

## 基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷生活污水处理装置研究

王睿<sup>1,2</sup>, 张亮<sup>3</sup>, 谭映宇<sup>1\*</sup>, 李亚<sup>1,2</sup>, 任旭锋<sup>1,2</sup>, 徐佳佳<sup>1,2</sup>, 梅荣武<sup>1,2</sup>, 王震<sup>1,2</sup> (1. 浙江省生态环境科学设计研究院, 浙江杭州 310007; 2. 浙江环科环境研究院有限公司, 浙江杭州 310007; 3. 浙江省生态环境低碳发展中心, 浙江杭州 310007)

**摘要** 通过对比试验研究聚氨酯、竹纤维、火山岩、沸石、牡蛎壳 5 种填料在污水处理过程中的实际效果。以填料的优化配置为基础研发一种基于竹纤维的一体化脱氮除磷生活污水处理装置, 并开展小试、中试研究。小试试验中, 火山岩填料的出水 COD 平均浓度最低, 为 27.56 mg/L, 平均去除率为 91.64%; 混合填料对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果最好, 出水平均浓度为 4.80 mg/L, 平均去除率为 77.66%; 沸石填料对 TN 的去除效果最好, 出水平均浓度为 9.53 mg/L, 平均去除率为 71.44%; 混合填料对 TP 的去除效果最好, 其出水平均浓度为 1.88 mg/L, 平均去除率达 57.84%。中试试验中, 出水 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的平均浓度分别为 50.73、11.03、13.10 和 1.59 mg/L, 相应的平均去除率分别为 86.51%、59.53%、61.57% 和 43.92%, 出水满足《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》DB 33/973—2015 一级标准。

**关键词** 竹纤维填料; 混合填料; 生活污水; 脱氮除磷; 牡蛎壳填料

**中图分类号** X 799.3 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2021)11-0064-08

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.11.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Study on Integrated Nitrogen and Phosphorus Removal Domestic Sewage Treatment Device Based on Bamboo Fiber Filler

WANG Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Liang<sup>3</sup>, TAN Ying-yu<sup>1</sup> et al (1. Zhejiang Ecological Environment Scientific Design and Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310007; 2. Zhejiang Environmental Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310007; 3. Zhejiang Ecological Environment Low Carbon Development Center, Hangzhou, Zhejiang 310007)

**Abstract** The actual effect of five kinds of fillers (polyurethane, bamboo fiber, volcanic rock, zeolite and oyster shell) in the process of wastewater treatment was studied through comparative experiments. Based on the optimal allocation of fillers, an integrated nitrogen and phosphorus removal domestic sewage treatment device based on bamboo fiber was developed, and the small-scale and pilot studies were carried out. In the small-scale test, the average concentration of COD in the effluent of volcanic rock packing was the lowest, which was 27.56 mg/L, with an average removal rate of 91.64%; the mixed packing had the best removal effect on  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , which was 4.80 mg/L, with an average removal rate of 77.66%; the zeolite packing had the best removal effect on TN, which was 9.53 mg/L, with an average removal rate of 71.44%; the mixed packing had the best removal effect on TP 1.88 mg/L, the average removal rate reached 57.84%. In the pilot test, the average concentrations of COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN and TP in the effluent were 50.73, 11.03, 13.10 and 1.59 mg/L respectively, and the corresponding average removal rates were 86.51%, 59.53%, 61.57% and 43.92% respectively. The effluent met the first-level standard of DB 33/973—2015 in the *Water Pollutant Discharge Standard for Rural Domestic Sewage Treatment Facilities*.

**Key words** Bamboo fiber packing; Mixed packing; Domestic sewage; Nitrogen and phosphorus removal; Oyster shell packing

随着我国农村经济水平的快速发展, 村民生活水平日益提高, 其生活方式也发生改变, 现代化厨卫设施使用覆盖率增加, 伴随而来的生活污水排放量亦显著增加<sup>[1]</sup>。据统计, 20 世纪 90 年代我国的生活污水产生排放量超过同时期的工业废水排放量, 成为主要的水污染源, 未经处理的生活污水随意排放, 不仅造成周边地表水体的严重污染, 还直接或间接危害人类生存环境及身体健康。常见的城镇污水处理厂由于其建设成本高、运维管理难等因素, 再者由于农村生活污水具有分布散、水质水量波动大、随机性强等特点, 使得市政污水处理工艺并不适用于广大农村地区的生活污水处理。因此, 为了有效处理农村生活污水、改善农村人居环境、保障村民身体健康, 研究开发适合我国农村地区实际情况的简易、高效低耗脱氮除磷污水处理技术是解决我国农村水环境污染和水资源短缺问题的有效途径<sup>[2]</sup>。

## 1 技术路线

该研究利用农村废弃物(如竹纤维填料、牡蛎壳等)制作

**基金项目** 浙江省重点研发计划项目(2020C02010/005); 浙江省环境保护科学设计研究院学术创新团队建设“废水深度处理与污染物减排研究创新团队”; 国家“十三五”水专项(2017ZX07206-004-003)。

**作者简介** 王睿(1988—), 男, 甘肃兰州人, 工程师, 硕士, 从事水处理技术及流域水生态环境治理技术研究。\* 通信作者, 高级工程师, 博士, 从事水生态流域综合治理技术研究。

**收稿日期** 2021-01-29; **修回日期** 2021-03-05

新型填料, 变“废”为“宝”, 并通过对比试验来研究其在污水处理过程中的实际效果。以填料的优化配置为基础研发一种低成本、低能耗、不易堵塞、占地面积小、结构简单、运行维护管理方便的基于竹纤维的一体化脱氮除磷生活污水处理装置, 并通过小试、中试, 最终应用于实际工程上<sup>[3]</sup>。图 1 为研究技术路线图。

该研究一体化装置内填料为生物膜提供了巨大的附着比表面积, 生长于生物膜上的微生物大量吸附污水中的有机物, 具有较强的氧化能力。不溶性的有机物通过填料的过滤作用被截留形成污泥; 可溶性有机物则通过生物膜的吸附及微生物代谢作用而被去除; 氮、磷的去除主要靠填料的吸附和离子交换作用, 如不更换填料无法从根本去除, 将填料的吸附作用与生物膜的降解作用进行协同有机结合, 可有效地解决这一问题<sup>[4]</sup>。被填料阻截的有机氮可通过氨化作用转化为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  通过硝化作用转化为亚硝氮和硝氮, 最后通过反硝化作用转化为氮气排出; 聚磷菌类的微生物能够去除吸附在填料上的磷, 其代谢过程中需要从外部环境中不断地摄取磷, 并将磷以聚合的形态储藏在菌体内, 通过定期排泥从而达到除磷效果<sup>[5]</sup>。

微生物的生长需要一定营养和合适的环境条件, 影响填料挂膜的主要因素有温度、pH、溶解氧浓度、营养物质及水力停留时间等, 这些因素决定了填料上生物膜的生长速度和活

性<sup>[6]</sup>。在适宜的范围内提高温度可有效促进酶促反应速度,因而微生物的生长和代谢速率均相应提高。好氧微生物的适宜温度是 10~35 ℃,通常水温低于 10 ℃,对生物膜的生长就会产生不利的影响。挂膜期间进水水温为 20~30 ℃,恰好适合生物膜的生长。大多数微生物的最适 pH 为 6.5~8.5,小于 4 或大于 10 都会对微生物的生长产生不利影响。挂膜期间进水 pH 在 6.5~8.0,出水 pH 在 6.5~7.5,对微生物的生长最为适宜。溶解氧浓度与好氧微生物的生长量呈正相关,好氧环境中溶解氧浓度需维持在 2 mg/L 以上<sup>[7]</sup>。挂膜

期间对一体化装置适量曝气保持出水溶解氧浓度在 4.0 mg/L 左右,使好氧微生物得以快速生长。而污水原水中的有机物恰好为微生物的生长提供了营养物质,好氧微生物生长所需的最佳碳氮磷比为  $BOD_5:N:P=100:5:1$ 。挂膜期间最佳进水 COD 浓度为 450 mg/L 左右,这与农村生活污水的水质特性相匹配。最佳水力停留时间的设定会使微生物在快速生长的同时不会过量地消耗污水中的碳源,保持最佳的碳氮磷比,提升挂膜效果,增强污水中污染物的去除率<sup>[8]</sup>。图 2 为生物膜净化模式。

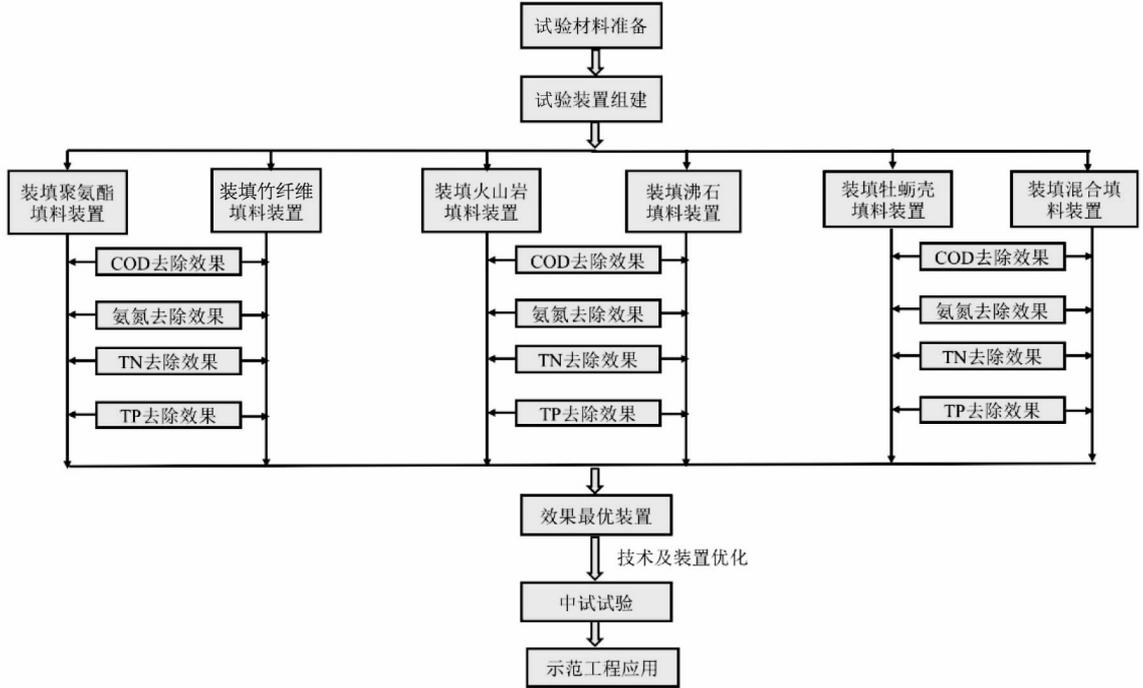


图 1 基于竹纤维一体化脱氮除磷污水处理技术研究路线

Fig. 1 Research route based on bamboo fiber integrated nitrogen and phosphorus removal wastewater treatment technology

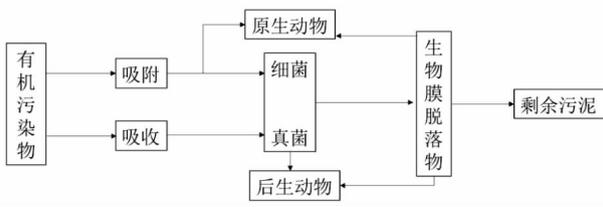


图 2 生物膜净化模式

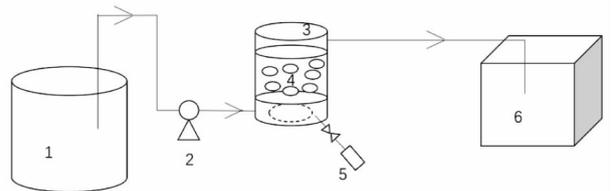
Fig. 2 Biofilm purification mode

## 2 小试试验研究

**2.1 小试试验设计** 采用 6 个相同尺寸的 PVC 容器,直径为 14.50 cm,高为 28.00 cm,填料层高度 12.50 cm。处理水量为 0.15 L/h,水力停留时间为 24 h,5 个装置分别装填竹纤维、火山岩、沸石、牡蛎壳和聚氨酯填料,另一个装置从上至下等高装填牡蛎壳、火山岩、沸石、聚氨酯和竹纤维填料<sup>[9]</sup>。污水自下而上流经填料。采取连续进水、连续出水的方式,采集水样分析其对 COD、 $NH_4^+-N$ 、TN 和 TP 的去除效果。

为控制试验条件,采用人工配制的污水进行对比试验,即向纯水中按比例投加葡萄糖、硫酸铵、磷酸二氢钾、硝酸钠等分析纯试剂配制成低浓度生活污水,试验进水水质指标浓

度分别如下: COD 为 170.90~425.00 mg/L,  $NH_4^+-N$  为 6.10~35.60 mg/L, TN 为 10.63~43.60 mg/L, TP 为 2.80~5.90 mg/L。试验流程见图 3,试验现场图见图 4。



注:1. 原水;2. 进水泵;3. 一体化装置;4. 填料层;5. 曝气装置;6. 出水  
Note: 1. Raw water; 2. Intake pump; 3. Integrated device; 4. Packing layer; 5. Aeration device; 6. Effluent

图 3 小试试验流程

Fig. 3 Small-scale test process

该研究所选用的装置填料情况特性如下所述:

(1) 聚氨酯。它是由有机二异氰酸酯或多异氰酸酯与二羟基或多羟基化合物加聚而成。网状聚氨酯泡沫塑料的孔隙率通常在 97% 以上,有较好的亲水性和较大的比表面积,其内部复杂的网状结构可以为微生物提供易于附着生长的



图4 小试试验装置

Fig. 4 Small-scale test device

良好空间,是一种较为理想的生化污水处理材料<sup>[10]</sup>。

(2) 竹纤维。系天然成分,具有亲水性、无毒副作用,含有很多的微量元素,为微生物的繁殖生长提供了良好的物质条件,在一定程度上还能解决碳源不足的问题,使反硝化细菌能够顺利地进行反硝化作用;竹纤维填料表面粗糙,具有很大的比表面积,为微生物的生长提供了良好的栖息场所;挂膜后的竹纤维填料密度大于水,不会在水中呈悬浮状态,避免了填料之间相互碰撞而导致生物膜脱落。

(3) 火山岩。主要成分为 Si、Al、Ca、Na、Mg、Ti、Mn、Fe、Ni 和 Co 等几十种矿物质和微量元素,其表面不规则,为红黑褐色,多空隙,机械强度大,质轻且化学性质稳定。由于其表

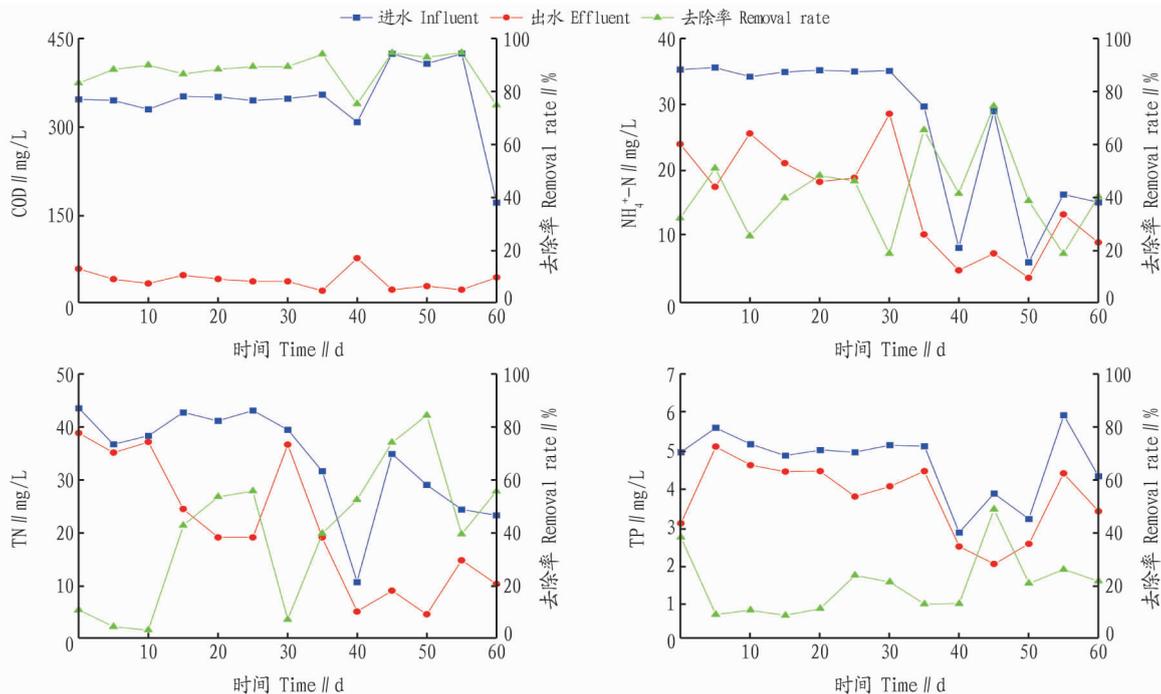
面粗糙多空隙,使得微生物较易在其表面生长、繁殖,从而生成生物膜。

(4) 沸石。沸石是一族多孔铝酸盐晶体的总称,外观呈灰白色,其表面具有很强的色散力,内部有很大的蜂窝状孔隙,体积占晶体总体积的 50% 以上。沸石也具有较强的静电力,即体现为较强的吸附性。同时还具有离子交换能力,污水中的  $\text{NH}_4^+$  与沸石晶格中的  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子发生相互交换。沸石中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  等离子与污水中的  $\text{PO}_4^{3-}$  发生化学反应生成沉淀。

(5) 牡蛎壳。主要成分为  $\text{CaCO}_3$ ,其含量为 80%~95%,另外含有微量的  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、Al、Mg、K、Cu 和 Si 等微量元素,是一种无机盐资源。牡蛎壳的物理构造由角质层、棱柱层、珍珠层组成,主要部分为棱柱层,叶片状结构,含大量互相联通的 2~10  $\mu\text{m}$  微孔,具有较强的吸附能力<sup>[11]</sup>。

## 2.2 小试结果与分析

**2.2.1 聚氨酯填料处理效果。**从装填聚氨酯填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果(图 5)可以看出,其出水 COD 平均浓度为 38.76 mg/L,平均去除率为 87.90%;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均出水浓度为 15.60 mg/L,平均去除率为 41.40%; TN 平均出水浓度为 21.04 mg/L,平均去除率为 40.28%; TP 平均出水浓度为 3.72 mg/L,平均去除率为 20.49%。

图5 装填聚氨酯填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果Fig. 5 The removal effect of COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN, TP by an integrated device filled with polyurethane filler

**2.2.2 竹纤维填料处理效果。**从装填竹纤维填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果(图 6)可以看出,其出水 COD 平均浓度为 90.34 mg/L,平均去除率为 73.11%;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均出水浓度为 10.71 mg/L,平均去除率为 59.16%; TN 平均出水浓度为 13.57 mg/L,平均去除率为

60.82%; TP 平均出水浓度为 3.61 mg/L,平均去除率为 23.77%。

**2.2.3 火山岩填料处理效果。**从装填火山岩填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果(图 7)可以看出,其出水 COD 平均浓度为 27.56 mg/L,平均去除率为

91.64%; $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均出水浓度为 12.81 mg/L, 平均去除率为 52.91%;TN 平均出水浓度为 16.45 mg/L, 平均去除率为

53.36%;TP 平均出水浓度为 3.30 mg/L, 平均去除率为 29.60%。

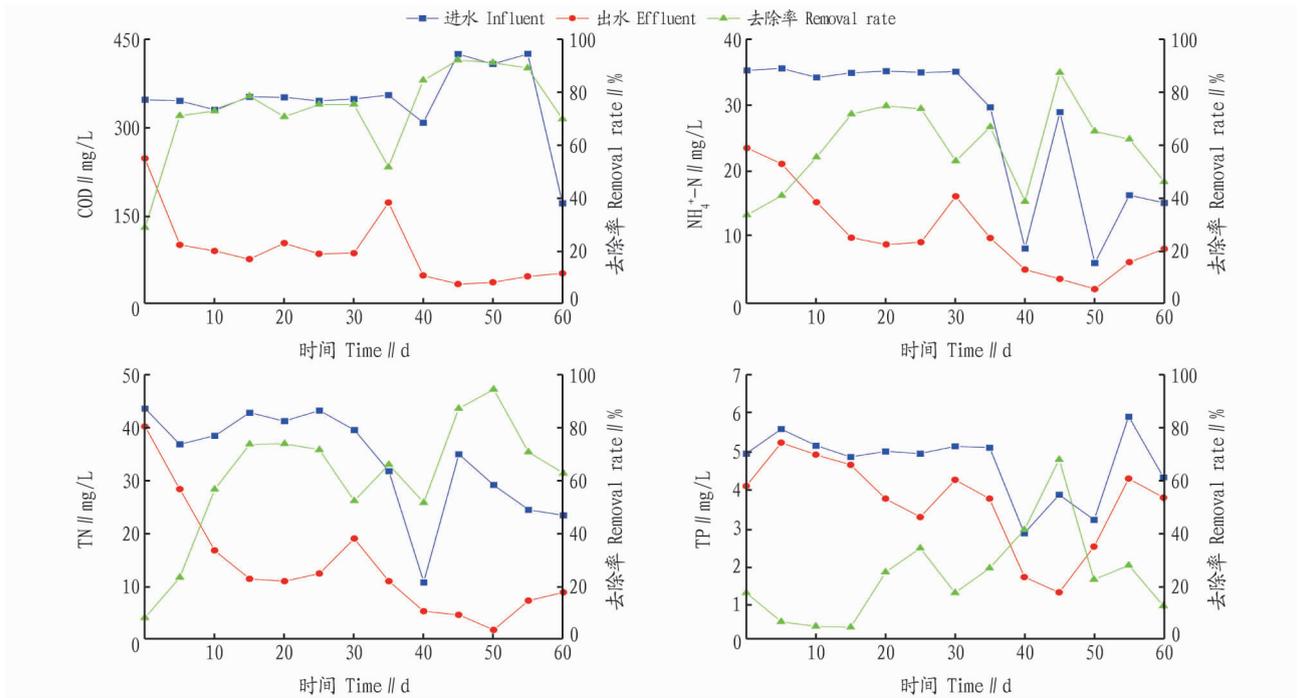


图 6 装填竹纤维填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果

Fig. 6 The removal effect of COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN, TP by an integrated device filled with bamboo fiber filler

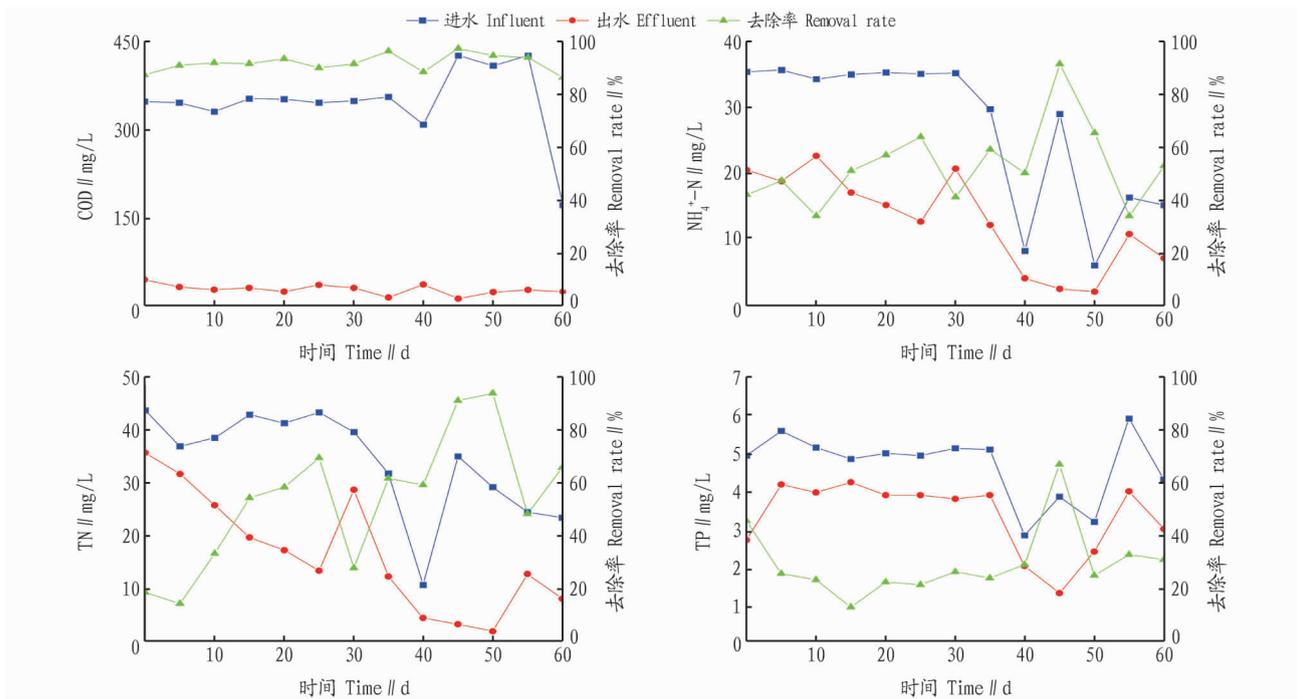


图 7 装填火山岩填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果

Fig. 7 The removal effect of COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN, TP by an integrated device filled with volcanic rock filler

**2.2.4 沸石填料处理效果。**从装填沸石填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果(图 8)可以看出,其出水 COD 平均浓度为 33.77 mg/L, 平均去除率为 89.80%;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均出水浓度为 6.03 mg/L, 平均去除率为 71.20%; TN 平均出水浓度为 9.53 mg/L, 平均去除率为 71.44%; TP

平均出水浓度为 3.33 mg/L, 平均去除率为 28.45%。

**2.2.5 牡蛎壳填料处理效果。**从装填牡蛎壳填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果(图 9)可以看出,其出水 COD 平均浓度为 30.47 mg/L, 平均去除率为 90.92%;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均出水浓度为 6.56 mg/L, 平均去除率为 69.99%;

TN 平均出水浓度为 15.52 mg/L,平均去除率为 55.65%;TP 平均出水浓度为 2.86 mg/L,平均去除率为 37.41%。

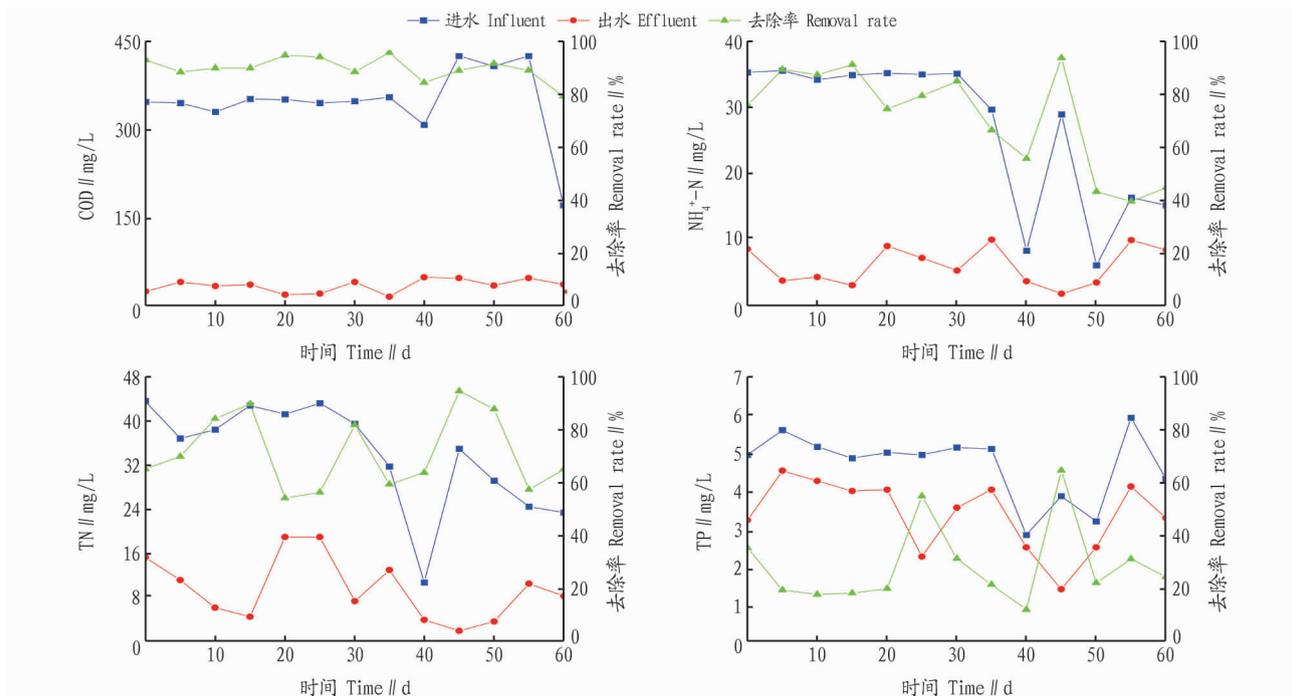


图8 装填沸石填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果

Fig. 8 The removal effect of COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN, TP by an integrated device filled with zeolite filler

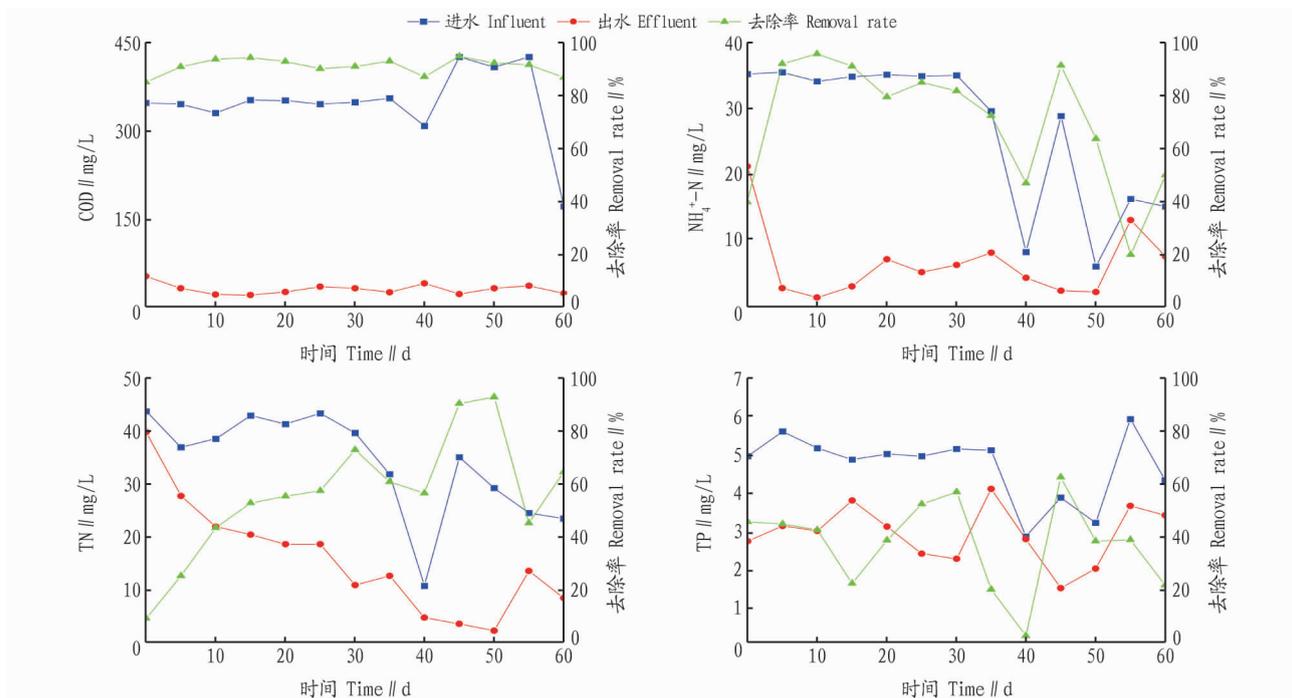


图9 装填牡蛎壳填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果

Fig. 9 The removal effect of COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN, TP by an integrated device filled with oyster shell filler

**2.2.6 5种混合填料处理效果。**从装填5种混合填料的一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果(图 10)可以看出,其出水 COD 平均浓度为 33.08 mg/L,平均去除率为 90.13%; $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均出水浓度为 4.80 mg/L,平均去除率为 77.66%;TN 平均出水浓度为 10.08 mg/L,平均去除率为 70.78%;TP 出水平均浓度为 1.88 mg/L,平均去除率为

57.84%。

**2.2.7 不同种类填料组合处理效果对比。**从装填不同种类填料的一体化装置对污水的净化效果(表 1)可以看出,在相同进水条件下,装填火山岩填料的一体化装置出水 COD 平均浓度最低,为 27.56 mg/L,相应的平均去除率为 91.64%,装填牡蛎壳出水 COD 平均浓度次之,为 30.47 mg/L,相应的

平均去除率为 90.92%,装填竹纤维填料的出水 COD 平均浓度最高,为 90.34 mg/L,相应的去除率较低,为 73.11%,这是由于试验周期较短,在试验初期竹纤维填料有缓释有机物的功能,从图 10 可以看出,在试验后期出水 COD 浓度大幅度降低;装填 5 种混合填料的装置对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果最好,出水平均浓度为 4.80 mg/L,其相应的去除率为 77.66%,

这是因为各种填料的混合作用更利于微生物的生长;沸石装置对 TN 的去除效果最好,出水平均浓度为 10.08 mg/L,混合填料装置其次之,其相应的出水平均浓度 10.08 mg/L,去除率为 70.78%;混合填料装置对 TP 的去除效果最好,其出水平均浓度为 1.88 mg/L,相应的去除率达 57.84%,表明多种填料的共同作用更利于废水中 TP 的去除<sup>[12]</sup>。

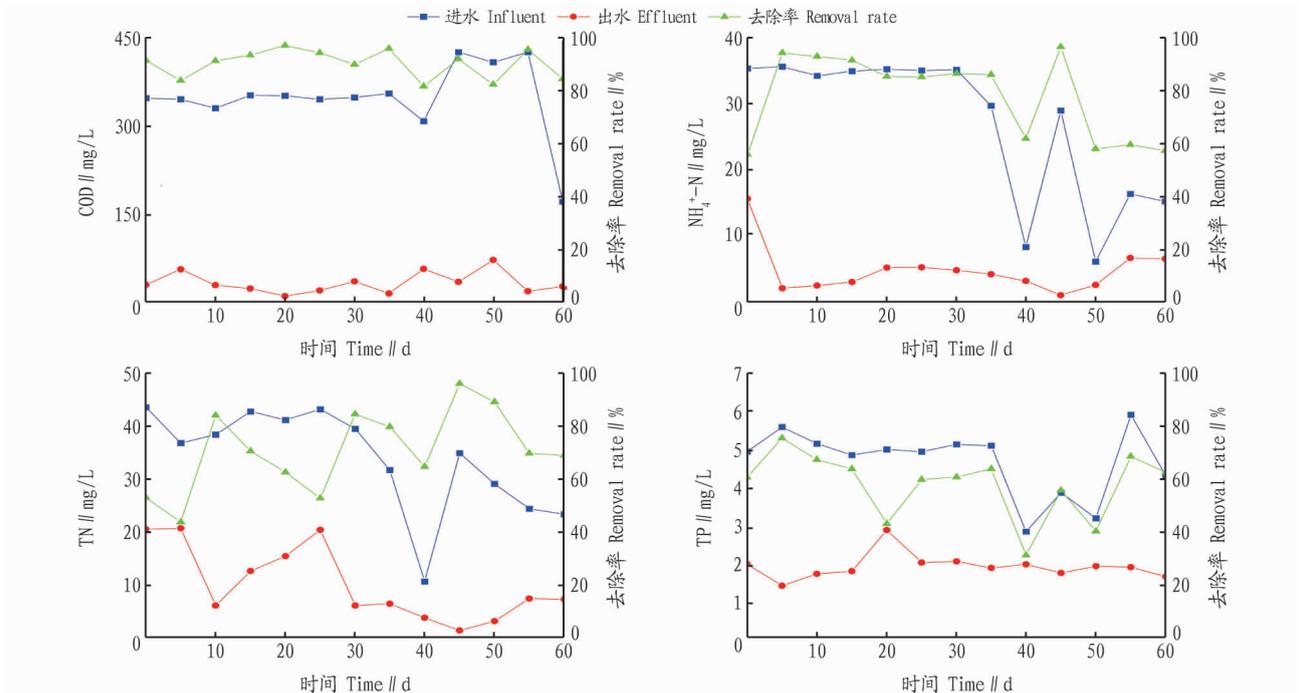


图 10 装填 5 种混合填料一体化装置对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的去除效果

Fig. 10 The removal effect of COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN, TP by an integrated device for filling 5 kinds of mixed fillers

表 1 装填不同种类填料的一体化装置对污水的净化效果

Table 1 The purification effect of the integrated device filled with different types of fillers on sewage

填料种类 Type of filler	进水浓度 Influent concentration//mg/L				出水浓度 Effluent concentration//mg/L				去除率 Removal rate//%			
	COD	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	TN	TP	COD	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	TN	TP	COD	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	TN	TP
聚氨酯 Polyurethane	346.88	26.92	33.82	4.66	38.76	15.60	21.04	3.72	87.90	41.40	40.28	20.49
竹纤维 Bamboo fiber	346.88	26.92	33.82	4.66	90.34	10.71	13.57	3.61	73.11	59.16	60.82	23.77
火山岩 Volcanic rock	346.88	26.92	33.82	4.66	27.56	12.81	16.45	3.30	91.64	52.91	53.36	29.60
沸石 Zeolite	346.88	26.92	33.82	4.66	33.77	6.03	9.53	3.33	89.80	71.20	71.44	28.45
牡蛎壳 Oyster shell	346.88	26.92	33.82	4.66	30.47	6.56	15.52	2.86	90.92	69.99	55.65	37.41
混合填料 Mixed fillers	346.88	26.92	33.82	4.66	33.08	4.80	10.08	1.88	90.13	77.66	70.78	57.84

### 3 中试试验研究

**3.1 中试试验设计** 该研究构造了基于竹纤维的一体化脱氮除磷生活污水处理装置,开展中试试验,装置储存水量为 1 t,从上至下依次分层等量装填牡蛎壳、火山岩、沸石、聚氨酯和竹纤维<sup>[3]</sup>。由小试试验结果得知,装填 5 种混合填料的装置综合来看对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和 TP 的去除效果最好,因此对其放大进行中试试验。一个玻璃钢容器,直径为 1.0 m,高为 1.5 m,填料层总高 1.0 m,从上至下分成 5 等份,依次装入牡蛎壳、火山岩、沸石、聚氨酯和竹纤维。污水自下而上流经填料,容器底部设置曝气装置,试验现场见图 11。处理水量为 42 L/h,水力停留时间为 24 h<sup>[2]</sup>。

试验期间平均气温在 30 ℃左右,平均水温在 25~30 ℃,

此时的温度属于适宜温度,较适于挂膜试验的进行。当水温较高且进水水质中可生物降解成分较高时,可采用自然挂膜。即以小流量进水,使微生物逐渐接种在填料上附着生长,逐渐减少停留时间,直至达到要求。当水温较低或水中可生物降解成分较少时,应采用接种挂膜,以强化挂膜效果减少挂膜时间。此次试验采用活性污泥接种法对填料进行挂膜<sup>[13]</sup>。

从污水处理厂取回 20 L 回流污泥,该污泥呈褐色,将其倒入一个大塑料圆桶中,对其进行曝气 24 h,净沉 1 h,去除上清液后还剩 10 L 活性污泥。再配  $\text{BOD}_5:\text{N}:\text{P}=100:5:1$  的营养液 10 L 与活性污泥混合曝气,每天重复换水 1 次。4 d 后镜检发现有大量的钟虫、草履虫等微生物,投加到中试一



图 11 中试试验装置

Fig. 11 Pilot test device

体化装置中,闷曝气 2 d 后以小流量进水试验。

### 3.2 中试结果与分析

**3.2.1 COD 去除率。**从中试试验对 COD 的去除效果(图 12)可以看出,进水 COD 浓度波动性较大,在第 35 天和第 55 天时分别达到最低值(308 mg/L)和最高值(449 mg/L),最初几天,COD 的去除效率相对较低,在 75%左右,这是因为初期系统中的接种污泥还不适应污水的水质,此时系统对有机物的去除主要借助于填料层的机械截留和物理吸附作用。随着运行时间的延长,COD 去除效率逐渐提升。出水 COD 均值为 50.73 mg/L,受污染负荷浓度变化影响小,去除率均值为 86.51%。

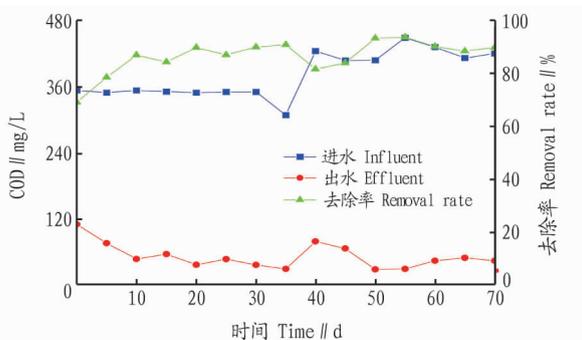
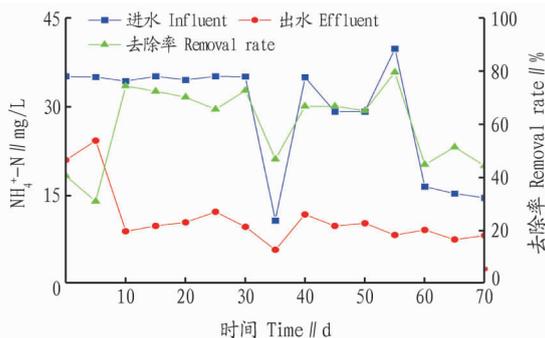


图 12 基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷生活污水中试装置对 COD 的去除效果

Fig. 12 COD removal effect of the integrated nitrogen and phosphorus removal domestic sewage pilot plant based on bamboo fiber filler

**3.2.2  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率。**从中试试验对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果(图 13)可以看出,运行初期由于污泥还不适应污水的水质,因此  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率较低,此时系统对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除主要靠填料对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的吸附和离子的交换作用。随着运行时间的延长, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除效率逐渐提升且趋于稳定,虽然系统进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度在一定范围内大幅度波动(10.63~39.81 mg/L),但出水均保持了较低的浓度,其出水浓度均值

为 11.03 mg/L,相应的去除率为 59.53%。

图 13 基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷生活污水中试装置对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果Fig. 13  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  removal effect of the integrated nitrogen and phosphorus removal domestic sewage pilot plant based on bamboo fiber filler

**3.2.3 TN 去除率。**从中试试验对 TN 的去除效果(图 14)可以看出,经过一体化装置出水 TN 平均浓度为 13.10 mg/L,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,其相应的去除率为 61.57%。TN 的浓度和去除率的变化趋势与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的基本上相一致,进一步证明了中试试验的可靠性。

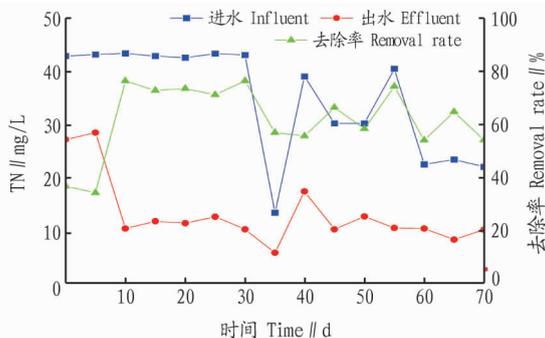


图 14 基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷生活污水中试装置对 TN 的去除效果

Fig. 14 TN removal effect of the integrated nitrogen and phosphorus removal domestic sewage pilot plant based on bamboo fiber filler

**3.2.4 TP 去除率。**从中试试验对 TP 的去除效果(图 15)可以看出,进水 TP 浓度波动性较大且无明显规律,经过一体化装置出水 TP 平均浓度为 1.59 mg/L,满足《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 33/973—2015)一级标准,其相应的去除率为 43.92%。

## 4 小结

(1)小试试验中在相同进水条件下,装填火山岩填料的一体化装置出水 COD 平均浓度最低,为 27.56 mg/L,相应的平均去除率为 91.64%。装填 5 种混合填料的装置对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果最好,出水平均浓度为 4.80 mg/L,其相应的平均去除率为 77.66%;装填沸石填料的装置对 TN 的去除效果最好,出水均值浓度为 9.53 mg/L,装填混合填料的装置仅次于,其相应的出水均值浓度 10.08 mg/L,平均去除率为

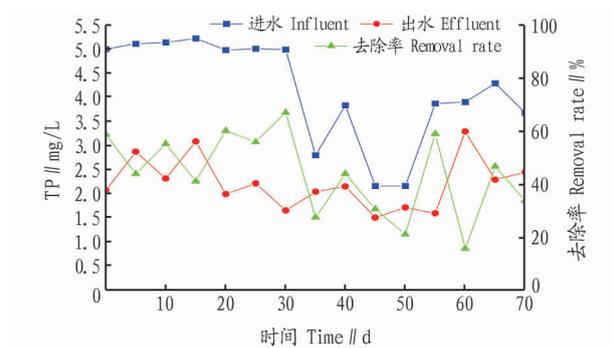


图 15 基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷生活污水中试装置对 TP 的去除效果

Fig. 15 TP removal effect of the integrated nitrogen and phosphorus removal domestic sewage pilot plant based on bamboo fiber filler

70.78%;装填混合填料的装置对 TP 的去除效果最好,其出水均值浓度为 1.88 mg/L,相应的平均去除率达 57.84%。

(2)中试试验中出水 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 的均值分别为 50.73、11.03、13.10 和 1.59 mg/L,相应的平均去除率分别为 86.51%、59.53%、61.57%和 43.92%,可大幅度消减污染物浓度,出水满足《农村生活污水处理设施水污染物排放标

(上接第 52 页)

键期灌水量并不断促进或抑制小麦的生长发育,是降低小麦生育期耗水和提高水分利用效率的有效方法。冬小麦生育期间(2019年10月—2020年6月)降雨 87.58 mm,为枯水年<sup>[13]</sup>。随着灌溉量增加,冬小麦产量构成因素千粒重、穗粒数、穗数变化影响趋势较一致,均先增加后减少。当灌水量为 127~217 mm 时,随着灌水量的增加,千粒重、穗粒数、穗数增加且差异显著,但灌水量为 217~315 mm 时,随着灌水量的增加,千粒重、穗粒数、穗数缓慢减少,但差异不显著。从产量和水分利用效率来看,整个生育期灌水量在 217 mm 时,产量最高,达到 8 396.72 kg/hm<sup>2</sup>;水分利用效率也达到最高,为 19.19 kg/(hm<sup>2</sup>·mm),相比其他处理实现了冬小麦的高产和高效生产。因此,该试验结果主要反映了该地区干旱年份小麦产量、水分利用效率随灌水量的变化规律。水分作为小麦高产的基本保证之一,大量的水分进入田间如不能被小麦充分吸收利用,反而会增大水分蒸发,从而降低灌溉水分的利用效率。

#### 参考文献

- [1] 河北省水利厅. 2018 年河北省水资源公报[R]. 石家庄, 2018.
- [2] 马俊永,李科江,曹彩云,等. 河北低平原春季不同灌溉量对小麦产量

准》DB 33/973—2015 一级标准。

#### 参考文献

- [1] 苗伟红. 人工湿地填料处理污水的试验研究[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [2] 李亚. 新型自通风的生物滤床-潜流人工湿地耦合系统强化处理农村生活污水中试对比研究[D]. 金华:浙江师范大学, 2017.
- [3] 王睿,李亚,梅荣武. 一体化成套技术在农村生活污水中的应用研究[J]. 环境与可持续发展, 2018, 43(2): 14-17.
- [4] 周菁. 引滦水生物预处理工艺及有机物降解机理研究[D]. 天津:天津大学, 2002.
- [5] 蒋涛,李亚,盛安志,等. 农村生活污水治理模式与技术研究综述[J]. 环境与可持续发展, 2018, 43(4): 79-83.
- [6] 李亚,孔令为,张义,等. 人工湿地技术低温运行效果及对策[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(17): 195-197.
- [7] 王君雅. 人工湿地基质脱氮除磷性能试验研究[D]. 桂林:桂林理工大学, 2010.
- [8] 陈克玲. 水库微污染水源地处理技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2003.
- [9] 李林锋,吴小凤. 天然牡蛎壳对磷吸附特性试验研究[J]. 三峡环境与生态, 2011, 33(6): 1-4, 8.
- [10] 成国栋. 改性聚氨酯填料的生物膜附着性能及废水处理特性研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [11] 刘耀兴. 牡蛎壳填料曝气生物滤池处理城市生活污水的实验研究[D]. 厦门:厦门大学, 2008.
- [12] 杨俊. 不同级配基质对人工湿地处理生活污水效果的影响研究[D]. 南昌:南昌大学, 2015.
- [13] 彭锦玉. 厌氧氨氧化塔式生物滤池脱除 NO 研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.

的影响趋势研究[J]. 河北农业科学, 2008, 12(3): 13-15, 18.

- [3] 余四平,冯伟森,袁灵红,等. 灌水次数对旱地小麦产量及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(3): 283-286, 292.
- [4] 冯诚,代俊峰,方小宇,等. 不同水分处理条件下小麦需水规律研究[J]. 节水灌溉, 2017(3): 18-20.
- [5] 杜娟娟,李粉婵,王仰仁. 限水灌溉下冬小麦最佳灌溉施肥制度研究[J]. 节水灌溉, 2017(12): 17-21.
- [6] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. Irrigation science, 2008, 27(1): 1-10.
- [7] 热合木·亚合亚,马合木江·艾合买提,叶尔宝拉提·阿帕克,等. 不同灌溉定额对滴灌小麦产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(23): 241-243, 262.
- [8] 郭增江,于振文,石玉,等. 不同土层测墒补灌对小麦旗叶光合特性和干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(4): 731-738.
- [9] ZHANG X Y, PEI D, HU C S. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain[J]. Irrigation science, 2003, 21(4): 159-166.
- [10] 王淑芬,张喜英,裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27-32.
- [11] LIU C M, ZHANG X Y, ZHANG Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and forest meteorology, 2002, 111(2): 109-120.
- [12] 董志强,张丽华,李谦,等. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特性[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 725-733.
- [13] 闫鹏,陈源泉,张学鹏,等. 河北低平原区春玉米一熟替代麦玉两熟制的水生态与粮食安全分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1491-1499.