

重庆南湖水源地保护工程人工湿地的雨季运行特点

肖海文, 高梨娜, 谭军莲, 翟俊, 代蕾, 麦天鹏
(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 人工湿地是近年来日益受到关注的一项农业径流面源污染控制技术。结合重庆市南湖水源地保护工程的人工湿地工程实例,分析了该农业区雨季径流的水质、水量特征,并对人工湿地的运行特点以及不同运行方式下的除污效果进行了研究。结果表明,用于农业径流处理的人工湿地为典型非稳态运行人工湿地,在降雨影响下进水量和出水量并不相等,适合用径流平均浓度(EMC)去除率评估其污染物净化效能;在雨季进水水量和水质随机波动的情况下,人工湿地的出水COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN以及浊度值稳定,均能达到设计要求,但对TP的去除效果受进水量的影响明显,进水TP为0.11~0.34 mg/L时,出水TP的EMC值为0.16 mg/L,未达到设计要求。

关键词: 人工湿地; 农业径流面源污染; 水源地保护工程; 冲击负荷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0077-05

Wet Season Operational Characteristics of Constructed Wetland for Water Source Protection Project of Nanhu Lake in Chongqing City

XIAO Hai-wen, GAO Li-na, TAN Jun-lian, ZHAI Jun, DAI Lei,
MAI Tian-peng

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Constructed wetland is a technology for agricultural runoff non-point source pollution control, which has been popular in recent years. Based on the constructed wetland in the water source protection project of Nanhu Lake in Chongqing City, water quality and quantity characteristics of runoff in wet season in the agricultural area were monitored and analyzed, and the operational characteristics of constructed wetland and the removal of pollutants in different operation modes were studied as well. The results showed typical unsteady operation of the constructed wetland in which the effluent was different from the influent due to rainfall, and the event average concentration(EMC) removal rate was suitable to evaluate the pollutant removal efficiency. Under the fluctuation of quality and quantity of the influent in wet season, the effluent COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and turbidity were stable, which also met the design requirements. However, the removal efficiency of TP was substantially affected by the influent quantity, when influent TP was 0.11~0.34 mg/L, the EMC value of effluent TP was 0.16 mg/L, which failed the design requirements.

Key words: constructed wetland; agricultural runoff non-point source pollution; water source protection project; shock loads

城镇近郊的大中型湖库是我国城市常用的地表水水源地,近年来随着我国点源污染控制的加强,由于汇水区降雨径流导致的农业面源污染问题凸显。降雨径流携带大量悬浮固体、氮、磷和有机物等进入湖库后,带来水质污染和富营养化等问题,给水源地水质保障、供水安全以及生态保护带来了极大威胁^[1-3]。因此,有效控制农业径流面源污染,对湖库等地表水水源地保护具有十分重要的意义。

人工湿地技术是近年来兴起的一项有效的面源污染径流处理技术^[4-6],其处理单元构造简单、运行管理经济简便,并且具有很强的生态景观效应。然而,与水源地保护相关的农业径流处理人工湿地在国内的工程应用研究实例并不多。笔者结合重庆市南湖水源地保护人工湿地工程实例,监测分析了该农业区雨季径流的水质、水量特征,并对人工湿地的运行特点、不同运行方式下污染物的净化效果进行了研究,以期类似农业面源污染控制人工湿地的设计、运行管理以及进一步除污机理的研究提供一定参考。

1 工程概况和汇水区特征

南湖是重庆市巴南区一座以供水、灌溉和防洪为主要功能的中型水库,是国家集中式饮用水水源地二级保护区。南湖水源地保护人工湿地一期工程是由重庆市水利局实施的一项“中央分成水资源费”项目,旨在保证李家咀溪流输入南湖水库的径流水质达到Ⅲ类地表水水质标准,消除李家咀流域的面源污染物威胁,为南湖生活饮用水水源地二级保护区水域功能提供保障,并为今后其他入库支流的污染控制和水源地保护工程提供示范和借鉴。

李家咀溪流汇水区面积为3.3 km²,地势较平坦,汇水区内用地形式为农田、果园以及野生林地等,面积分别为1.96、0.51和0.8 km²。汇水区所在的重庆市巴南区属于亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量为1 284 mm,其中雨季为每年6月—8月,降雨量通常占全年降雨量的2/3以上。

2 人工湿地工程简介

水源地保护人工湿地一期工程建设于李家咀小溪汇入南湖的入水口,其处理工艺流程见图1。李家咀小溪输送的农业径流经格栅、泵房后进入沉砂塘,去除水土流失带来的大颗粒泥沙及其他悬浮固体后,雨水进入分流塘。分流塘出水池设置流量分配井,分别将出水流量分配至生态沼泽区和一级湿

地床。生态沼泽区由浅沼泽形成的主流道和透水型高沼泽形成的导流墙组成,旱季低流量运行时为潜流+表流的复合湿地床,雨季大流量运行时则为表流人工湿地^[7]。一级湿地床的出水接一级湿地塘、二级湿地床和三级湿地床。其中,一级湿地床为水平潜流,二级湿地床为竖向潜流,三级湿地床为水平潜流。生态沼泽区和三级湿地床的出水均进入生态浮岛区。生态浮岛区采用湿式人工浮岛以增强水质净化功能和进行水质保障。

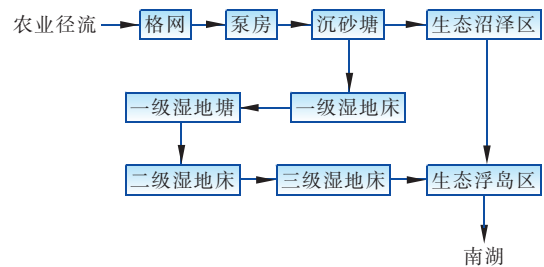


图1 人工湿地处理系统工艺流程

Fig.1 Flow chart of constructed wetland treatment system

3 雨季人工湿地的水量和水质特征

对2013年李家咀的全年降雨情况以及人工湿地的进、出水流量和主要水质指标进行了监测。2013年全年降雨146 d,总降雨量为1 212.9 mm,其中雨季6月—8月降雨39 d,降雨量总计为774.9 mm,约占全年降雨总量的2/3。

3.1 进、出水水量特征

6月—8月各场降雨情况和南湖人工湿地的进、出水流量如图2所示。可知,李家咀汇水区内雨季降雨分布非常不均匀,6月和8月降雨量和降雨次数多,7月降雨天数较少,总雨量为101.7 mm。最大降雨发生在8月初。人工湿地由两台泵并联提水,泵入人工湿地系统的水量由李家咀小溪的水位确定,控制水位高程为399.2 m。由图2可以看出,人工湿地进水量分为明显的两档:较长时期未降雨、李家咀溪流内水位低于控制水位时,人工湿地进水量约为1 680 m³/d;而当降雨使得李家咀溪流涨水、水位高于控制水位后,人工湿地由两台泵并联进水,进水量约为3 360 m³/d。

从图2还可以看出,与传统稳态下的废水处理人工湿地不同,南湖水源地保护人工湿地的进水流量并不等于出水流量,属于非稳态运行。长期未降雨或降雨量不大时,人工湿地进水流量大于出水流量,主要原因在于:①降雨期间进水流量增加,人工

湿地内水力坡度增加,水位明显上涨,湿地滞蓄容积增大;②该人工湿地(包括沉砂塘)垫层为非硬化的粘土夯实层,具有一定的渗透性,会损失部分进水量;③湿地总面积为 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,雨季刚好是蒸发速率大的夏季,因此水量蒸发也可损失较多水量。雨量较大($>26 \text{ mm}$)时,人工湿地却出现了出水流量高于进水的现象,这主要是由于直接降雨和湿地周边大量散流进入,其总量高于前述3部分水量的缘故。

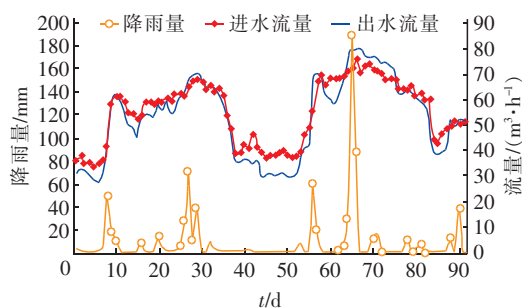


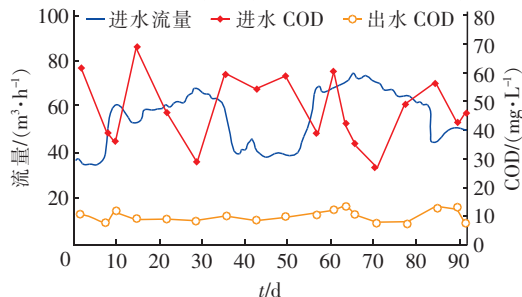
图2 6月—8月进、出水流量统计

Fig.2 Statistics of inlet and outlet flow rate from June to August

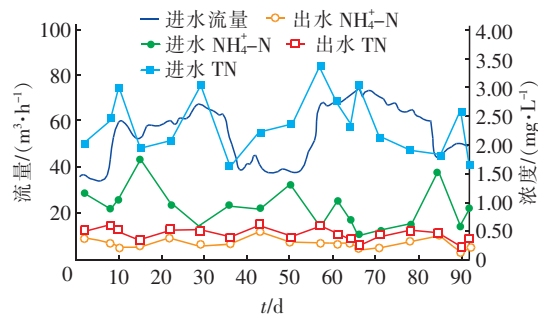
对6月—8月的进水和出水总量进行统计,分别为 12.2×10^4 和 $11.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,进水量较出水量高5.2%,表明人工湿地本身对雨水径流有滞蓄削减作用;另外也表明,如果单用进、出水浓度计算去除率来评估人工湿地对污染物的去除效果会有偏差。

3.2 进、出水水质特征

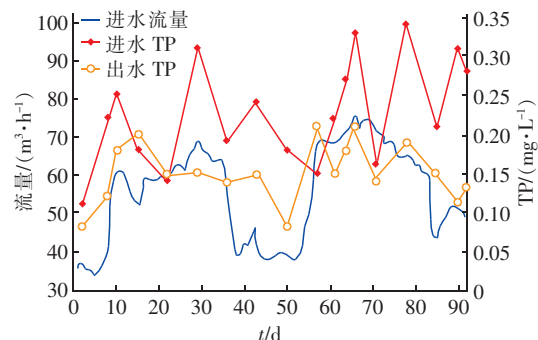
6月—8月人工湿地进、出水污染物浓度的变化情况如图3所示。由图3(a)可以看出,进水COD浓度波动较大,变化范围为 $26.35 \sim 68.82 \text{ mg/L}$ 。而出水COD浓度持续稳定在 10 mg/L 左右,与Ⅲ类地表水限值($\text{COD} \leq 20 \text{ mg/L}$)相比,出水有机物浓度满足要求。另外,进、出水COD浓度与进水流量并没有明显的相关性,充分表明人工湿地在去除有机物方面对非稳态水量波动的适应性较好。



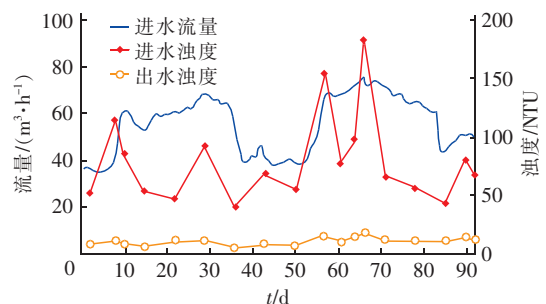
a. 进、出水COD浓度变化



b. 进、出水氨氮和总氮浓度变化



c. 进、出水总磷浓度变化



d. 进、出水浊度变化

图3 6月—8月人工湿地系统进、出水污染物浓度变化

Fig.3 Variation of pollutants concentration of influent and effluent of constructed wetland from June to August

将图3(b)和图2中的降雨情况进行对比可以看出,进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 浓度受降雨情况影响明显。暴雨期间进水氨氮浓度都会出现升高趋势,雨量越大,雨前累计晴天数越长,进水氨氮浓度越高。推测这可能和降雨前氮肥的施用有关,另外,暴雨期间农户分散排放的一些生活和畜禽粪便污水被冲沟雨水带入也可能是雨天氨氮浓度升高的又一原因。与氨氮浓度不同,TN 浓度则在单场降雨后出现上升,推测降雨后进入李家咀小溪的氮以有机氮和氨氮为主,雨后由于溪流自净使得硝酸盐氮浓度增高。

与进水相比,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 浓度相对稳定,均达到了Ⅲ类地表水水质标准。6月—8月出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度基本处于 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ 范围内,出

水 TN 浓度为 0.2 ~ 1.5 mg/L, 优于 Díaz^[8] 和李林锋^[9] 等报道的类似农业径流处理人工湿地的脱氮效果, 表明南湖水源地保护工程人工湿地脱氮效果良好。

将图 3(c) 的总磷变化过程和图 2 中的降雨情况进行对比可以看出, 进水 TP 浓度同样与单场降雨量以及雨前晴天数呈正相关。单场降雨量越大, 雨前晴天数越多, 进水 TP 浓度越高。进水 TP 浓度在 0.11 ~ 0.34 mg/L 之间, 波动较大。但人工湿地出水 TP 浓度并不稳定, 虽在长期未降雨时出水总磷浓度略有下降, 但总体来说, 出水总磷浓度均处于较高水平, 大部分在 0.05 ~ 0.2 mg/L 之间, 均大于Ⅲ类地表水水质限值 (TP ≤ 0.05 mg/L), 未达到预期效果。这可能是由于农业中使用磷肥较多, 导致进水 TP 浓度较大, 尤其是在降雨初期; 另外, 湿地运行期间并未对植物进行收割, 腐烂植物的磷释放也可能是造成湿地除磷效果较差的原因之一。

对比浊度变化情况和图 2 中降雨情况可以看出, 进水浊度依然与单场降雨量以及雨前晴天数相关。单场降雨量越大, 雨水对污染物的冲刷越强, 而雨前晴天数越多, 冲刷浓度越大, 进水浊度越高。进水浊度基本在 40 ~ 180 NTU 范围内, 而出水浊度比较稳定, 一直维持在 10 NTU 左右。

综上所述可以看出, 虽然雨季南湖人工湿地进水量和各项污染物指标浓度波动很大, 但人工湿地能

稳定控制出水 COD、NH₄⁺ - N、TN 以及浊度值, 由降雨引起的进水流量和污染物浓度的变化对出水水质影响并不大, 但出水 TP 浓度受进水流量变化的影响较为明显。

3.3 雨季人工湿地的污染物总体净化效率

从污染物浓度控制和总量控制两方面评估雨季南湖人工湿地对污染物的总体净化效率。其中径流平均浓度 EMC、污染物去除率和日平均去除负荷分别采用公式 (1) ~ (3) 计算。

$$EMC = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i t_i C_i}{\sum_{i=1}^n Q_i t_i} \quad (1)$$

式中: Q_i 为降雨径流量, m³/d; t_i 为降雨历时, h; C_i 为污染物浓度, mg/L; n 为水质监测总次数。

$$\mu = \frac{EMC_{进} - EMC_{出}}{EMC_{进}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: μ 为径流平均浓度去除率, %; $EMC_{进}$ 、 $EMC_{出}$ 分别为进、出水平均浓度, mg/L。

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i进} t_{i进} C_{i进} - \sum_{i=1}^n Q_{i出} t_{i出} C_{i出}}{A} \quad (3)$$

式中: H 为日平均去除负荷, kg/(m² · d); A 为湿地总面积, m²。

出水浓度、去除率以及去除负荷是反映人工湿地净化能力的重要指标。雨季人工湿地对 COD、NH₄⁺ - N、TN、TP 的去除效果见表 1。

表 1 雨季人工湿地处理效果

Tab. 1 Treatment effect of constructed wetland in rainy season

项 目	进水 EMC/ (mg · L ⁻¹)	出水 EMC/ (mg · L ⁻¹)	标准限值/ (mg · L ⁻¹)	去除率/%	进水总量/ (kg · d ⁻¹)	出水总量/ (kg · d ⁻¹)	平均去除负荷/ (kg · m ⁻² · d ⁻¹)
COD	45.43	9.55	20	79.0	61.30	12.59	2.030
NH ₄ ⁺ - N	0.86	0.28	1	67.6	1.16	0.37	0.033
TN	2.41	0.44	1	81.7	3.25	0.58	0.111
TP	0.23	0.16	0.05	31.9	0.31	0.21	0.004

从表 1 可以看出, 南湖人工湿地在雨季的净化效果良好。对 COD、NH₄⁺ - N、TN、TP 的去除负荷分别达到了 2.030、0.033、0.111、0.004 kg/(m² · d)。除 TP 外, 对 COD、NH₄⁺ - N、TN 均有较好的径流平均浓度去除率, 其中, 对 TN 的径流平均浓度去除率达到了 80% 以上。除 TP 外, 各污染物的出水 EMC 值均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的Ⅲ类水质要求, 表明该人工湿地的建造对于汇水区内非点源污染的控制效果显著, 对南湖水库水源

地的保护具有重要作用。但出水 TP 的 EMC 值 (0.16 mg/L) 超过了Ⅲ类地表水限值 (0.05 mg/L), 表明人工湿地对降雨径流中总磷的净化效果较差, 需采取措施进一步去除总磷。

4 结论

① 用于农业径流处理的人工湿地为典型非稳态运行人工湿地, 在降雨影响下进、出水量并不相等, 适合用径流平均浓度去除率评估其除污效能。

② 在雨季农业径流进水量和水质随机波动

的情况下,人工湿地的出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 浓度稳定,均能达到Ⅲ类地表水水质标准;对 TP 的去除效果受进水量的影响明显,进水 TP 为 0.11 ~ 0.34 mg/L 时,出水 TP 的 EMC 值为 0.16 mg/L,未达到Ⅲ类地表水水质标准。

参考文献:

- [1] 张千千,王效科,郝丽岭,等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学,2012,33(1):76-82.
Zhang Qianqian, Wang Xiaoke, Hao Liling, *et al.* Characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff in Chongqing[J]. Environmental Science,2012,33(1):76-82(in Chinese).
- [2] Choe J S, Bang K W, Lee J H. Characterization of surface runoff in urban areas[J]. Water Sci Technol,2002,45(9):249-254.
- [3] Conley D J, Likens G E. Ecology controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. Science,2009,323(5917):1014-1018.
- [4] Moore M T, Schulz R, Cooper C M, *et al.* Mitigation of chlorpyrifos runoff using constructed wetlands[J]. Chemosphere,2002,46(6):827-835.
- [5] 万金保,兰新怡,汤爱萍. 多级表面流人工湿地在鄱阳湖区农村面源污染控制中的应用[J]. 水土保持通报,2010,30(5):118-121,146.
Wan Jinbao, Lan Xinyi, Tang Aiping. Application of multi-surface flow constructed wetland to rural non-point source pollution control in Poyang Lake region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2010,30(5):118-121,146(in Chinese).
- [6] 于海霞,于江华,徐礼强,等. 复合型人工湿地脱氮效能及其水力负荷影响规律[J]. 环境工程学报,2013,7(9):3357-3362.
Yu Haixia, Yu Jianghua, Xu Liqiang, *et al.* Nitrogen removal and effects analysis of hydraulics in an integrated wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2013,7(9):3357-3362(in Chinese).
- [7] 翟俊,刘洁,肖海文,等. 南湖水库水源地保护人工湿地系统工程设计[J]. 中国给水排水,2012,28(18):64-67.
Zhai Jun, Liu Jie, Xiao Haiwen, *et al.* Design of constructed wetland system for water source protection of Nanhu Reservoir[J]. China Water & Wastewater,2012,28(18):64-67(in Chinese).
- [8] Díaz F J, O'Geen A T, Dahlgren R A. Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design[J]. Agricultural Water Management,2012,104(1):171-183.
- [9] 李林锋,年跃刚,蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. 环境科学研究,2009,22(3):337-342.
Li Linfeng, Nian Yuegang, Jiang Gaoming. Contribution of macrophytes assimilation in constructed wetlands to nitrogen and phosphorous removal[J]. Research of Environmental Sciences,2009,22(3):337-342(in Chinese).



作者简介:肖海文(1976-),女,四川名山人,博士,副教授,主要从事雨水、废水的处理和资源化利用以及人工湿地废水处理技术研究。

E-mail: xiaohaiwen99@163.com

收稿日期:2018-11-13