

无动力级联生物滤池对山区村镇生活污水的净化效果

韩 阳^{1,2,3},董志新^{1,2},肖乾颖^{1,2,3},陆传豪^{1,2,3},胡 磊^{1,2,3},朱 波^{1,2*},汪 涛^{1,2} (1.中国科学院成都山地灾害与环境研究所,四川 成都 610041; 2.中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室,四川 成都 610041; 3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 依据低山丘陵地形,结合生态净化原理,构建一套无动力级联生物滤池系统,通过整年连续监测,研究了四川盆地低山丘陵区村镇分散生活污水的排放与级联生物滤池的净化效率及其影响因素。结果表明,村镇生活排放污水中化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、总磷(TP)的平均浓度分别为 147.33, 32.52, 14.39, 3.03mg/L;级联生物滤池对 COD、TN、TP 的平均削减率分别为 59.6%, 60.8%, 67.4%, 其中级联式生物滤池单元是削减污染物的核心,削减率分别为 39.1%, 44.1%, 54.1%;级联生物滤池对氮磷的削减率呈夏季(秋季)>春季>冬季的季节特点。级联生物滤池的净化效果主要受污染物进水浓度、温度、生物量、水力负荷(HL)等影响。因此,后期可通过耐低温植物补植、雨污分流等强化措施,进一步优化削减效果,提升系统的普适性。

关键词: 生态净化; 农村; 生活污水; 氮磷去除; 削减率

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)05-2232-08

Purification effect of non-dynamic cascading bio-filter on domestic sewage in a mountainous village. HAN Yang^{1,2,3}, DONG Zhi-xin^{1,2}, XIAO Qian-ying^{1,2,3}, LU Chuan-hao^{1,2,3}, HU Lei^{1,2,3}, ZHU Bo^{1,2*}, WANG Tao^{1,2} (1.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2.Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *China Environmental Science*, 2021,41(5): 2232~2239

Abstract: The present study investigated the performances of a set of non-power cascade bio-filter system constructed based on the low mountains and hills terrain on rural sewage. A continuous one-year monitoring of the performances of this system had been carried out in the typical rural village in low mountainous areas of the Sichuan Basin. The results showed that the average concentrations of chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) and total phosphorus (TP) in the rural domestic sewage were 147.33, 32.52, 14.39 and 3.03mg/L, respectively. The average removal efficiencies of COD, TN and TP in the cascading bio-filter were 59.6%, 60.8% and 67.4%, with the multi-stage bio-filter units being 39.1%, 44.1% and 54.1%, respectively. The seasonal reduction rates of TN and TP were in the order of summer (autumn) > spring > winter. Influent concentrations, air temperature, plant biomass and hydraulic loading (HL) were regulators of the purification efficiency. Thus, the low-temperature-resistant plants and rain-sewage separation in the later stage to optimize purifying efficiency and improve the general applicability were recommended to improve domestic sewage purification to protect water environment in mountainous villages of the upper reaches of the Yangtze River.

Key words: ecological purification; rural area; domestic sewage; nitrogen and phosphorus removal; removal efficiencies

近年来,过量氮磷输入导致江河或湖泊富营养化已成为主要环境问题之一。根据《第一次全国污染源调查公报》^[1]、《第三次全国农业普查》^[2]数据,我国农村地区每年产生超过 $9 \times 10^9 \text{t}$ 废水,其中仅有 17.4% 的村镇生活污水得到了集中或部分集中净化,而中西部地区仅为 12.1%。由于缺乏污水净化设施,大部分农村生活污水未经净化直接排入附近水域,加剧了地表水体的富营养化和水质恶化^[3]。因此,选择适合农村的生活污水净化措施与工艺已成为十分迫切的问题。

迄今为止,已有生态工程措施应用于农村生活

污水净化^[4~5],如生态沟渠、人工湿地等生态净化技术^[5]。但这些措施在净化农村生活污水过程中仍存在大量不足,如出水水质波动大,易受温度、湿地植物种类和污染物浓度等^[6]的影响;下渗湿地的堵塞;沉积物、过滤材料和腐烂植物的二次污染等问题突出,导致生态净化方法的推广应用困难^[7]。此外,生态净化方法尽管在污染物削减和经济成本方面优

收稿日期: 2020-10-12

基金项目: 四川省环境治理与生态保护重大科技专项(2018SZDZX0025);四川省科技计划项目(21DYF3176)

* 责任作者, 研究员, bzhu@imde.ac.cn

污水处理厂,但对土地需求较高,特别是在可利用土地较少的山区受到限制^[8].因此,如何在经济低廉且减少土地需求的前提下,通过生态工程的方法净化山区村镇生活污水是一个巨大的挑战.

生物滤池作为污水净化工程中应用最早且最广泛的工艺之一^[9],其主要依靠自然水体的自净机制,如曝氧、植物吸收、硝化和反硝化、沉淀、吸附、挥发等^[10],具有工程控制性强、耐冲击负荷、成本低廉、环境友好等优点^[11].但在应用于山区村镇生活污水净化方面仍存在不足,一方面,在低碳氮比(C/N)和低溶解氧(DO)浓度下,大多数植物不容易长时间存活^[12-13];另一方面,流速不稳定,生物滤池的净化能力有限^[14].因此,为解决山区村镇生活污水净化问题,利用和改造生物滤池以适用于山区村镇变得十分迫切.

本研究选择长江上游一个典型山区村镇作为试验示范点,建设一套由沉降沟渠、滞留池、跌落曝氧、多级生物过滤无缝链接的级联生物滤池系统.利用水质监测结果,评估该系统对山区村镇生活污水的净化性能及其影响因素,为山区村镇生活污水生态净化工程的建设提供技术支撑.

1 研究方法

1.1 研究区概况

依托位于四川盆地中部的盐亭县林山乡的中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(105°27'24"E, 31°16'31"N)开展研究.研究区域属中亚热带湿润性季风气候,年平均气温 17.3℃,年均降雨量 836mm, 大多数降雨发生在 6~9 月^[15].林山乡村镇面积约 2.32hm²,常驻人口约 800 人,村民以外出务工为主要收入来源;村镇餐馆、茶坊、商铺分布较多,每隔 2~3d 有大规模的农村集市活动,人流可达 3000 人左右,集市散场后街道未清扫.每天产生约 20~150m³的生活污水,直接排入居民点附近的排水沟渠.

1.2 无动力级联生物滤池工艺设计

村镇生活污水由每户居民下水管道排入村镇公路两旁的自然排水沟渠(雨、污未分流),因此在排水沟末端地势低洼处建设汇流沟,利用地势自流汇入测量池(2m×2m×2m),污水排量设置薄壁三角堰(90°)测定^[16],测量池污水自流进入前置沉淀单元

(U1),沉淀单元沟底铺设秸秆以增加 C/N,并同时沉降颗粒态污染物;后置一滞留池(4.5m×1.5m×1.5m),以稳定进入级联生物滤池的污水,随后污水进入三级级联式生物滤池单元(U2).级联生物滤池依托山丘区高程差建设,并由两栖植物反应滤池(1.5m×1.5m×1.5m)和同尺寸的水生生物反应滤池从高到低交替衔接,并利用高程差设置自流跌落通道,形成水陆两栖植物配置与干湿交替的氧化-还原环境.两栖植物反应滤池中设置卵石床,筛选根系发达、喜湿、抗污染、耐修剪且寿命长的小型乔木移植于卵石床生根,并培育成蜂窝网状结构,增加生物膜附着面积,同时卵石床周围移植乡土高富集氮磷水生植物.各级滤池底部均铺垫碎石、紫色泥岩及活性炭,厚度 20cm.系统池体由钢筋混凝土构筑,依地势在坡脚建设,避免挤占耕地,建设成本约 6000 元/m²,处理该村镇污水需 60m²,建设成本远低于普通生活污水处理厂.无动力级联生物滤池结构与工艺如图 1 所示.

1.3 系统维护与管理

系统启动,管理维护也随之而行.每周清理测量池、沉淀单元中悬浮固体废物;每 3 个月从沉淀单元和滞留池中清除累积沉淀物并更换秸秆;每年秋天对生物滤池的介质材料进行更新.同时,系统植物定期进行养护.例如,每年修剪 1 次生物滤池中的小乔木,以保持下部水生植物光照;每季收割水生植物预防腐烂造成二次污染.及时疏浚清除系统内多余淤泥及杂草,以避免堵塞.

1.4 采样与分析

沿级联生物滤池各单元共设置 6 个污水净化采样点 S1~S6(图 1),采样日期为 2019 年 7 月~2020 年 6 月,采样时间间隔为 5d.采样时使用便携式多参数水质分析仪测量采样点污水的物理化学参数,包括 pH 值、温度(*T*)等.

水样采集后立即送回实验室分析,使用流动分析仪测定滤液硝酸盐氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、正磷酸盐(PO_4^{3-} -P);采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法和重铬酸盐法测定原始水样中总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)浓度^[17];过滤 0.45μm 样品的总溶解态氮(TDN)和总溶解态磷(TDP)的测定方法同 TN、TP.使用 TN、TP 与 TDN、TDP 的差值计算颗粒态氮(PN)、颗粒态磷(PP)浓度.

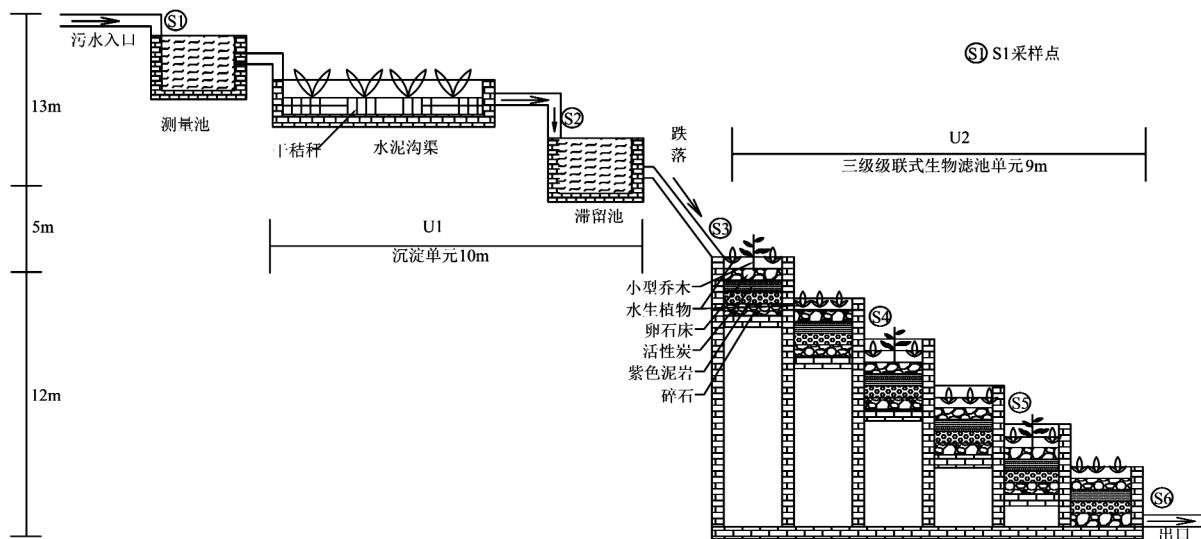


图 1 无动力级联生物滤池系统示意

Fig.1 The schematic diagram of the non-dynamic cascading bio-filter system

1.5 数据处理与统计分析

使用公式(1)计算污染物的削减率^[18].

$$E = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100\% \quad (1)$$

使用公式(2)计算污染物的削减负荷.

$$R_A = (C_{in} - C_{out}) / A \times Q \quad (2)$$

式中: E 为污染物削减率, %; C_{in} 和 C_{out} 分别为级联生物滤池中污染物的流入浓度和流出浓度, mg/L; Q 为进水流量, m^3/d ; A 为系统面积, m^2 ; R_A 为削减负荷, g/($m^2 \cdot d$).

采用 Canoco 5.0 进行冗余分析, SPSS 21 软件进行方差及相关分析, 使用显著水平为 0.05 表示不同时空污染物浓度之间差异显著, 并采用 Origin 9.0、AutoCAD 2014 作图.

2 结果与分析

2.1 山区村镇分散生活污水的水质特性

通过 1a 的连续监测, 获得了典型山区村镇排放的生活污水基本理化特性(表 1). 结果发现, 研究区日排污流量为 20~228 m^3/d ; pH 值在 7.14~8.69 之间; DO 范围为 0.16~5.85 mg/L; COD 范围为 53.73~513.60 mg/L. 可见, 山区村镇生活污水的排放流量、污染物浓度均波动较大, 极不稳定.

山区村镇生活污水的氮磷形态及浓度监测表明, TN、PN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的平均浓度分别为 32.52, 10.62, 1.73 和 14.39 mg/L, 生活污水氮素污染物主要以 NH₄⁺-N 形态存在; C/N 平均值仅为 4.53,

表明该村镇排放的污水是典型的低 C/N 污水, 不利于污水中氮的削减. 生活污水中 TP、PP 和 PO₄³⁻-P 的平均浓度分别为 3.03, 1.17 和 1.86 mg/L, PO₄³⁻-P 是生活污水主要磷形态. 村镇生活污水中 TN、NH₄⁺-N、TP 分别超过(GB3838-2002)^[19] V 类水所规定浓度的 15.30、6.20、6.60 倍.

表 1 村镇生活污水的理化特性及其污染物浓度

Table 1 Physicochemical characteristics and pollutants concentrations of domestic sewage in the village

指标	均值±标准偏差	极小值	极大值	标准 ^a	标准 ^b
pH 值	7.73±0.35	7.14	8.69	6~9	6~9
DO(mg/L)	2.84±2.14	0.16	5.85	-	2
流量(m^3/d)	65±63	20	228	-	-
COD(mg/L)	147.33±123.01	53.73	513.60	50	40
TN(mg/L)	32.52±25.40	5.28	95.59	15	2
PN(mg/L)	10.62±7.94	0.48	34.26	-	-
NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	1.73±1.52	0.04	3.80	-	-
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	14.39±9.21	2.38	28.30	5	2
TP(mg/L)	3.03±2.09	0.63	16.55	0.5	0.4
PP(mg/L)	1.17±1.03	0.07	7.12	-	-
PO ₄ ³⁻ -P(mg/L)	1.86±1.09	0.20	5.00	-	-

注:- 为标准无规定;a 为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)^[20]—一级 A 标准;b 为《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[19] V 类水标准.

2.2 级联生物滤池的不同单元对污染物削减

级联生物滤池对污染物的削减率列入表 2. 在监测期间, 系统对 COD 平均削减负荷、削减率分别为 49.27 g/($m^2 \cdot d$), 59.6%; 对 TN、PN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N

的平均削减负荷为 5.39, 1.96, 0.38, 2.99g/(m²·d), 平均削减率分别为 60.8%, 91.0%, 74.3%, 66.0%; 对 TP、PP、PO₄³⁻-P 的平均削减负荷分别为 1.24, 0.57,

0.74g/(m²·d), 平均削减率分别为 67.4%, 88.8%, 63.4%。经系统削减后全年出水水质平均可达到 (GB18918-2002)^[20]—一级 B 标准。

表 2 不同净化单元对污染物的削减率、削减负荷

Table 2 Average pollutants removal efficiencies and removal loads of different pilot units

指标	削减率(%)			削减负荷[g/(m ² ·d)]		
	U1	U2	总计	U1	U2	总计
COD	20.5±14.7	39.1±14.2	59.6±19.8	12.77±6.49	33.91±7.98	49.27±18.36
TN	16.7±13.3	44.1±22.4	60.8±26.0	1.12±0.22	4.27±1.54	5.39±1.77
PN	60.2±27.8	31.0±12.5	91.0±41.8	1.06±0.16	0.91±0.53	1.96±0.93
NO ₃ ⁻ -N	10.3±3.0	63.9±26.3	74.3±25.6	0.16±0.06	0.21±0.14	0.38±0.14
NH ₄ ⁺ -N	10.8±7.7	55.3±23.2	66.0±32.1	0.07±0.08	2.77±0.55	2.99±1.27
TP	13.3±10.8	54.1±21.1	67.4±31.6	0.42±0.06	0.81±0.22	1.24±0.16
PP	56.3±29.1	32.5±15.7	88.8±33.7	0.35±0.05	0.22±0.13	0.57±0.13
PO ₄ ³⁻ -P	12.5±5.3	52.9±22.0	63.4±29.8	0.13±0.05	0.65±0.20	0.74±0.24

其中沉淀单元对 PN、PP 的削减贡献最大, 削减率达 60.2%, 56.3%; 三级级联式生物滤池单元对 COD、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 的削减效果最好, 削减率可高达 39.1%, 63.9%, 55.3%, 52.9%。可以看出, 无动力级联生物滤池不同净化单元对污染物均有很好的削减效果, 但对不同污染物的削减率差异较大($P<0.05$)。

同时, 级联生物滤池各净化单元逐步提高了污水 DO 的含量, S1 进口 DO 含量为 2.84mg/L, 经沉淀单元后 DO 含量增加 0.82mg/L, 经多级生物滤池单元跌落曝气后 DO 含量增加 2.83mg/L。这说明村镇生活污水在进入多级生物滤池单元后, 自然跌落可以有效地提高污水中 DO 浓度(图 2)。

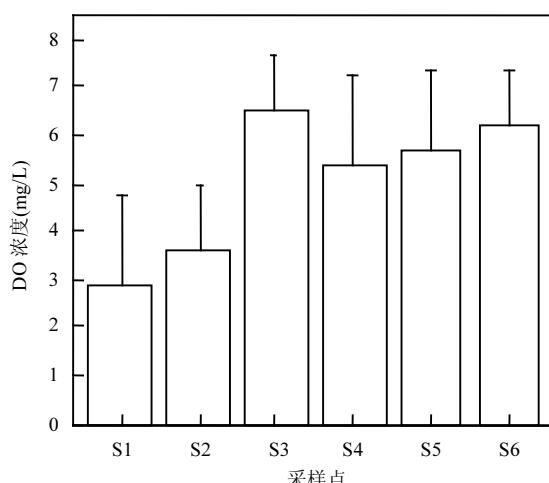


图 2 不同采样点 DO 浓度

Fig.2 Dissolved oxygen concentrations at the different sampling points

2.3 级联生物滤池对污染物削减的季节特征

如图 3 所示, 系统对 NH₄⁺-N 的削减率在夏季最高, 为 89.7%; 对 PN、PP 及 PO₄³⁻-P 的削减率在秋季最高, 分别为 86.4%、93.6%、65.0%。系统夏季对 TN 的削减率为 73.5%, 春季、秋季和冬季分别比夏季低 28.8%、4.3% 和 41.2%, 且随气温、生物量的增长呈现较好的一致性; 秋季对 TP 的削减率为 68.7%, 春季、夏季和冬季分别比秋季低 23.1%、11.4% 和 30.1%; 对 TN 和 TP 的削减率均在冬季最低, 分别为 32.3%、38.0%, 且各季节间差异显著($P<0.05$)。

2.4 水力条件对污染物削减的影响

村镇生活污水日排放量受集镇活动及降雨的影响, 出现较大浮动。据实际运行条件, 将系统进水划分为 4 级不同水力负荷条件。不同水力条件下系统对污染物削减率如图 4 所示。系统在 HL1 条件下对 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 削减率最高, 分别为 73.3%, 81.5%, 82.5%; 在 HL4 条件下削减率最低, 分别为 43.1%、65.4%、46.3%。系统对 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的削减率与水力负荷均呈现显著负相关关系, Pearson 相关系数分别为 -0.82, -0.94 和 -0.84($P<0.05$)。在 HL4 条件下, 系统对 TP、PP、PO₄³⁻-P 的削减率最低, 分别为 47.7%, 59.2%, 44.4%。然而, 在水力负荷低于 HL4 条件下, HL1、HL2 和 HL3 三种水力负荷对 TP、PO₄³⁻-P 的削减差异不显著。仅对 PP 的削减率与水力负荷呈现显著负相关关系($R^2=0.83$, $P<0.05$)。

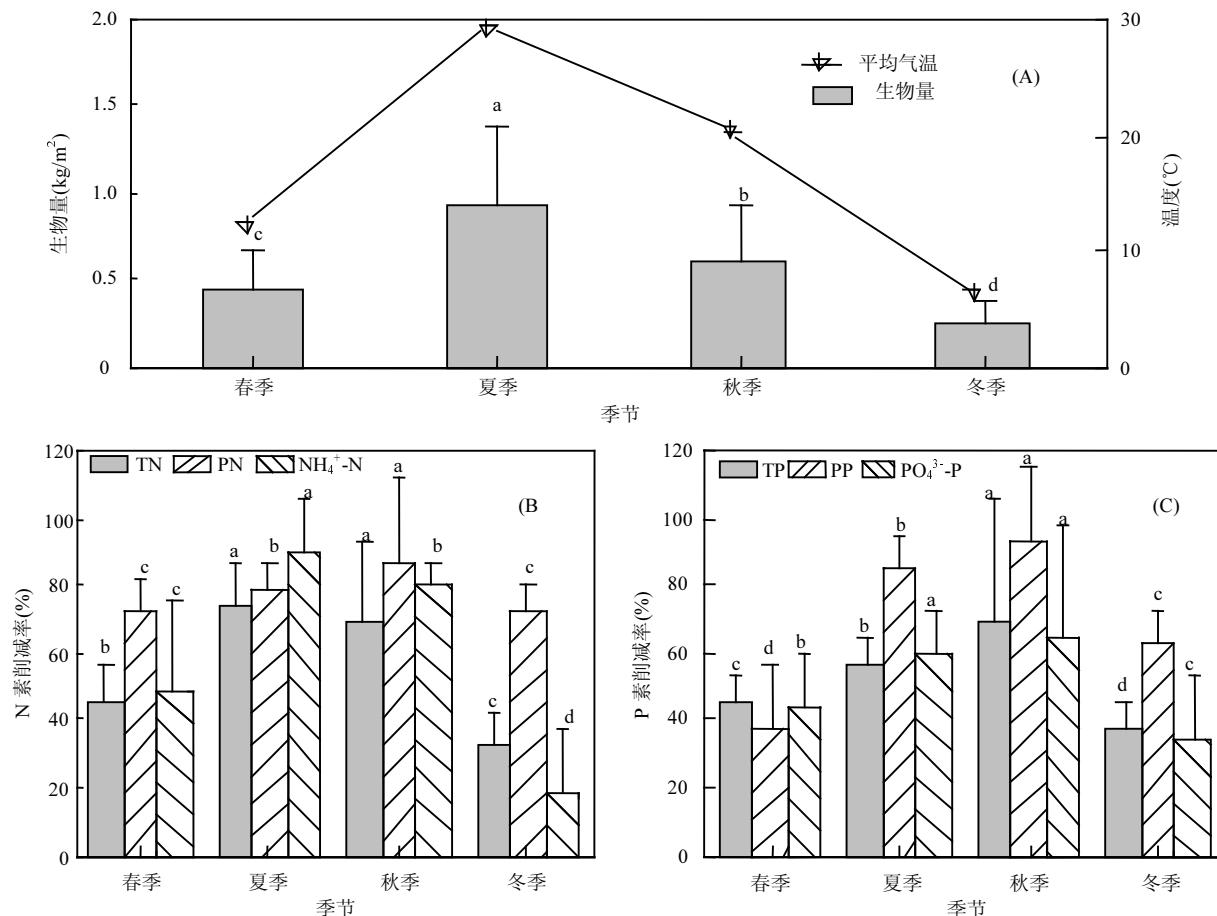


图3 系统生物量及对污染物削减率的季节特征

Fig.3 Seasonal characteristics of biomass and pollutants removal efficiencies of the system

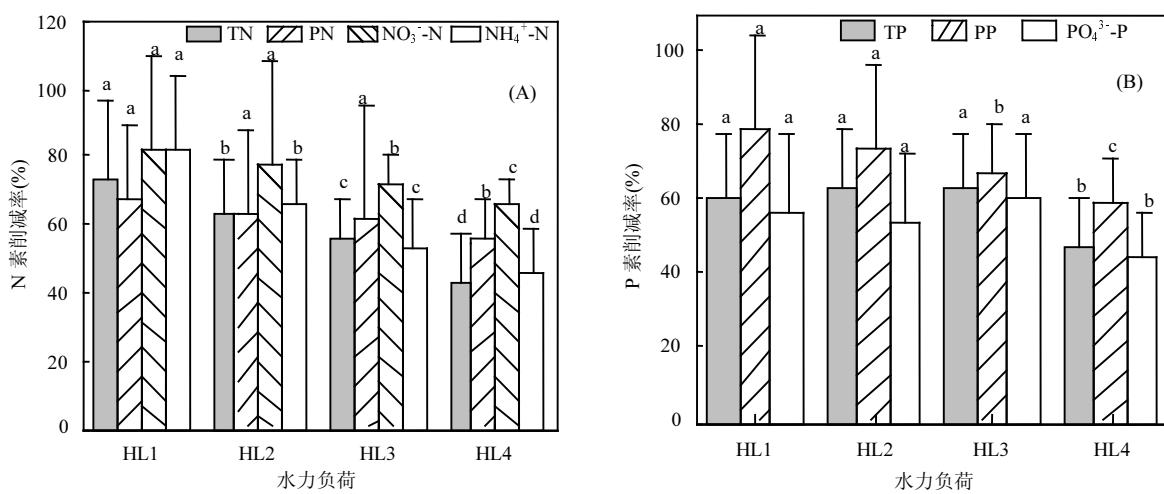
不同小写字母表示不同季节间生物量、污染物消减率差异达显著水平($P < 0.05$)

图4 不同水力负荷氮磷的削减率

Fig.4 Removal efficiencies of nitrogen and phosphorus under different hydraulic loads

不同水力负荷条件 HL1<50 m^3/d ; HL2:50~100 m^3/d ; HL3:100~150 m^3/d ; HL4>150 m^3/d , 不同小写字母表示不同水力负荷条件下污染物消减率差异达显著水平($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 级联生物滤池净化效率的主要影响因素

通过冗余分析可知(图 5),污水进水浓度等理化特性及温度、HL 等运行条件解释了级联生物滤池出水水质总变化的 70.2%.COD、TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、

TP 的出水浓度与级联生物滤池的该污染物的进水浓度呈正比,且相关性最大;与温度、生物量、HL、进水 NO_3^- -N 浓度、N:P 呈反比,且与污染物出水浓度的相关性为:温度> NO_3^- -N 浓度>HL>N:P>生物量.

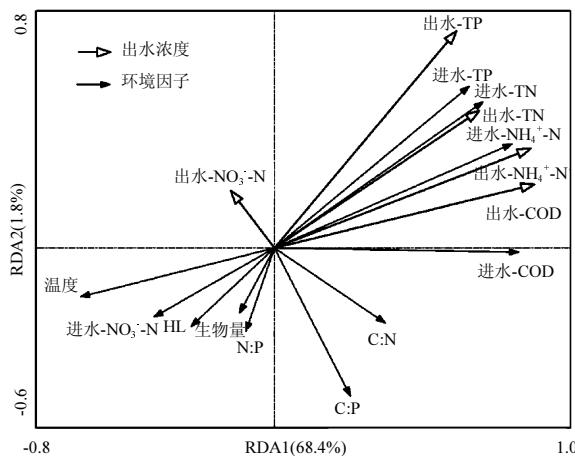


图 5 出水水质与环境因子相互关系的冗余分析排序

Fig.5 Redundancy analysis(RDA) sequence diagram of the relationship between effluent water quality and environmental factors

季节间系统对污染物的削减差异主要体现在温度的显著变化.研究表明,在气温高于 8℃,系统出水水质可达(GB18918-2002)^[20]一级 B 标准;低于 8℃,系统出水水质未能达标排放(图 6).一方面,温度对系统中硝化、反硝化细菌的活性有影响^[21],从而影响系统的硝化-反硝化能力;硝化细菌与反硝化细菌最适温度为 25~30℃^[14],这与当地夏季的温度相似,有利的温度条件提高了系统硝化-反硝化能力;另一方面,温度亦影响着系统高富集氮磷水生植物的生长,进而影响植物对氮磷的吸收^[22].因此,在气温较高的夏季,适宜的温度为微生物氧化还原作用及植物吸收利用提供了有利条件,从而使级联生物滤池达到较好的脱氮效果.

另外,HL 对级联生物滤池出水也有较大影响.在较低水力负荷(HL<50m³/d)时,系统对氮磷的削减率较高,分别为 73%、60%.在有植被覆盖的净化系统中,较低的 HL 有利于氮素与空气的接触,利于硝化反应以提高对氮的削减^[23].此外,较低的 HL 有效增加了污水滞留时间,利于系统对颗粒态污染物的沉降截留^[24],这也提高了系统对磷的截留能力.在本研

究中,当 HL<100m³/d 时,系统有利于氮素与空气、植物根系的接触,促进系统植物对氮素的吸收、沉降截留及硝化作用,使得出水水质达标排放;当 100m³/d<HL<150m³/d 时,系统出水主要受集镇活动增加排污的影响而未能达标排放;HL>150m³/d 时,出水水质因主要受降雨稀释影响而达标排放.因此,系统出水达标排放的最大 HL 为 100m³/d,这普遍适用于山区村镇生活污水的净化.

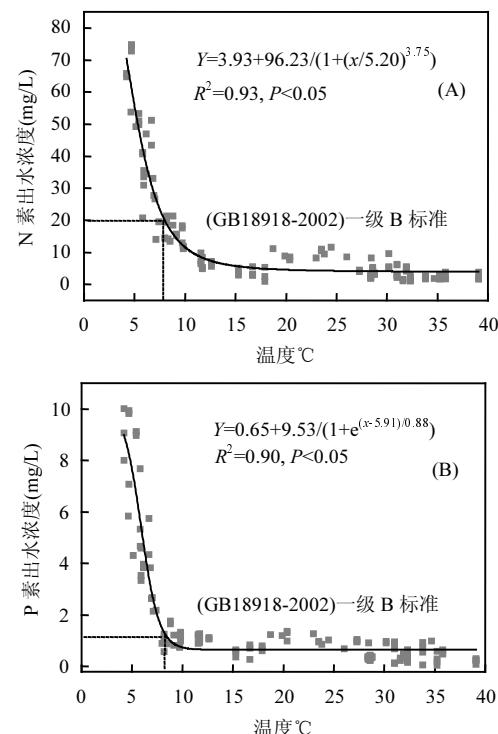


图 6 不同气温条件下系统的出水水质

Fig.6 The effluent quality of the system under different air temperature conditions

除温度和 HL 对污染物削减的影响以外,还有很多因素也可能影响级联生物滤池削减污染物的效率,包括植物种类、基质材料、后期维护等^[23-25].植物在级联生物滤池中发挥着重要作用,不仅直接吸收氮磷等污染物,而且可通过根系分泌物等改变水体中的污染物浓度、DO、pH 值及有机碳等^[26].基质材料,如黏土和生物炭等^[18],根据材料的吸附能力,除磷效率也不同^[27].

3.2 级联生物滤池的系统优化与效益分析

尽管级联生物滤池对氮磷的削减已表现出较好的潜力,但仍需加强管理,解决在低温和雨污混杂等条件下系统面临削减率降低的问题.例如,及时清

淤疏浚、更新介质、收割植物等措施均保证了系统的长期可持续运行。为保证生物滤池低温正常运行,必须引入能适应低温生长的植物以弥补低温条件下削减率较差的缺陷^[14]。伊乐藻、微齿眼子菜、菹草、竹叶眼子菜等^[28]冬季生长旺盛,可以满足级联生物滤池冬季对氮磷污染物的高效削减。同时,应合理利用山区自然沟渠,改造或实行雨污分流等^[29]组合调控措施,亦可进一步提高级联生物滤池对村镇生活污水的净化能力。

我国现阶段污水处理设施的建设运行是基于政府财政支持,但由于运行和维护成本较高,农村地区污水处理设施较难维持长期的运行管理^[30]。因而,农村地区污水处理设施的建设运行成本是影响推广的一个重要因素。据四川省相关规定,生活污水在直接排放的情况下,排污业主需缴纳污染税2.8元/t^[31]。无动力级联生物滤池系统的建设成本约36万元,维护运行成本约为0.08元/t,远低于其他生态净化系统^[32]。同时,处理后的污水用于农田灌溉亦可实现部分环境效益。虽然该效益是中水回用取代自来水成本计算的间接效益,但长期运行的效益远高于缴纳污染税。可见,该研究验证了级联生物滤池系统作为一种无动力、立体化的生态净化技术在长江上游山区农村应用的有效性,为从根本上解决长江上游农村分散式生活污水提供了一定的技术支撑。

4 结论

4.1 山区村镇排水雨污混杂,其流量、浓度极不稳定,且受村镇人口流动和降雨特性的影响。污水中COD、TN、NH₄⁺-N、TP均远超(GB3838-2002)V类水标准,且以NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P为主。无动力级联生物滤池对山区村镇生活污水COD、TN、TP的平均削减率分别为59.6%、60.8%、67.4%;经系统削减后全年出水平均可达标排放。

4.2 无动力级联生物滤池有效削减村镇生活污水氮磷污染主要受污染物进水浓度、温度、生物量、HL等影响,温度>8℃或HL<100m³/d时,系统出水质可达标排放。无动力级联生物滤池作为一种较完善的农村分散式生活污水处理技术,可在类似地区以较低成本构建并运行,对于长江上游地区乃至我国山区农村生活污水的治理都具有一定的推广

价值。

参考文献:

- [1] 国家统计局.第一次全国污染源普查公报 [R]. 北京:国家统计局, 2010.
- [2] National Bureau of Statistics. Communique of the first national census of pollution sources [R]. Beijing:National Bureau of Statistics, 2010.
- [3] Hu Z, Liu J, Zheng W, et al. Highly efficient nitrogen removal from domestic wastewater based on enriched aerobic/anoxic biological filters and functional microbial community characteristics [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,238(20):867-868.
- [4] Anderson J C, Joudan S, Shoichet E, et al. Reducing nutrients, organic micropollutants, antibiotic resistance, and toxicity in rural wastewater effluent with subsurface filtration treatment technology [J]. Ecological Engineering, 2015,84(8):375-385.
- [5] 聂新军,孙燕萍,钟亮,等.复合介质生物滤器处理农家乐污水 [J]. 生态与农村环境学报, 2016,32(3):507-511.
- [6] Nie X J, Sun Y P, Zhong L, et al. Effect of composite-medium bio-filter treating wastewater "Farm Household Tourism" [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016,32(3):507-511.
- [7] Lucke T, Nichols P W B. The pollution removal and stormwater reduction performance of street-side bioretention basins after ten years in operation [J]. Science of the Total Environment, 2015,536(12):784-792.
- [8] Jia H, Yao H, Tang Y, et al. Lid-bmps planning for urban runoff control and the case study in china [J]. Journal of Environmental Management, 2015,149(10):65-76.
- [9] Wu H, Zhang J, Ngo H H, et al. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation [J]. Bioresource Technology, 2015,175(10):594-601.
- [10] 布库鲁,杨健.高负荷生物滤池处理城市污水研究进展 [J]. 环境工程, 2004,22(1):22-25.
- [11] Bu L K, Yang J. Progress in research on treating urban sewage by high rate biofilter [J]. Environment Engineering, 2004,22(1):22-25.
- [12] Vymazal J, Brezinova T D. Removal of nutrients, organics and suspended solids in vegetated agricultural drainage ditch [J]. Ecological Engineering, 2018,118(4):97-103.
- [13] Wu Y, Dai H, Wu J. Comparative study on influences of bank slope ecological revetments on water quality purification pretreating low-polluted waters [J]. Water, 2017,9(9):636-648.
- [14] Tao M, He F, Hu H, et al. Synergistic and antagonistic effect of treatment performance of constructed wetlands under artificial aeration and external carbon source [J]. China Environmental Science, 2015,35(12):3646-3652.
- [15] 高玉珊,王焕华,许仕荣,等.复合垂直流人工湿地对有机磷阻燃剂的净化 [J]. 中国环境科学, 2020,40(7):3003-3009.

- Gao Y S, Wang H H, Xu S R, et al. Study on purification of organophosphorus flame retardants by integrated vertical-flow constructed wetlands [J]. China Environmental Science, 2020,40(7): 3003–3009.
- [14] Kumwimba M N, Meng F, Iseyemi O, et al. Removal of non-point source pollutants from domestic sewage and agricultural runoff by vegetated drainage ditches (vdds): Design, mechanism, management strategies, and future directions [J]. Science of the Total Environment, 2018,639(5):742–759.
- [15] Wang Z, Yao S, Cheng M, et al. Purification of small-scale stagnant water in urban regions: Human-powered water lift and bank-based constructed wetland [J]. Ecological Engineering, 2015,83(6):108–111.
- [16] 廖爱民,刘九夫,张建云,等.实验小流域尺度下高精度水位计的比测分析 [J]. 水科学进展, 2019,30(3):337–347.
- Liao A M, Liu J F, Zhang J Y, et al. Intercomparison of high-accuracy water level gauges in the scale of small experimental catchment [J]. Advances in Water Science, 2019,30(3):337–347.
- [17] Wang T, Zhu B, Zhou M H. Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central sichuan basin, china [J]. Journal of Hydrology, 2019,570(1):839–849.
- [18] Liu F, Wang Y, Xiao R, et al. Influence of substrates on nutrient removal performance of organic channel barriers in drainage ditches [J]. Journal of Hydrology, 2015,527(4):380–386.
- [19] GB 3838–2002 地表水环境质量标准 [S].
GB 3838–2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [20] GB 18918–2002 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S].
GB 18918–2002 Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant [S].
- [21] Soana E, Gavioli A, Tamburini E, et al. To mow or not to mow: Reed biofilms as denitrification hotspots in drainage canals [J]. Ecological Engineering, 2018,113(12):1–10.
- [22] 刘 莲,汪 涛,任 晓,等.不同植物对沟渠沉积物反硝化速率及功能基因的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2019,39(6):1808–1815.
Liu L, Wang T, Ren X, et al. Effects of plant species on denitrification and functional genes in ditch sediment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(6):1808–1815.
- [23] Castaldelli G, Aschonitis V, Vincenzi F, et al. The effect of water velocity on nitrate removal in vegetated waterways [J]. Journal of Environmental Management, 2018,215(3):230–238.
- [24] Kumwimba M N, Dzakpasu M, Zhu B, et al. Nutrient removal in a trapezoidal vegetated drainage ditch used to treat primary domestic sewage in a small catchment of the upper yangtze river [J]. Water and Environment Journal, 2017,31(1):72–79.
- [25] Meyer D, Molle P, Esser D, et al. Constructed wetlands for combined sewer overflow treatment—comparison of german, french and italian approaches [J]. Water, 2012,5(1):1–12.
- [26] 秦红杰,张志勇,刘海琴,等.两种漂浮植物的生长特性及其水质净化作用 [J]. 中国环境科学, 2016,36(8):2470–2479.
Qin H J, Zhang Z Y, Liu H Q, et al. Growth characteristics and water purification of two free-floating macrophytes [J]. China Environmental Science, 2016,36(8):2470–2479.
- [27] Tonner K. Evaluating the performance of constructed wetlands for the treatment of combined sewer overflows [J]. Ecological Engineering, 2019,137(10):53–59.
- [28] 蔺 芳.4 种耐低温沉水植物对富营养化水体除磷去氮的研究 [J]. 安徽农学通报, 2018,24(22):108–109.
Lin F. Removal of phosphorus and nitrogen from eutrophic water by four kinds of low temperature Submerged Plants [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2018,24(22):108–109.
- [29] 王 石,陈丽媛,孙 翔,等.从“大截排”到清源和低影响开发——基于水质目标约束的情景模拟与规划 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(10):3981–3990.
Wang S, Chen L Y, Sun X, et al. From rainwater and sewage interception to separation system combined with low impact development reconstruction in urban built-up area: A water quality constrained scenario stimulation and programming [J]. China Environmental Science, 2017,37(10):3981–3990.
- [30] Zhang P, Huang G H, An C J, et al. An integrated gravity-driven ecological bed for wastewater treatment in subtropical regions: Process design, performance analysis, and greenhouse gas emissions assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,212(12):1143–1153.
- [31] 四川省生态环境厅.四川省环境保护税应税污染物排放量抽样测算方法 [R]. 成都:四川省生态环境厅, 2020.
Sichuan Provincial Department of Ecology and Environment.Sample measurement method of pollutant emission from environmental protection tax in sichuan province [R]. Chengdu:Sichuan Provincial Department of Ecology and Environment, 2020.
- [32] Duan J J, Geng C G, Li X, et al. The treatment performance and nutrient removal of a garden land infiltration system receiving dairy farm wastewater [J]. Agricultural Water Management, 2015,150(12): 103–110.

致谢: 本实验的现场采样工作由中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站等工作人员协助完成,在此表示感谢。

作者简介: 韩 阳(1996-),男,四川巴中人,中国科学院大学硕士研究生,主要从事山区面源污染控制。