

海绵城市雨水湿地的滞蓄容积设计与工程实例

肖海文, 代 蕾, 任莉蓉, 翟 俊, 谭军莲
(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: 人工湿地技术是海绵城市建设中净化雨水水质和削减雨洪峰值的重要技术。将海绵城市雨水人工湿地滞蓄容积分为前置调蓄池/塘的有效滞蓄容积和湿地床的有效滞蓄容积两部分进行探讨,给出了详细计算公式和合理选择前置调蓄池/塘出水控制方式的要点,并说明了雨水人工湿地随降雨情况而改变的运行方式。以重庆市棕榈泉雨水人工湿地为例,利用有效滞蓄容积计算公式,分析了人工湿地对降雨径流的滞蓄效果,表明人工湿地年雨水滞蓄总量达到了汇水区地表径流总量的72%,其中前置调蓄池作用很大,占滞蓄总量的96.5%,尤其对规模小的人工湿地更是如此。

关键词: 人工湿地; 海绵城市; 雨水径流; 滞蓄

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)18-0053-06

Case and Design of Retention Volume of Wetland for Stormwater Treatment in Sponge City

XIAO Hai-wen, DAI Lei, REN Li-rong, ZHAI Jun, TAN Jun-lian
(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Constructed wetland is widely used in rainwater purification and reduction of rain flood peak in the construction of sponge city. The retention volume of stormwater wetland in sponge city was divided into pre-storage pool/pond effective retention volume and wetland bed effective retention volume. The detailed calculation formula and the reasonable choice of effluent control mode of pre-storage pool/pond were introduced, and the operating modes of stormwater wetland could be changed by variation of rainfall. As a case study, the retention effect of Palm Spring constructed wetland on rainfall runoff in Chongqing was analyzed with the volume calculation formula. The results indicated that the constructed wetland total annual rain retention reached 72% of the total surface runoff in the catchment area. The effect of pre-storage pool was very large, accounting for 96.5% of the total retention, especially for small scale constructed wetland.

Key words: constructed wetland; sponge city; runoff; retention

区别于普通的废水处理人工湿地,海绵城市雨水人工湿地在具有水质净化功能的同时,还担负着雨水水量滞蓄任务,因此其设计方法与普通稳定运

行的污水处理人工湿地有显著差别,其中最为特别的是其雨水水量滞蓄能力的设计。然而,我国有关雨水径流人工湿地的研究尚处于起步阶段,鲜见城

市雨水人工湿地滞蓄能力的研究与成熟的设计方法,更是缺乏成功运行实例分析。笔者对海绵城市雨水人工湿地的滞蓄能力和设计方法进行了探讨,并结合重庆市棕榈泉雨水人工湿地工程实例,分析了人工湿地对降雨径流的滞蓄效果。

1 海绵城市雨水人工湿地的滞蓄能力

海绵城市雨水人工湿地属于受降雨事件驱动的运行系统,其雨量滞蓄容积的设计受城市降雨情况、雨水排水系统特征、集水区雨水水质特点、接纳水体情况、人工湿地处理负荷以及水质净化目标等因素影响^[1]。一般来说,雨水人工湿地对雨水水量的滞蓄容积可由前置调蓄池(前置塘)的有效滞蓄容积 V_1 和湿地床的有效滞蓄容积 V_2 之和求得。

1.1 前置调蓄池的有效滞蓄容积 V_1 设计计算

在雨水人工湿地中,前置调蓄池通过调蓄和溢流以均化水质,提高湿地处理效率,缓解雨水初始冲刷效应及前置沉淀缓解湿地堵塞^[2]。实际监测发现^[3],棕榈泉人工湿地在年降雨天数为143 d条件下,由于前置调蓄池的调节作用,人工湿地恒定进水负荷运行204 d,停水闲置天数为135 d,水量冲击负荷运行天数26 d,且恒定进水负荷运行时污染物出水均值优于地表水Ⅴ类水质要求。由此可看出前置调蓄池不仅能缓冲水量负荷,也能在时间上缓冲水质净化的压力,对雨水湿地来说不可或缺。

人工湿地前置调蓄池的有效滞蓄容积指担负雨量贮存和调节功能的这部分池容。根据人工湿地在海绵城市中所发挥的主要功能,有效容积计算可分为按年降水滞蓄率计算和按污染物总量控制计算两种方法。

① 按年降水滞蓄率的计算方法

按年降水滞蓄率计算主要考虑人工湿地对汇水区年总降水量的滞蓄效率,设定单场降雨调蓄池能贮存汇水区内雨量 $\leq H_k$ (mm)的雨量,则调蓄池有效容积 V_1 计算如下:

$$V_1 = 0.001 \times H_k \times \Psi \times A_b \quad (1)$$

式中 A_b ——汇水区面积, m^2

Ψ ——汇水区径流系数

0.001——单位转化系数

式(1)的物理意义表明,汇水区内雨量 $\leq H_k$ 的单场降雨将全部被滞蓄处理后排放,对于单场雨量 $> H_k$ 的降雨则只有其前 H_k 的雨量会被滞蓄处理后再排放。如果多年平均降雨次数、年降雨量以及

雨量 $> H_k$ 、雨量 $\leq H_k$ 的降雨次数已知,则可以求出该前置调蓄池对年总降水量的滞蓄率。反之 H_k 也可以根据设计要求的年雨水滞蓄率来进行计算确定。

② 按污染物总量控制的计算方法

初始冲刷效应是城市雨水径流非点源污染的显著特征,它是指一次降雨事件中所产生的大部分污染物被初期径流所携带的现象^[4]。目前定量分析初始冲刷效应的理论可分为 $M(V)$ 曲线法、基线浓度法和初期雨量法^[4]。按污染物总量控制计算调蓄池有效容积的方法即建立在初始冲刷初期雨量法理论的基础之上^[5]。初期雨量($H_0/Y\%$)定义的基本原理为当降雨量超过一定值时,污染物累积百分数的增加速度减慢,对于不同降雨事件,当降雨量超过 H_0 后,污染物累积百分数总能保持在一个较高水平 $Y\%$ 之上^[5]。例如,车伍等^[6]通过大量实测数据得出对于屋面径流,控制 H_0 在3 mm以上,即能控制整场降雨60%以上的污染物,即其初期雨量的定义为3/60%。

在初期雨量法理论的原则上,根据人工湿地的污染物总量控制目标,设定需要处理的污染物占总污染物控制量的比率 $Y\%$,则可得到初始冲刷雨量 H_0 ,按下式计算调蓄池的有效容积 V_1 :

$$V_1 = 0.001 \times H_0 \times \Psi \times A_b \quad (2)$$

式中 H_0 ——初始冲刷雨量, mm

式(2)的物理意义为该雨水人工湿地处理了径流携带污染物总量的 $Y\%$,而调蓄池对雨水的年滞蓄率则可根据降雨量统计数据,按①中的方法计算确定。

1.2 湿地床的有效滞蓄容积 V_2 设计计算

降雨事件中,人工湿地属于非稳态运行,湿地床的进水总量通常大于出水总量(见图1),这是由于降雨进水时湿地床水深和淹没面积(wet area)增加的缘故,另外,对于底部非硬化处理(粘土夯实或素土夯实)的湿地床而言,部分进水还能下渗成为土壤含水量或地下径流^[7]。这些水量构成了湿地床对雨水的有效滞蓄容积 V_2 。在很多雨水人工湿地设计中,这部分雨量滞蓄容积常常被忽略,然而湿地床面积越大,所设计的雨天冲击负荷(进水量)越大,这部分滞蓄容积就越大,甚至会超过调蓄池的滞蓄容积 V_1 ,因此在以雨水滞蓄为重要目标的海绵城市雨水人工湿地设计中通常不能忽略湿地床本身的

滞蓄容积,尤其对规模大的雨水湿地更是如此。

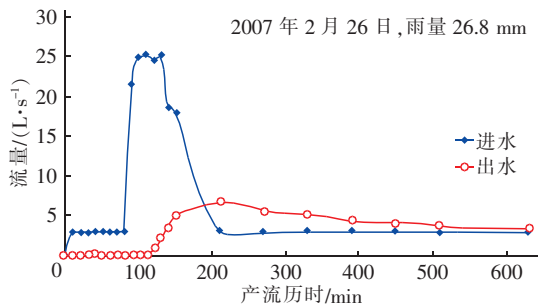


图1 棕榈泉人工湿地单场降雨实测进出水流量过程

Fig.1 Water flow process of influent and effluent in a single rainfall event measured in Palm Spring constructed wetland

实际监测发现,人工湿地水力坡度和进水流量之间具有明显的相关性,例如图2是实测潜流湿地水力坡度和进水流量关系图,两者呈幂函数关系。

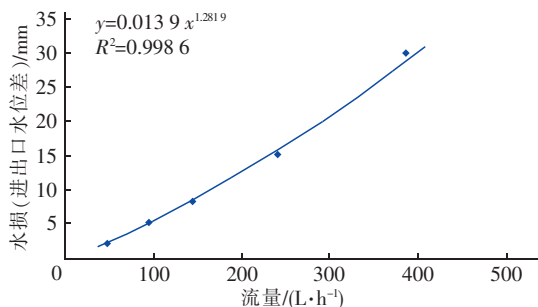


图2 实测水平潜流人工湿地水力坡度和进水流量的关系

Fig.2 Correlation between hydraulic gradient and influent flow rate of measured horizontal subsurface flow constructed wetland

忽略雨前人工湿地未进水时蒸发和渗透带来的空置容积,如果晴天湿地进水的基流量为 $Q_{晴}$,暴雨冲击负荷的进水量为 $Q_{雨}$,则湿地床有效滞蓄容积 V_2 可按下式计算:

$$V_2 = 0.001 \times A_w \times S \times (Q_{雨}^a - Q_{晴}^a) + K \times A_D \times T \quad (3)$$

式中 A_w ——人工湿地面积, m^2

S ——湿地床水损摩阻系数,可根据湿地实测值或类似人工湿地经验值确定

$Q_{晴}$ 、 $Q_{雨}$ ——分别为人工湿地设计的晴天进水量和暴雨冲击负荷流量

a ——水损幂函数指数,根据湿地实测值或类似人工湿地经验值确定,如无实测值则表流湿地取1.2,水平潜流湿地取1.3

K ——湿地底部的渗透系数, m/h

A_D ——人工湿地底部面积, m^2

T ——平均降雨历时, h

2 设计要点

2.1 调蓄池水位设计和容积分区

前置调蓄池或前置塘的功能除了雨量贮存调节外,通常还担负着预处理、湿地冲击负荷调节以及暴雨溢流等任务^[8]。根据出水方式,前置调蓄池/塘出水流量分为泵控制和管径控制两种类型。当人工湿地建设用地地势较平坦,雨水管接入埋深较大时,可将前置调蓄池设计为埋地式以节省人工湿地占地面积^[9],出水流量采用泵控制方式[见图3(a)],这时人工湿地的日常负荷进水量 $Q_{晴}$ 由水泵从调蓄池中泵入;当人工湿地建设用地落差较大,雨水管接入标高足够时,则优先选用无能耗的管径控制进水负荷方式,由前置调蓄池的日常出水管重力自流出水接入人工湿地,进水水量由出水管管径的过水能力以及调节池内剩余有效水位确定[见图3(b)],此时的前置调蓄池通常设置为与湿地景观相协调的地面开敞式前置塘^[9]。无论哪种进水方式,雨水人工湿地前置调蓄池的容积分区由上而下一般由四部分构成:沉淀集泥区、有效调蓄容积区、暴雨冲击控制区和溢流区。各容积的分区水位分别为停泵水位/自流出水水位、冲击负荷进水水位和溢流水位。

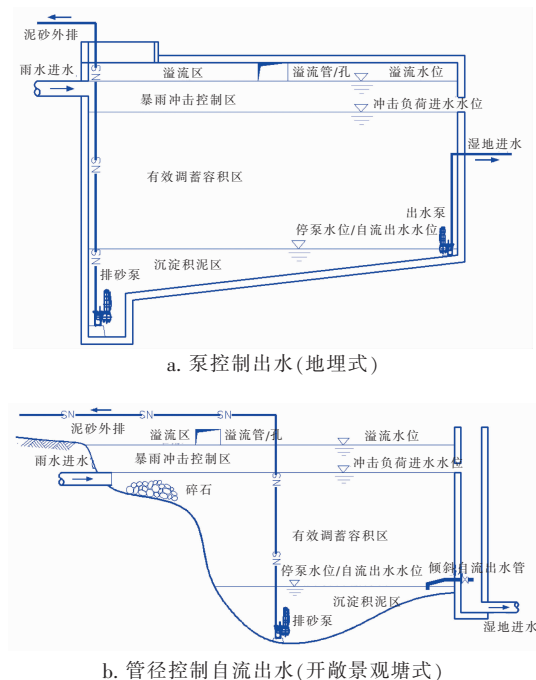


图3 前置调蓄池/塘示意

Fig.3 Schematic diagram of pre-storage pool/pond

2.2 人工湿地进水流量的变化和控制

人工湿地进水流量随降雨情况根据前置调蓄池/塘的水位自动调节。晴天或降雨事件中,当调蓄池/塘内水位高于停泵水位或自流出水水位且低于冲击负荷进水水位时,人工湿地进水量 $Q_{\text{晴}}$ 由泵出水量或自流出水管管径坡度控制,这一水量虽然一定程度受调蓄池内水位影响(降雨时调蓄池内水位增高,泵出水量或自流管出水水量均会相应有所增大;不降雨时,泵出水量和自流管出水水量会有所下降),但流量变化不大,相对稳定。

降雨中当调蓄池/塘内水位高于冲击负荷进水水位时,人工湿地开始承受暴雨冲击负荷,此时的人工湿地进水水量等于 $(1+r)$ 倍 $Q_{\text{晴}}$,其中 r 为人工湿地设计能承受的冲击负荷倍数。而冲击负荷出水孔大小按水头 h 和流量值 $rQ_{\text{晴}}$ 按堰出流公式计算。人工湿地处理雨水径流的优势之一是既可多天停止进水闲置运行,也可以承受 3~8 倍日常流量的高冲击负荷。海绵城市雨水人工湿地通常应充分利用人工湿地抗冲击负荷的优势,设置冲击负荷进水孔。

当降雨继续增大,调蓄池内水位达到溢流水位时,人工湿地进水流量仍为 $(1+r)$ 倍 $Q_{\text{晴}}$,但多余雨量开始溢流,溢流管管径设计应大于或等于前置调蓄池接入的雨水管管径。溢流管一般可设置在调蓄池雨水进水管前的检查井上,以避免溢流量对调蓄池的冲击。

2.3 清淤和排空

由于埋深的关系,前置调蓄池通常不设放空管而采用砂泵排泥和清空,但需考虑排泥的处置。城市径流有机质含量相对较少,调蓄池底泥通常以无机泥砂为主,可因地制宜设置简单可透水干化场对清淤的泥砂进行干化后再做最后处置。

3 案例分析

3.1 棕榈泉雨水人工湿地概况

棕榈泉雨水人工湿地位于重庆市北部新区高新园,于 2005 年建成运行。人工湿地面积及汇水区下垫面性质如表 1 所示。该工程对棕榈泉住宅区汇水区的雨水进行集中处理,长期以来运行稳定,无冲击负荷下运行时出水水质满足地表水 V 类水质标准,见表 2。棕榈泉人工湿地具体流程如图 4 所示,采用湿地塘床组合工艺,主要包括沉砂池、前置调蓄池、景观池、潜流(HSSF)床、多级跌水小溪、表流(SWF床)等。

表 1 人工湿地面积及汇水区特征

Tab. 1 Area of constructed wetland and characteristic of catchment area m^2

汇水区下垫面性质和面积	住宅屋面面积(高层住宅屋面为私家花园,别墅屋面为瓦坡)	18 130
	公共建筑屋面面积(水泥平屋面)	1 800
	非透水性道路(改性沥青路面)	10 300
	非透水性场地(会所广场、球场)	6 240
	绿地面积(公共和私人绿地)	38 050
	透水型路面(多孔砖或陶土砖停车场、小径等)	14 220
	人工水景(不包括景观湖)	760
总计		89 500
人工湿地面积		1 200

表 2 无冲击负荷时人工湿地进、出水水质

Tab. 2 Influent and effluent quality of the constructed wetland without impact load

项目	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	平均去除率/%
SS	85.7	9.8	87.4
COD	106.2	13.2	87.6
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	2.5	0.4	86.2
TP	0.4	0.1	63.8
TN	3.3	1	67.8

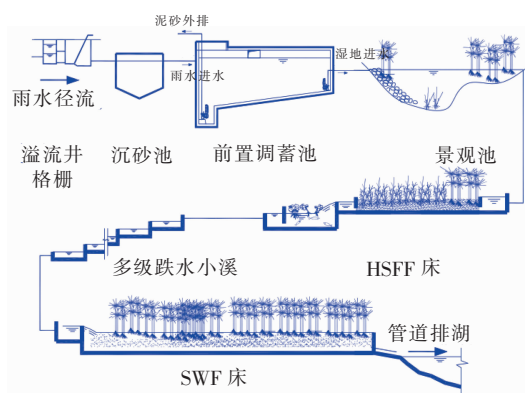


图 4 人工湿地系统处理流程示意

Fig. 4 Flow chart of constructed wetland treatment system

雨水径流由分流制雨水管网收集后,首先通过 10 mm 格栅去除较大漂浮物或悬浮物,然后进入埋式旋流沉砂池,去除密度较大的无机颗粒,再进入埋地前置调蓄池^[3]。调蓄池有效调节容积按汇水区初始冲刷雨量 12 mm 计算得到[式(1)],出水则根据调蓄池内水位由水泵和自流管控制:晴日或降雨量较小(<12 mm)调蓄池水位未达停泵水位或自流出水水位时,径流贮存于池内,湿地塘床系统进水量受水泵控制;降雨量较大(≥ 12 mm)时,调蓄池充满,水从自流管以重力流流至湿地塘床系统;降雨

量很大(远大于12 mm),调蓄池的径流量超过自流量出水量后,调蓄池水位继续上升,至溢流水位后经溢流管/孔直接排湖。

3.2 年雨水滞蓄效果分析

2012年对棕榈泉雨水人工湿地汇水区降雨情况进行了监测,总降雨量为1 054.7 mm,降雨天数为150 d,年地表径流总量为40 590 m³。其中各月降雨情况及雨水滞蓄量见表3。可见,人工湿地系统对汇区内雨水有良好的滞蓄能力,年雨水滞蓄

总量达到了汇水区地表径流总产量的72%,其中绝大部分滞蓄量为前置调蓄池承担,为28 106 m³,占滞蓄总量的96.5%,若没有前置调蓄池,湿地系统能滞蓄的雨量就只有1 009 m³,由湿地床承担,可见前置调蓄池在雨水人工湿地中作用很大,尤其对规模小的人工湿地更是如此。值得注意的是,如果将棕榈泉雨水人工湿地底部由硬化(混凝土)处理改为可渗透性基底处理,如有一定渗透性能的粘土基底,按式(3)则可增加湿地床对雨水的滞蓄比例。

表3 各月降雨情况及雨水滞蓄量

Tab.3 Monthly rainfall and rainwater retention capacity

月份	≥12 mm		<12 mm		径流总量/m ³	调蓄池贮存雨量 V ₁ /m ³	湿地贮存雨量 V ₂ /m ³	总滞蓄量/m ³	滞蓄率/%
	雨量/mm	次数	雨量/mm	次数					
1	0.0	0	10.4	10	400.2	400.2	0.0	400.2	100
2	14.4	1	14.6	9	1 116.1	1 023.7	34.8	1 058.5	95
3	36.9	2	42.9	13	3 071.1	2 574.7	69.6	2 644.3	86
4	42.7	2	39.8	11	3 175.0	2 455.3	69.6	2 524.9	80
5	140.9	7	43.4	14	7 092.8	4 903.0	243.6	5 146.6	73
6	99.3	2	41.1	10	5 403.3	2 505.4	69.6	2 575.0	48
7	62.3	3	42.6	9	4 037.1	3 024.9	104.4	3 129.3	78
8	191.1	7	36.4	8	8 755.3	4 633.6	243.6	4 877.2	56
9	35.0	2	27.8	5	2 416.9	1 993.5	69.6	2 063.1	85
10	34.5	2	53.7	15	3 394.4	2 990.3	69.6	3 059.9	90
11	15.3	1	15.6	9	1 189.2	1 062.2	34.8	1 097.0	92
12	0.0	0	14.0	8	538.8	538.8	0.0	538.8	100
合计	672.4	29	382.3	121	40 590.1	28 105.6	1 009.2	29 114.8	72

4 结论

① 海绵城市雨水人工湿地对雨水水量的滞蓄容积由前置调蓄池/塘的有效滞蓄容积和湿地床的有效滞蓄容积两部分组成。

② 人工湿地前置调蓄池/塘出水控制可因地势优先采用无能耗管径控制出水。

③ 为实现雨量贮存、预处理、冲击负荷调节及暴雨溢流等功能,前置调蓄池/塘应设置合理的停泵水位/自流出水水位、冲击负荷进水和溢流水位。

参考文献:

- [1] 魏海琪. 海绵城市背景下的城市人工湿地设计研究[D]. 北京:北方工业大学,2017.
Wei Haiqi. Study on Urban Constructed Wetland Design in Sponge City[D]. Beijing: North China University of Technology,2017(in Chinese).
- [2] Wadzuk B M, Rea M, Woodruff G, et al. Water-quality

performance of a constructed stormwater wetland for all flow conditions[J]. J Am Water Resour Assoc,2010,46(2):385-394.

- [3] 肖海文,柳登发,张盛莉,等. 人工湿地处理雨水径流的设计方法和实例[J]. 中国给水排水,2013,29(8):37-41.

Xiao Haiwen, Liu Dengfa, Zhang Shengli, et al. Design and case of constructed wetland for stormwater runoff treatment[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(8):37-41(in Chinese).

- [4] Hathaway J M, Tucker R S, Spooner J M, et al. A traditional analysis of the first flush effect for nutrients in stormwater runoff from two small urban catchments[J]. Water, Air, Soil Pollut, 2012, 223(9):5903-5915.

- [5] Lü H, Hou T, Horton R, et al. The streamflow estimation using the Xinanjiang rainfall runoff model and dual state-parameter estimation method[J]. J Hydrol, 2013, 480(4):102-114.

- [6] 车伍,李俊奇. 城市雨水利用技术与管理[M]. 北京:

(下转第65页)