% 以上。

2.3.3 滤池进水水力负荷与 TN 去除率的关系

图 13 为时间控制开关为 12 h 工作模式下改良型生物滤池的水力负荷与 TN 去除率之间的关系情况。当水力负荷从 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增大到 $3.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, TN 去除率从 21.1% 平缓下降到 20.7%; 当水力负荷在 $3.00 \sim 8.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, TN 去除率从 20.7% 迅速下降到 12.5%。水力负荷的

增大导致较大水力冲刷和短的 HRT, 在水力负荷为 $1.00 \sim 3.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 处理相同量污水, 低水力负荷状态下污水的停留时间相对较长, 所以污水中的污染物与填料表面的生物膜接触的时间更充分。同时更长的污水 HRT 使外界氧气难以及时接触到生物膜表面, 为生物膜表面制造了多个短暂时缺氧环境, 促进 NO_3^- -N 被还原为 N_2 。当水力负荷从 $3.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增大到 $8.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 水力冲刷和水力剪切力大大增加, 污水中的 NO_3^- -N 与反硝化细菌接触时间极短, 未充分反应就流出滤池, 导致滤池出水浓度偏高, 去除率下降。

上述研究表明, 滤池在 12 h 工作模式下将水力负荷控制在 $1.00 \sim 3.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 可以有效保证 TN 去除率在 20.7% 以上, 比余浩^[22]的 TN 去除率的研究结果高 8%。

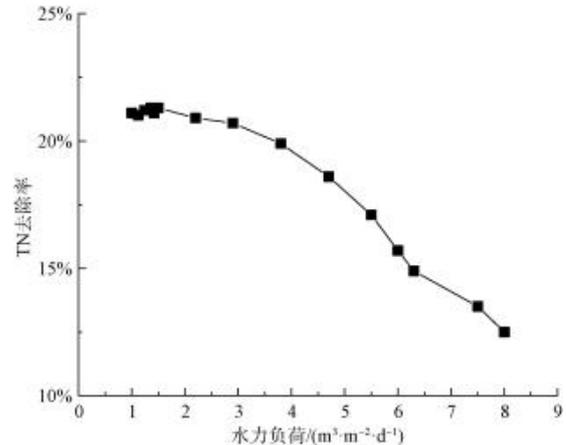


图 13 时控开关设置 12 h 工作模式时滤池进水水力负荷与 TN 去除率的关系

Fig. 13 Relationship between Influent Hydraulic Load and TN Removal Rate as Control Switch Setup for 12 h

3 结论

(1) 通过拆除脉冲水箱, 降低水力负荷, 同时设置时间控制开关控制水泵工作频率, 使滤池均时均量布水, 研究 8、12、16、20 h 4 种时间控制工作模式下的污染物去除率。结果表明, 在进水水质 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP 质量浓度分别为 $30 \sim 156$ 、 $14.2 \sim 85.0$ 、 $21.4 \sim 96.0$ 、 $0.97 \sim 7.50 \text{ mg/L}$ 的情况下, 改良型生物滤池在 12 h 工作模式下对 COD_{Cr} 、氨氮、TP 的整体去除率最高, 最高分别为 63.0%、87.4%、53.4%; 在 16 h 工作模式下对 TN 的整体去除率最高, 最高为 33.0%。

(2) 12 h 工作模式下进水 COD_{Cr} 容积负荷及氨

氮容积负荷、TN 容积负荷、TP 容积负荷分别控制在 0.3~0.5 及 0.05、0.06、0.005 kg/(m³·d) 以内,方能保证 COD_{Cr}、氨氮、TN、TP 去除率在 57.3%、65%、19.7%、43.8% 以上,比原脉冲生物滤池平均去除率分别高 23.8%、36.5%、9.6%、28.8% 以上。

(3) 试验发现 8、12、16 h 和 20 h 工作模式下改良型生物滤池出水 DO 平均质量浓度分别为 4.7、5.5、3.8 mg/L 和 3.1 mg/L,表明 4 种工作模式下改良型生物滤池池体的 DO 恢复程度不同,12 h 工作模式下的复氧效果最好,此时有利于降解有机物和氨氮。

(4) 最大回流比为 1:1 时,改良型生物滤池在 12 h 工作模式下,将水力负荷降低在 1.00~3.00 m³/(m²·d),COD_{Cr}、氨氮、TN 去除率分别可达到 62.4%、76.1%、20.7% 以上。

(5) 试验研究结果可见,在相同容积负荷的情况下,12 h 工作模式比其他 3 种工作模式表现出更好的去除效果,该模式下生物滤池对氨氮去除率最高,同时也能兼顾 COD_{Cr} 和 TP 的去除效果。因此,改良型生物滤池在出水回流比为 1:1 的条件下,采用时间控制开关 12 h 工作模式,且在水力负荷 1.00~3.00 m³/(m²·d) 运行,为最佳的工作模式。

参 考 文 献

- [1] 金秋,黄涛,李先宁,等. 脉冲双层生物滤池与人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J]. 环境科技, 2016, 29(2): 21-24.
JIN Q, HUANG T, LI X N, et al. Research on applied technology of combined process of pulse dual-media biofilter and artificial wetland in wastewater treatment in rural areas [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 29(2): 21-24.
- [2] 金树权,周金波,罗艳,等. 生物滤池工艺处理农村生活污水效果[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(5): 785-787.
JIN S Q, ZHOU J B, LUO Y, et al. Treatment of rural domestic sewage by biofilter process [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2016, 57(5): 785-787.
- [3] 沈众,何卿,颜润润,等. 生物滤池组合工艺在农村生活污水中的应用[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 234-235.
SHEN Z, HE Q, YAN R R, et al. Application of combined biological filter process in rural domestic sewage treatment [J]. Anhui Agricultural Science, 2015, 43(31): 234-235.
- [4] 刘雪妮,何连生,姜登岭,等. 生物滴滤池处理农村废水的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(2): 194-200.
LIU X N, HE L S, JIANG D L, et al. Research progress on treatment of rural wastewater by bio-trickling filter [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(2): 194-200.
- [5] LI W Y, LOYOLA-LICEA C, CROWLEY D E, et al. Performance of a two-phase biotrickling filter packed with biochar chips for treatment of wastewater containing high nitrogen and phosphorus concentrations [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 102: 150 - 158. DOI: 10.1016/j.psep.2016.03.001.
- [6] 刘勇,李先宁,吴磊,等. 基于低 C/N 值进水的生物生态组合工艺除污特性[J]. 中国给水排水, 2013, 29(9): 17-19.
LIU Y, LI X N, WU L, et al. Treatment of rural domestic sewage with low C/N ratio by bio-ecological combined process [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(9): 17-19.
- [7] GUO X L, YAO Y D, YIN G F, et al. Preparation of decolorizing ceramsites for printing and dyeing wastewater with acid and base treated clay [J]. Applied Clay Science, 2007, 40 (1/2/3/4): 20-26. DOI: 10.1016/j.clay.2007.06.009.
- [8] 刘梦雪,曾非凡,文红平,等. 生物滴滤塔/景观滤床工艺高效处理农村污水[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1094-1102.
LIU M X, ZENG F F, WEN H P, et al. A efficient trickling filter/landscape biofilter-bed technique for rural domestic sewage treatment [J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2020, 39(5): 1094-1102.
- [9] 田昕茹,郭新超,原晓玉,等. 进水有机负荷对三级生物滴滤池脱氮除磷的影响[J]. 环境工程, 2017, 35(10): 29-34.
TIAN X R, GUO X C, YUAN X Y, et al. Effect of influent organic loading on removal of nitrogen and phosphorus from three-stage bio-trickling filters [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(10): 29-34.
- [10] 张文宁. 水力负荷及填料对微动力生物滴滤池净水效果分析[J]. 水利技术监督, 2020(1): 42-44.
ZHANG W N. Analysis of water purification effect of micro dynamic bio-trickling filter with hydraulic load and filter [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2020(1): 42-44.
- [11] VIANNA M R, NETO M V, MELO G C B. Use of dehydrated peeled fruit of *Luffa cylindrica* as support medium in biological trickling filters: Analysis of performance regarding the reduction of the organic content and microbiologic considerations [J]. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2019, 24: 13 - 20. DOI: 10.13140/2.1.3096.9604.
- [12] 张国珍,亢瑜,武福平,等. 一体化 ABR-生物滴滤池系统处理农村生活污水[J]. 水处理技术, 2020, 46(11): 108 -

112.
ZHANG G Z, KANG Y, WU F P, et al. Integrated system of ABR-biotrickling filter for rural domestic wastewater treatment [J]. *Water Treatment Technology*, 2020, 46(11): 108-112.
- [13] DIEZ-MONTERO R, CASTRILLO M, CASAO M, et al. Model-based evaluation of a trickling filter facility upgrade to biological nutrient removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 187-195. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.136.
- [14] LI W Y, LOYOLA-LICEA C, CROWLEY D E, et al. Performance of a two-phase biotrickling filter packed with biochar chips for treatment of wastewater containing high nitrogen and phosphorus concentrations[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 102: 150 - 158. DOI: 10.1016/j.psep.2016.03.001.
- [15] 白永刚. 滴滤池—人工湿地技术处理农村生活污水应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
BAI Y G. Study on the treatment of rural domestic wastewater by TF-CW technology and its application [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [16] 刘颖, 郭新超, 慕银. 生物滴滤池处理校园生活污水强化脱氮除磷研究[J]. *环境工程*, 2015, 33(11): 42-47, 137.
LIU Y, GUO X C, MU Y Y. Study on enhanced nitrogen and phosphorus removal treatment for campus domestic sewage by biotrickling[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(11): 42-47, 137.
- [17] PAING J, VOISIN J. Vertical flow constructed wetlands for municipal wastewater and septage treatment in French rural area [J]. *Water Science and Technology*, 2005, 51(9): 145-155.
- [18] 段化杰, 唐志坚, 张跃峰, 等. 基于生物膜模型的脉冲生物滤池硝化效果模拟[J]. *环境工程*, 2015, 33(4): 53-57.
DUAN H J, TANG Z J, ZHANG Y F, et al. Simulation on nitrification performance in pulsed trickling filter based on biofilm model [J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(4): 53-57.
- [19] 张毅. 垂直生物滴滤池—水平多介质土壤层系统处理污水的性能[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
ZHANG Y. Performance of system consisting of vertical flow trickling filter and horizontal flow multi-soil-layering reactor for treatment of sewage[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [20] 黄涛. 脉冲双层滤料生物滤池与人工湿地组合工艺处理农村生活污水应用技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
HUANG T. Study on the application of pulsed double-layer biofilter and constructed wetland combined process for rural domestic wastewater treatment [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [21] 黄媛媛, 许东阳, 纪荣平. 改进生物滴滤池—人工湿地处理农村生活污水研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(5): 93-97.
HUANG Y Y, XU D Y, JI R P. Study on rural sewage treatment by improved biological trickling filter-artificial wetland [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(5): 93-97.
- [22] 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 H. Study on the treatment of rural domestic wastewater by hydrolysis pond-trickling filter-constructed wetland [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [23] 王康萍, 郭新超, 张鹏. 3级生物滴滤池处理生活污水脱氮除磷特性研究[J]. *水处理技术*, 2016, 42(12): 119-123.
WANG K P, GUO X C, ZHANG P. Removal of nitrogen and phosphorus in sewage treatment by three-stage bio-trickling filter [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(12): 119-123.

水厂视界

小型水厂如何实现数字化升级改造?

桃江县城市供水有限公司于1981年成立, 现有桃江一、二水厂。由于建设年代较早, 部分工艺设备逐渐老化, 自动化程度不足问题慢慢突显, 很大程度上影响了出厂水质保障与水厂安全稳定运行。以桃江一水厂为例, 对滤池自控和加药系统部分进行问题剖析, 并且提出对应的自控改造方案。实施改造方案后, 水厂总体节能约10%, 实际人工成本、电耗、药耗等大幅下降, 成效显著。

(供稿单位: 桃江县城市供水有限公司)



扫描二维码阅读全文