

多介质膜生物反应器-复合人工湿地组合工艺处理农村生活污水中试试验

刘璐¹, 孙利², 陈建³, 马金², 柯凡^{4*} (1. 南京大学环境学院, 江苏南京 210000; 2. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084; 3. 合肥工业大学, 安徽合肥 230000; 4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏南京 210008)

摘要 根据派河支流光明大堰河流域范围内产生的农村生活污水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 含量超标的特点, 以湿地技术为核心, 设计了 BA-MBR+复合人工湿地组合处理技术模型。模型经过调试运行, 随着挂膜逐渐成熟后, 对系统进出水质进行监测与分析。结果显示该系统对 SS、 COD_{Cr} 、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 平均去除率分别达 90%、55%、42%、75%、30%。该工艺采用多级曝气, 增加溶解氧含量, 对氨氮去除效果明显, 提高脱氮效率。整套系统内部形成“好氧-厌氧”的环境, 有效削减污染物含量, 脱氮除磷效果较好。该工艺适用于处理农村生活污水, 且工艺采用湿地净化技术, 运行成本低, 村镇融合效果好, 环境、生态效益好, 易于在农村地区推广。

关键词 复合人工湿地; 巢湖; 农村生活污水; 净化效果

中图分类号 X 799.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)21-0077-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.21.024



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Pilot Test of Medium Membrane Bioreactor-Composite Constructed Wetland Combination Process for Treatment of Rural Domestic Sewage

LIU Lu¹, SUN Li-li², CHEN Jian³ et al (1. School of The Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210000; 2. Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084; 3. Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230000)

Abstract According to the characteristics of excess $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD content of rural domestic sewage generated within the Guangming Dayan River basin, a tributary of Paihe River, the ba-mbr + composite constructed wetland combined treatment technology model was designed with wetland technology as the core. After debugging and running, the water quality in and out of the system was monitored and analyzed as the hanging film gradually matures. The results showed that the average removal rates of SS, COD_{Cr} , TN, $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP in the system reached 90%, 55%, 42%, 75% and 30% respectively. This process adopted multi-stage aeration to increase the content of dissolved oxygen, obviously removed ammonia nitrogen and improved the efficiency of nitrogen removal. An "aerobic-anaerobic" environment was formed in the whole system, which could effectively reduce the content of pollutants and achieve better denitrification and phosphorus removal. This process was suitable for the treatment of rural domestic sewage, and the process adopted wetland purification technology, with low operating cost, good integration effect of villages and towns, good environmental and ecological benefits, and easy to be popularized in rural areas.

Key words Composite constructed wetland; Lake Chao; Rural domestic sewage; Purification effect

巢湖是我国五大淡水湖之一, 其总流域面积 1.35 万 km^2 , 流域内涉及安徽省内 5 市 16 县^[1], 流域内河流众多, 水资源丰富。根据《巢湖 2005—2014 年湖体水质状况》^[2] 显示湖体内水质超过地表水 III 类标准, 总氮、总磷为主要超标污染物, 据监测资料显示, 西半湖水水质受到重度污染, 水质状况为劣 V 类水质; 东半湖水水质为轻度污染, 水质状况为 IV 类水质^[2]。其中派河作为巢湖入湖河流之一, 其入湖水量虽不到巢湖入湖水量的 10%, 但总氮、总磷入湖负荷占巢湖入湖负荷的 15% 左右。为减轻巢湖西半湖富营养化问题, 削减入湖污染负荷, 在派河下游构建清水廊道, 保障入湖水水质十分必要; 另一方面, 为解决淮河水污染严重和水资源缺乏问题, “引江济淮”工程已动工, 派河作为调水通道, 其水质状况也与调水条件所要求的 III 类水质标准相差较大, 派河水污染治理非常迫切。光明大堰河作为派河一级支流, 处在派河下游地区, 其小流域范围内污染物削减、保障入湖水水质得到改善提升成为主要任务。

光明大堰河主要流经村庄、农田, 其流域内农村生活污水排放量大, 且每天污水排放不连续, 水量日变化系数大^[3],

但由于农村生活的特点及习惯, 加上没有集中设置污水处理设施, 未经处理随意排放的污水直接排入河流, 污水中有机物含量较高^[4], 造成河道污染。

农村生活污水排放分散、来源广泛、污水成分复杂、水质水量变化大且排放不成连续性的特点导致难以采取集中处理的方式。目前我国农村生活污水治理技术主要有生态稳定塘、土壤渗滤技术、生物滤池、厌氧沼气池处理技术、人工湿地处理技术^[5]。其中生物滤池技术利用生物膜对污水进行处理, 生物活性高, 加强对有机物的吸附和降解能力, 提高硝化能力, 出水水质好; 人工湿地处理技术是模拟天然湿地建造的, 由饱和基质、水生植物、动物、水体组成^[6], 其是一种生态工程技术, 对有机物净化效果、脱氮除磷效果均有优势, 被广泛应用。笔者以派河支流光明大堰河流域范围内产生的农村生活污水为研究对象, 综合考虑当地水质污染情况, 以湿地为核心处理技术, 设计了多介质膜生物反应器+复合人工湿地组合技术中试模型。通过现场调试中试试验装置, 监测中试试验装置进出水水质, 分析该中试试验装置系统对农村生活污水不同污染物的净化效果, 探讨和验证该系统工艺设计参数对于类似农村生活污水处理的适用性及工艺设计上的优缺点。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 光明大堰河位于安徽省合肥市肥西县南部, 是派河的一级支流, 在派河南岸。光明大堰河流域内沿

基金项目 国家“十三·五”水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07603-004)。

作者简介 刘璐(1988—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 研究方向: 环境保护。*通信作者, 助理研究员, 博士, 从事专业湖泊生态与环境工程研究。

收稿日期 2019-04-17

途主要以村庄、农田为主,总长约 11 km,小流域面积约 27.8 km²,约占派河流域面积的 4.7%。

1.2 研究区水质状况 由于光明大堰河下游缺乏常规历史监测数据,于 2016 年 11 和 12 月对肥西县光明大堰河进行现场调查,并沿河流方向自上游至下游设置 6 个断面进行水样采集,测试水质数据,监测考核水质指标包括 COD、NH₃-N 和 TP。

(1)COD 指标。从图 1 可以看出,光明大堰河下游水质相对较好,而上游的 1、2 号断面水质较差,2 号断面 COD 值达 130.9 mg/L,污染严重,通过现场调研,该断面上游有大量的养殖废水直接排入河道导致其污染严重。从图 1 可以看出,光明大堰河各监测断面 COD 指标均存在超标情况,不能达到 IV 类水标准。该地区养殖场较多,农村生活污水以及区内两岸农业面源混杂,污染物流入水体导致 COD 超标。

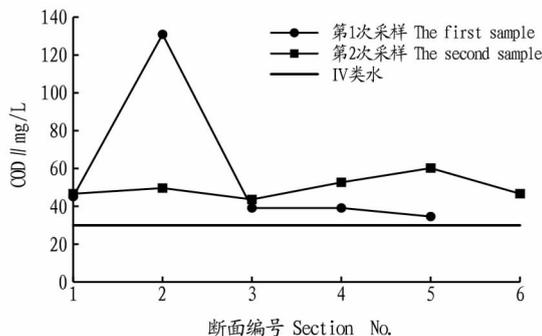


图 1 考核断面 COD 变化趋势

Fig. 1 The variation trend of COD in the section

(2)NH₃-N 指标。相较于 COD 指标,光明大堰河 NH₃-N 水质情况较为严峻,平均含量是地表水 IV 类的 2~6 倍,氨氮超标情况主要受径流区内农村生活污水直接排放入河道的影响,造成河道断面水质突然下降(图 2)。

(3)TP 指标。由图 3 可知,就 TP 指标而言总体不高,第一次采样中光明大堰河 1、3、4 号断面均达到地表 IV 类水质标准,5 号断面略超标;2 号断面 TP 含量达 1.38 mg/L。

通过对研究区目标水体水质监测及初步分析,光明大堰河主要超标因子是 NH₃-N、COD,该指标处于 V 类水质。尤其在 2 号断面,各指标水质超标严重,造成河道断面水质差的主要因素之一是流域内农村生活污水不经处理直接排入河道中。

1.3 中试试验装置 中试试验建设在安徽省肥西县上派镇

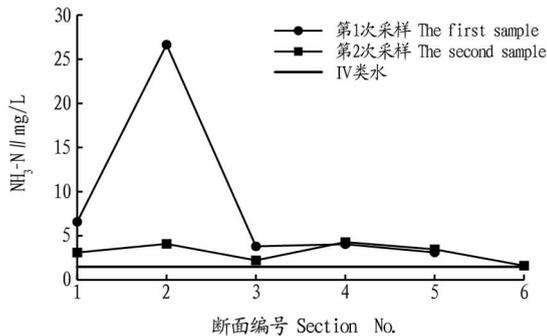


图 2 考核断面 NH₃-N 变化趋势

Fig. 2 The variation trend of NH₃-N in the section

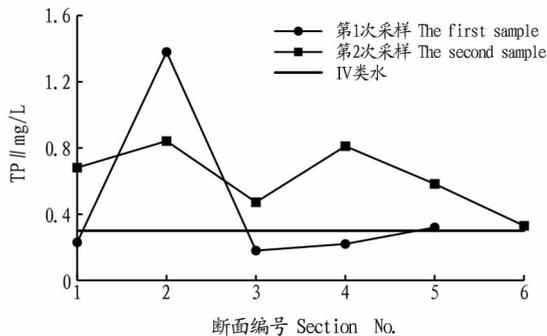


图 3 考核断面 TP 变化趋势

Fig. 3 The variation trend of TP in the section

污水处理厂内,设计处理量 7 m³/d。主要用于处理安徽省肥西县上派镇光明大堰河流域内农村生活污水。

中试试验设计为多介质膜生物反应单元(BA-MBR)+复合人工湿地组合技术。其中多介质膜生物反应单元为污水处理单元,分为曝气生物滤池(BAF)和膜生物反应器(MBR);复合人工湿地组合技术为湿地深度净化单元,由微曝气垂直潜流湿地、水平潜流湿地、生态氧化塘 3 个单元构成。

整套中试试验装置采用 3 个 φ500 mm 柱状装置、2 个矩形装置串联,底部封闭进水,方式均采用下进上出,满足自流。其中 3 个柱状装置底部设置进水孔和进气孔,进气孔内接曝气砂头,柱状装置外壁上每隔 200 mm 开一个水样采集孔。距底部 200 mm 处设置承托架,上方填充滤料或基质。曝气由一台空压机提供(Q=0.248 m³/min),以进气管连接底部进气孔。在进气管路上分别设置调节阀和流量计,以调控曝气量。主要处理工艺单元见表 1,其中 MBR 单元膜通量计 20 L/(m²·h),膜面积 16 m²。

表 1 中试试验主要工艺单元
Table 1 Main process units of pilot test

单元名称 Name of the unit	面积 Area m ²	有效容积 Effective volume/m ³	水深 Depth of water/m	HRT h	滤料 Filter material	气水比 Gas-water ratio	植物选择 Plant selection
BAF	0.2	0.48	2.4	0.43	火山石	3:1	—
MBR	0.2	0.36	1.8	1.37	中空纤维膜	15:1	—
微曝气垂直潜流湿地 Micro-aerated vertical un- dercurrent wetlands	0.2	0.064	0.8	0.22	砾石 15~20 mm	1:1	黄菖蒲
水平潜流湿地 Horizontal undercurrent wetlands	1.5	0.36	0.6	1.23	砾石 15~20 mm	—	旱伞草、鸢尾
生态氧化塘 Ecological oxidation pond	1.5	0.36	0.6	1.23	砾石 15~20 mm	—	菹草、苦草

主要工艺流程见图 4。

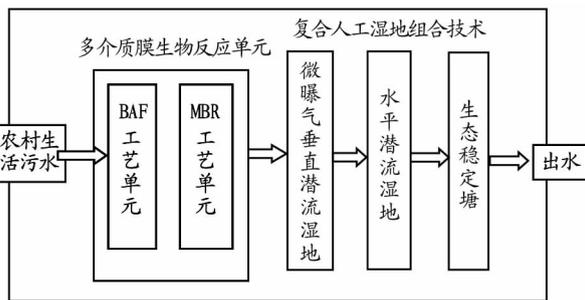


图 4 中试试验工艺流程

Fig. 4 Pilot test process flow

1.4 监测方法 中试试验装置于 2018 年 11 月建成,12 月调试完成。采取 24 h 不间断通水并进行观测;每天对水质进行监测,分析各工艺单元进出水水质。主要监测指标有 SS、

COD_{Cr} 、总氮(TN)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总磷(TP)等。

1.5 分析方法及仪器 采用电子天平、紫外可见分光光度计、电子恒温水浴锅、电热鼓风干燥箱等,对水中 SS、 COD_{Cr} 、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 等指标,依据《水和废水监测分析方法》(第四版)^[7]中的标准方法进行测定。

2 结果与分析

2.1 水质处理指标 根据《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016)地方标准中对巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值的要求, COD_{Cr} 不超过 50 mg/L,氨氮不超过 5(8)mg/L,总磷不超过 0.5 mg/L。该工艺出水要求 COD_{Cr} 、氨氮、总磷指标按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准IV类标准执行,其中对总氮不作要求(表 2)。

表 2 水质处理指标

Table 2 Water quality treatment indicators

项目 Item	COD_{Cr}	SS	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP	评价结果 Evaluation results
进水水质 Inlet water quality	58~250	16~328	3~35	12~62	0.6~3.0	二级
BAF 出水 Water outlet	<60	<20	<8(15)	<20	<1	一级 B
MBR 出水 MBR effluent	<50	<10	<5(8)	<10	<0.5	一级 A
湿地出水 Wetland effluent	<30	—	<1.5	<1.5	<0.3	准IV类

2.2 挂膜与启动 采用自然挂膜的方式,通过自然培养微生物从而在填料表面形成生物膜。自然挂膜不引入菌种、不向内投加营养物质,主要依靠进水中可生物降解的物质提供营养成分,自然挂膜时间较长。2018 年 12 月至 2019 年 1 月中旬为挂膜启动阶段。

2.3 中试试验运行效果 选取 SS、 COD_{Cr} 、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 5 项指标,比较该系统对污染物的去除率,结果见图 5~7。

由图 5 可知,进水中 SS 含量相对较低,在 20~100 mg/L,最高达 328 mg/L。在生态氧化塘的出水口处基本达 10 mg/L 以下,该中试试验对 SS 的去除率非常明显,通过该系统,基本可以削减该部分污染负荷,平均去除率达 90%。

整个系统 COD 的进水浓度波动较大,在 8~100 mg/L。出水 COD 浓度随进水浓度有所波动,有较明显的下降,随着挂膜的形成,平均去除率达 55%,出水水质基本达到了《地表水环境质量标准》准IV类标准。

由图 6 可知, $\text{NH}_3\text{-N}$ 进水浓度波动大,在 8~20 mg/L,出水浓度明显降低,整个系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果较稳定。随着系统连续运行,挂膜逐渐成熟,系统对于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果逐渐明显,平均去除率达 75%。TN 方面,除个别的监测浓度超过 20 mg/L,整个系统进水总氮浓度在 10~20 mg/L。相较于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的出水浓度,TN 出水浓度虽有下降但不明显,该系统对 TN 的去除率约 42%,这是由于该系统采取持续曝气,抑制了反硝化菌的增长,反硝化细菌的培养需要一定的时间,加上冬季气温低延长挂膜周期。TN 的去除效果还需等该工艺再运行一段时间才可以看出。

由图 7 可知,该系统进、出水口的 TP 浓度均不高,出水浓度随进水浓度波动。有个别出水中 TP 的浓度略高于进水浓度,由于整个中试试验装置尺寸较小,污水在装置中水力停留时间较短,整个系统对 TP 的作用时间不够,截留作用不明显。但湿地系统仍有一定的去除效果,去除率约 30%。

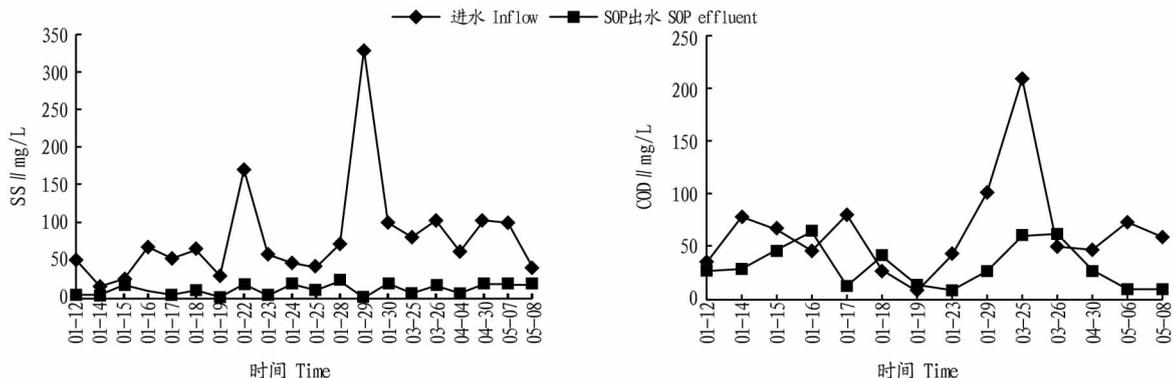


图 5 中试试验 SS、 COD_{Cr} 净化效果

Fig. 5 Purification effect of SS and COD_{Cr} in pilot test

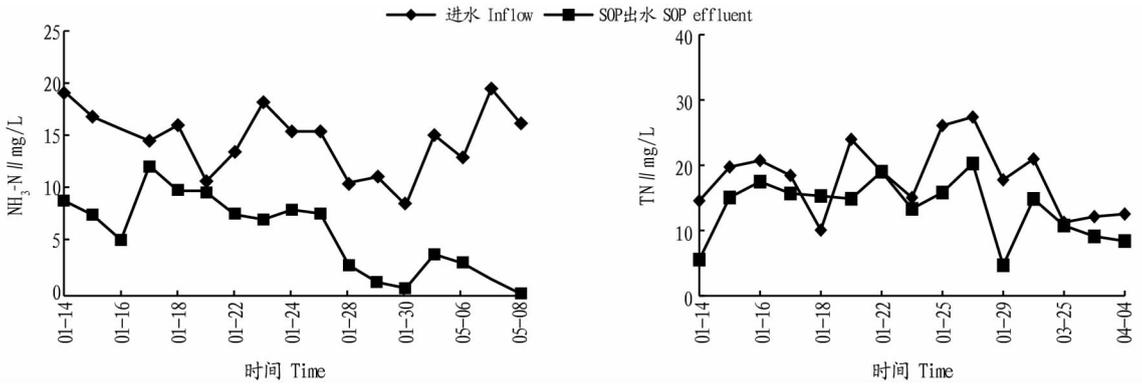
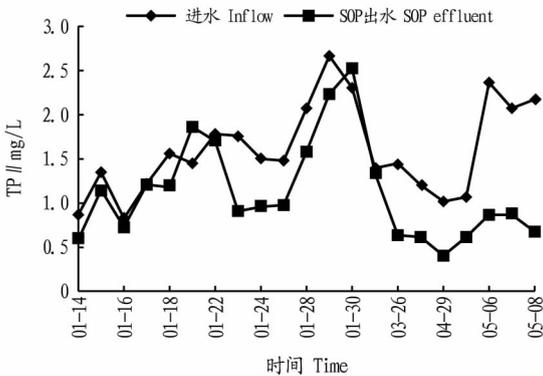
图6 中试试验 TN、NH₃-N 污染物净化效果Fig. 6 Purification effect of TN and NH₃-N pollutants in pilot test

图7 中试试验 TP 污染物净化效果

Fig. 7 Purification effect of TP pollutants in pilot test

2.4 中试试验装置净化机理分析

2.4.1 系统对 SS 去除。水流经过 BA-MBR 工艺单元,颗粒较大的杂质、垃圾在此区域沉淀,被拦截去除;颗粒较小的悬浮物质再通过后续复合人工湿地的生化、截留作用,浓度逐渐降低。

2.4.2 系统对 COD_{Cr} 去除。BA-MBR 工艺单元可以通过表面粗糙多孔的滤料吸附溶解性有机物,另一方面滤料也可物理截留固态有机物,对 COD_{Cr} 有一定去除效果^[8]。复合人工湿地系统通过基质截留、微生物降解、湿地植物固定等作用去除一定量的 COD_{Cr}。但系统运行一定时间后,物理作用逐渐减小,COD_{Cr} 主要通过微生物降解消耗去除,而系统在 BA-MBR 工艺单元及微曝气垂直潜流湿地均持续曝气,溶解氧含量高,抑制了反硝化菌的增殖,反硝化反应速率降低,消耗的 COD_{Cr} 含量减少,对 COD_{Cr} 去除效果不明显。

2.4.3 系统脱氮机理。BA-MBR 工艺单元主要起到截留大分子物质、生物净化等作用。在该工艺单元进行不间断曝气,溶解氧浓度高,为微生物的硝化作用提供了充足的好氧环境,NH₃-N 在该区域得到部分净化。后续复合人工湿地系统工艺单元按照微曝气垂直潜流湿地、水平潜流湿地、生态氧化塘布设,NH₃-N 进一步在复合人工湿地系统中净化,其可通过填料颗粒吸附、转化为气态 NH₃ 挥发、微生物的硝化作用转化为硝酸盐氮、湿地中植物摄取等方式去除。微曝气垂直潜流装置底部因安装有曝气盘,持续曝气,因此该部分虽然为水深部分,但溶解氧含量较高,微生物硝化作用明

显,NH₃-N 得到进一步去除。但由于该试验处于冬季,不论是微生物的培养还是植物的生长均受到影响,所以出水 NH₃-N 含量波动较大。

该系统对 TN 的去除效果并没有 NH₃-N 理想,这是由于系统进水中 TN 除包括氨氮外,还包括硝酸盐氮、有机氮及少量的亚硝酸盐氮。该系统挂膜启动正值冬季,气温水温均较低,微生物活性较差,且该系统采取自然挂膜方式,利用进水中自带的营养物质培养菌落,因此反硝化细菌培养周期延长;另一方面整个系统持续对 BA-MBR 工艺单元和微曝气垂直潜流湿地单元进行曝气,溶解氧量充足,而研究表明溶解氧浓度在 0.5 mg/L 以下,进行反硝化反应^[9],因而整个系统反硝化反应受到限制,对于硝酸盐氮的去除效果不理想,导致 TN 的去除效果较 NH₃-N 去除效果不明显。系统对于硝酸盐氮的去除主要发生在水平潜流湿地中,该区域污水在填料下渗流,厌氧环境下微生物进行反硝化作用,对于污水中的硝酸盐氮有一定的净化作用,将硝酸盐氮还原为氮气,从而达到脱氮的目的。

2.4.4 系统除磷机理。BA-MBR 工艺单元通过沉降、截留作用,对 TP 有一定截留,部分颗粒磷在此区域沉淀。后续复合人工湿地系统中通过植物吸收、微生物同化及基质吸附等作用对磷进行净化^[10]。通过磷元素去除机理可知,湿地系统中植物吸收作用较小,对磷的去除主要是湿地系统中基质吸附作用,尤其对可溶性磷酸盐的吸附。微曝气垂直潜流湿地因持续曝气,溶解氧含量充足,在好氧状态下,填料中的铁、铝可与磷形成难溶性复合物^[11-12]从而沉淀;另一方面微生物在好氧条件下,其活性也增强,对磷有一定的净化作用。水平潜流湿地和生态氧化塘装置设在整个系统末端,这 2 个工艺单元主要通过基质吸附作用可以吸收前端系统还尚未得到净化的部分磷,磷元素在此区域得到深度净化,从而达到除磷的目的。

系统对磷元素去除效果还受到水力停留时间的影响,该套试验装置由于部分工艺处理单元水力停留时间短,污水与滤料接触时间短,部分磷元素尚未完全与滤料接触便随着污水流出,从而导致系统对磷元素的物理截留作用有限,降低了对磷元素的去除效率。

2.5 效益分析 该系统拟在光明大堰河小流域范围内建设

农村分散式污水治理系统工程。以 100 人村落为例,每人每天产污水量 170 L,总占地面积约 100 m²,其中 BA-MBR 工艺单元占地 11 m²,微曝气垂直潜流湿地占地约 8.5 m²,水平潜流湿地占地约 11.6 m²,生态氧化塘占地约 20 m²。总投资约 20 万元。

该工程拟建与周围村镇类似的徽派建筑,与周边村镇景观相融合。湿地内部种植生物量大且兼具景观功能的湿地植物,如美人蕉、菖蒲、旱伞草、芦苇、睡莲等,工程周边可种植棕榈、榕树、柳树,将该污水处理工程打造成兼具污水处理功能、村民休憩等一体的村落小型生态湿地公园。

3 结论

针对巢湖入湖河流派河水水质恶化严重,拟在其下游支流光明大堰河流域范围内构建清水廊道工程改善河道水质及周边生态环境,该研究以光明大堰河小流域农村生活污水为研究对象,按照湿地为核心的处理工艺设计了多介质膜生物反应单元、微曝气垂直潜流湿地、水平潜流湿地、生态氧化塘处理技术模型。其中 BA-MBR 为污水处理段,有效拦截污染负荷;复合人工湿地系统为深度净化段,有效削减有机物、氮、磷含量,达到深度净化的目的。该系统通过多级曝气,内部形成兼氧环境,营造“好氧-厌氧”条件,同时提高硝化和反硝化作用速率。整套系统利用植物及其丛生物对农村生活污水中无机悬浮质和有机碎屑的强化沉降、吸附分解,以及对营养盐的吸收、利用等功能,去除污水中 SS、部分无机和有机氮、磷等各种营养盐,使污水经过一系列的生物净化后,水质得到显著改善。整个系统对于 SS 平均去除率达 90%;COD 的平均去除率达 55%;对氨氮、TN、TP 的平均去除率分别为 75%、42%、30%,均有较明显的净化效果。随着生物挂膜的逐步完成,整个系统脱氮除磷效果逐渐显现,出水水质基本达到设计要求。但该试验正值冬季,整个系统对 TN、TP 的净化作用受到气温、溶解氧量及水力停留时间的影响,还

需进一步优化工艺参数。

与传统污水处理工艺相比,该工艺处理负荷较灵活,可以彻底解决一般污水处理出水微污染问题,适用于农村生活污水。且该系统末端采用湿地净化技术,污水进入河道前经过构建的湿地缓冲区,不仅可以处理农村生活污水,有效拦截削减入河污染负荷,缓冲对水力和污染负荷的冲击,增强河道自净能力,还可以通过构建较强的湿地景观植物,提升生态系统,为野生动物提供栖息地,实现湿地生态修复,美化农村生态环境,对保护生态环境具有重要意义。该套工艺适合在农村地区小流域内进行推广,其可有效削减污染负荷且景观性强,易与周边环境、村镇相互融合,建设生态文明先行新农村。

参考文献

- [1] 谢三桃,朱青.巢湖“一湖一策”技术思路及实施途径[J].中国水利,2017(20):9-12.
- [2] 丁虹.巢湖 2005—2014 年湖体水质状况[J].水资源开发与管理,2016(3):57-59.
- [3] 信文书,许荣刚.农村生活污水处理现状及对策[J].建设科技,2017(22):94-95.
- [4] 吴霖.农村生活污水现状及处理技术研究[J].资源节约与环保,2015(11):80,90.
- [5] 王妮娜,郑立柱.农村生活污水处理技术[J].广州环境科学,2011,26(2):46-48.
- [6] 张列宇,王晓伟,席北斗,等.分散型农村生活污水处理技术研究[M].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [7] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [8] 季宏康.人工增氧型湿地污染物降解动力学模型构建与工程实践[D].苏州:苏州科技大学,2017.
- [9] 赵丽君,方芳,郭劲松,等.溶解氧对 SBR 脱氮性能与脱氮方式的影响[J].环境工程学报,2015,9(3):1148-1154.
- [10] 孙井梅,李阳,李志杰,等.垂直潜流人工湿地净化北方微污染水体试验研究[J].生态环境学报,2012,21(10):1711-1716.
- [11] REDDY K R, CONNER G A O, GALE P M. Phosphorus sorption capacities of wetland soils and stream sediments impacted by dairy effluent[J]. J Environ Qual, 1998, 27(2):438-447.
- [12] 刘璐,李继明,柯凡,等.高位湖滩湿地在农业面源污染河水中的应用[J].安徽农业科学,2018,46(19):83-87.
- [13] 吕佳佳,杨娇艳,廖卫芳,等.黑臭水形成的水质和环境条件研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2014,48(5):711-716.
- [14] 耿士锁.化学需氧量(COD)简易测定法及其应用情况[J].西南给排水,2005,27(1):39-41.
- [15] 曾凡亮,罗先桃.分光光度法测定水样的色度[J].工业水处理,2006,26(9):69-72,77.
- [16] 杨冰, PIGNATELLO J J, 曲东.利用固体类 Fenton 试剂降解五氯酚的探讨[J].农业环境科学学报,2015,34(10):1914-1920.
- [17] IMAI T. The influence of hair bleach on the ultrastructure of human hair with special reference to hair damage[J]. Okajimas folia anatomica japonica, 2011, 88(1):1-9.
- [18] ANGLESEY Z. Presidents of our world, and; Swede Carlson's house[J]. Minnesota review, 1982, 19(1):21-23.
- [19] CHOONG T S Y, CHUAH T G, ROBIAN Y, et al. Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water; An overview[J]. Desalination, 2007, 217(1/2/3):139-166.
- [20] RALAMBONDRAIN M, BELARBI E, VIRANAICKEN W, et al. In vitro comparison of three common essential oils mosquito repellents as inhibitors of the Ross River virus[J]. PLoS One, 2018, 13(5):1-18.

(上接第 70 页)

- [2] 于玉彬,黄勇.城市河流黑臭原因及机理的研究进展[J].环境科技,2010,23(S2):111-114.
- [3] 王旭,王永刚,孙长虹,等.城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J].应用生态学报,2016,27(4):1331-1340.
- [4] 裘骅勇,孙毓.海岛城市防洪与河道整治规划工作探讨[J].浙江水利科技,2001(S1):124-125.
- [5] 赵越,姚瑞华,徐敏,等.我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨[J].环境保护,2015,43(13):27-29.
- [6] 林培.《城市黑臭水体整治工作指南》解读[J].建设科技,2015(18):14-15,21.
- [7] ROSAL R, RODRÍGUEZ R, PERDIGÓN-MELÓN J A, et al. Oxidation of dissolved organic matter in the effluent of a sewage treatment plant using ozone combined with hydrogen peroxide (O₃/H₂O₂) [J]. Chemical engineering journal, 2009, 149(1):311-318.
- [8] MIZUNO T, TSUNO H, YAMADA H, et al. Removal characteristics of organic pollutants in sewage treatment by a pre-coagulation, ozonation and ozone/hydrogen peroxide process[J]. Ozone science & engineering, 2008, 30(4):263-274.