

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.008

雨水生物滞留设施排空时间评估方法

王文亮¹, 阮佳悦¹, 苏成庆¹, 郭纯园², 李俊奇¹, 任自强³,
李运杰⁴

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 科罗拉多大学, 美国; 3. 芜湖市排水管理处, 安徽 芜湖 241005; 4. 上海市工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 排空时间是雨水生物滞留设施的关键设计参数和运行参数,可分为表层排空时间和结构层排空时间。提出了恒定水头和变水头条件下排空时间的计算方法,恒定水头下,可根据底部排水管过流能力确定具体计算公式;变水头下,计算得到排空时间后,可进一步计算生物滞留设施底部排水管的流量系数,作为SWMM模型LID模块的输入参数。通过该方法可评估生物滞留设施的实际运行情况,确定土壤介质、粗砂/级配碎石需满足的入渗性能。

关键词: 雨水生物滞留设施; 排空时间; 表层; 结构层

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)06-0053-04

Methodology for Assessing Emptying Time of Stormwater Bioretention Facilities

WANG Wen-liang¹, RUAN Jia-yue¹, SU Cheng-qing¹, GUO Chwenyuan², LI Jun-qi¹,
REN Zi-qiang³, LI Yun-jie⁴

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. University of Colorado, The United States of America; 3. Wuhu City Drainage Management Office, Wuhu 241005, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Emptying time constitutes a critical design and operational parameter for stormwater bioretention facilities, and it can be categorized into surface ponding layer emptying time and structural layer emptying time. This paper proposed a calculation method for emptying time under both constant head and variable head conditions. The specific formula could be derived based on the flow capacity of the bottom drain under constant head conditions. Under a variable head, after determining the emptying time, the flow coefficient of the bottom drain of the bioretention facility could be further calculated and used as an input parameter for the low impact development (LID) module in SWMM. This method is capable of assessing the operational effectiveness of bioretention facilities and determining the infiltration performance of soil media as well as coarse sand and graded gravel.

Key words: stormwater bioretention facility; emptying time; surface ponding layer; structural layer

基金项目: 2024年北京市教委“北京建筑大学中国海绵城市”国情教育项目; 北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目(BPHR20220108)

排空时间是雨水生物滞留设施的关键设计参数和运行参数^[1],可分为表层排空时间和结构层排空时间^[2]。生物滞留设施的排空时间越长,其水质净化效果越好,但水量控制能力越弱,表层积水难以通过渗透排除,容易滋生蚊蝇或影响植物生长,因此,设施建成初期的表层排空时间一般控制在2~4 h^[1]。设施运行过程中,随着泥砂等沉积物不断随雨水流入,表层逐渐堵塞,当表层排空时间延长至12~24 h时,需对表层土壤介质进行更换或翻耕。按照保守设计的原则计算生物滞留设施表面积时,设计表层排空时间也可取12~24 h。对于总排空时间,不宜长于当地平均场次降雨间隔时间,需使生物滞留设施在降雨来临前尽量处于非饱和状态。

如何建立土壤介质和粗砂/级配碎石渗透性能与排空时间之间的量化关系,是影响生物滞留设施应用的关键问题。该研究提出了生物滞留设施排空时间的评估方法,可用于指导土壤介质等材料的选择,并为SWMM模型模拟LID设施的实际运行效果提供参数取值。

1 恒定水头条件下排空时间计算方法

生物滞留设施的典型构造如图1所示。雨水首先通过土壤介质表层入渗,随后在土壤介质层、粗砂排水层内渗流。对于表层入渗,平均渗透速率可通过式(1)计算,对于结构层渗流(见图2),在恒定均匀流条件下,渗流流量可通过达西定律计算,根据质量连续原则,表层入渗流量与渗流流量应相等,如式(2)所示:

$$f = \frac{Y_0}{T_d} \quad (1)$$

$$Q = fA_B = K_1 I_1 A_B = K_2 I_2 A_B \quad (2)$$

式中: f 为平均入渗速率; Y_0 为蓄水层深度; T_d 为设计表层排空时间; Q 为入渗/渗流流量; A_B 为生物滞留设施表层面积; K_1 、 K_2 分别为土壤介质层和粗砂排水层水力传导率; I_1 、 I_2 分别为土壤介质层、粗砂排水层渗流水力坡度。

由图1、2可知,生物滞留设施内雨水流动的作用水头为 H ,扣除渗流沿程损失后,底部排水管内水流的作用水头为 ΔH ,如下式所示:

$$H = Y_0 + H_1 + H_2 \quad (3)$$

$$\Delta H = H - \Delta H_1 - \Delta H_2 \quad (4)$$

$$\Delta H_1 = I_1 H_1 \quad (5)$$

$$\Delta H_2 = I_2 H_2 \quad (6)$$

式中: ΔH_1 、 ΔH_2 分别为土壤介质层、粗砂排水层渗流沿程损失; H_1 、 H_2 分别为土壤介质层、粗砂排水层厚度。

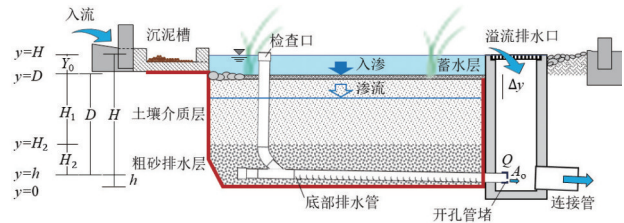


图1 生物滞留设施典型构造

Fig.1 Typical structure of bioretention facility

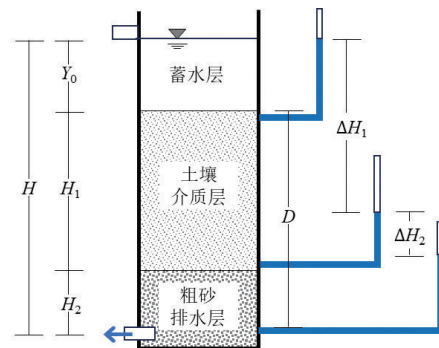


图2 生物滞留设施结构层渗流示意

Fig.2 Schematic diagram of seepage in the structural layer of bioretention facility

当底部排水管侧壁开孔和排水管的过流能力大于渗流流量时,底部排水管内水流为非有压流(管内存在与大气接触的自由液面),根据能量守恒原理,作用水头全部消耗于结构层渗流沿程损失,如下式所示:

$$\Delta H = H - \Delta H_1 - \Delta H_2 = 0 \quad (7)$$

为降低排放流量,可在底部排水管出口处采取限流措施,如安装开小孔的管堵,使过流断面面积减小,此时,管内水流为有压流,管出口处水压近似为当地大气压。蓄水层自由液面与出口断面之间的能量方程如式(8)~(10)所示。可知,作用水头一部分消耗于结构层渗流沿程损失、底部出水管进水口处局部损失、管内沿程损失和出水口处局部损失,其余转化为出流速度水头。

$$H = \frac{\alpha Q^2}{2gA_0^2} + \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_p + \left(\sum \zeta \frac{A_0^2}{A^2} + \zeta_0 \right) \frac{Q^2}{2gA_0^2} \quad (8)$$

令 $\Delta H = H - \Delta H_1 - \Delta H_2 - \Delta H_p$, 由式(8)得:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \sum \zeta \frac{A_o^2}{A^2} + \zeta_o}} A_o \sqrt{2g\Delta H} = C_o A_o \sqrt{2g\Delta H} \quad (9)$$

$$\Delta H_p = \frac{10.3n^2 l Q^2}{d^{5.33}} \quad (10)$$

式中: α 为动能修正系数,紊流时一般取1; A_o 为底部排水管孔口出流断面面积; ΔH_p 为底部排水管沿程损失; A 为底部排水管过流断面面积; ζ 为底部排水管进水口及转弯过程中的局部损失系数; ζ_o 为孔口出流局部损失系数; n 为底部排水管粗糙系数; l 为底部排水管长度; d 为底部排水管管径; C_o 为孔口出流流量系数。

根据上述公式可试算得到平均入渗率 f ,进一步采用式(1)和式(11)~(13)可计算得到表层排空时间 T_d 、结构层排空时间 T_{dry} 及总排空时间 T_e 。

$$T_{dry} = \frac{D_s}{f} \quad (11)$$

$$T_e = \frac{Y_0}{f} + \frac{D_s}{f} \quad (12)$$

$$D_s = n_1 H_1 + n_2 H_2 \quad (13)$$

式中: T_{dry} 为结构层排空时间; D_s 为结构层孔隙等效蓄水深度; T_e 为总排空时间; n_1 、 n_2 分别为土壤介质层和粗砂排水层孔隙率。

2 变水头条件下排空时间计算方法

上述是在恒定水头下,考虑渗流及管流水头损失时的排空时间计算方法,而实际排放过程中水头是变化的,为非恒定流。不考虑水头损失,生物滞留池的排空过程受制于底部排水管出口孔流时(见图1),根据连续性原则,调蓄体积变化率等于排放流量,如下式所示:

$$A_B \Delta y = Q \Delta t = C_o A_o \sqrt{2g(y-h)} \Delta t \quad (14)$$

式中: h 为底部排水管管口形心高度。

对式(14)从 $y=D$ 至 $y=H$ 积分:

$$A_B \int_{y=D}^{y=H} \sqrt{(y-h)} dy = Q \Delta t = C_o A_o \sqrt{2g} \int_{t=0}^{t=T_d} dt \quad (15)$$

得到表层排空时间 T_d :

$$T_d = \frac{1}{3600} \frac{2A_B [(H-h)^{1/2} - (D-h)^{1/2}]}{C_o A_o \sqrt{2g}} \quad (16)$$

当表层蓄水量排空后,结构层中的重力水开始

外排。首先是土壤介质层,其水量取决于孔隙率,式(14)可变换为:

$$n_1 A_B \Delta y = Q \Delta t = C_o A_o \sqrt{2g(y-h)} \Delta t \quad (17)$$

对式(17)从 $y=H_2$ 至 $y=D$ 积分,得到土壤介质层排空时间 T_1 :

$$T_1 = \frac{1}{3600} \frac{2n_1 A_B [(D-h)^{1/2} - (H_2-h)^{1/2}]}{C_o A_o \sqrt{2g}} \quad (18)$$

同理,可得到粗砂排水层排空时间 T_2 :

$$T_2 = \frac{1}{3600} \frac{2n_2 A_B (H_2-h)^{1/2}}{C_o A_o \sqrt{2g}} \quad (19)$$

则总排空时间 T_e 为:

$$T_e = T_d + T_1 + T_2 \quad (20)$$

假设蓄水池与结构层均为土壤介质,将生物滞留设施简化为水箱模型,对式(17)从 $y=h$ 至 $y=H$ 积分,可得到下式:

$$T_e = \frac{2n_1 A_B (H-h)^{1/2}}{C_o A_o \sqrt{2g}} \quad (21)$$

将式(21)变换得到下式:

$$C_f = \frac{C_o A_o \sqrt{2g}}{n_1 A_B} = \frac{2(H-h)^{1/2}}{T_e} \quad (22)$$

式中: C_f 为流量系数,是SWMM模型中植草沟、生物滞留设施、雨水罐等LID设施需输入的参数^[3]。

3 案例分析

以北京建筑大学大兴校区生物滞留池为例,设计降雨量33 mm,设计年径流总量控制率85%。蓄水池深度20 cm,采用土壤介质层和粗砂排水层双层结构,实验测得二者的水力传导率分别为116和1 656 mm/h,孔隙率分别为0.3和0.4。底部排水管为UPVC开缝管,开孔率1%,长度8.5 m,管径10 cm,粗糙系数0.02。参照图1, $A_B=25 \text{ m}^2$, $Y_0=20 \text{ cm}$, $H_1=45 \text{ cm}$, $H_2=20 \text{ cm}$, $n_1=0.3$, $n_2=0.4$, $h=5 \text{ cm}$, $l=8.5 \text{ m}$, $d=10 \text{ cm}$ 。评估其排空时间,若控制 $f=100 \text{ mm/h}$,计算管堵开孔孔径。

① 恒定水头条件下的排空时间

$$H=Y_0+H_1+H_2=0.2+0.45+0.2=0.85 \text{ m}, D_s=n_1 H_1+n_2 H_2=0.3 \times 0.45+0.4 \times 0.2=0.215 \text{ m}.$$

设 f 初始值为150 mm/h,根据式(2)、(5)、(6),得到土壤介质层和粗砂排水层的水头损失为: $\Delta H_1=$

$$\frac{f}{K_1} H_1 = \frac{150/1\,000}{0.116} \times 0.45 = 0.58 \text{ m}, \quad \Delta H_2 = \frac{f}{K_2} H_2 = \frac{150/1\,000}{1.656} \times 0.2 = 0.018 \text{ m}。$$

剩余水头 $\Delta H = 0.85 - 0.58 - 0.018 = 0.25 \text{ m}$, 重新设定 f 值, 直至 $\Delta H = 0$, 最终确定 $f = 212.60 \text{ mm/h}$ 。

根据式(12)计算总排空时间为: $T_e = \frac{Y_0}{f} + \frac{D_s}{f} =$

$$\frac{200}{212.60} + \frac{215}{212.60} = 1.95 \text{ h}。$$

现通过在底部排水管安装开小孔的管堵, 控制 $f = 100 \text{ mm/h}$, 则入渗/渗流流量为: $Q = fA_b = 100/1\,000 \times 25/3\,600 = 0.000\,69 \text{ m}^3/\text{s}。$

$$\Delta H_1 = \frac{f}{K_1} H_1 = \frac{100/1\,000}{0.116} \times 0.45 = 0.39 \text{ m}, \quad \Delta H_2 =$$

$$\frac{f}{K_2} H_2 = \frac{100/1\,000}{1.656} \times 0.2 = 0.012 \text{ m}, \quad \Delta H_p = \frac{10.3n^2 l Q^2}{d^{5.33}} = \frac{10.3 \times 0.02^2 \times 8.5 \times 0.000\,69^2}{0.1^{5.33}} = 0.003\,6 \text{ m}, \quad \Delta H =$$

$$0.85 - 0.39 - 0.012 - 0.003\,6 = 0.44 \text{ m}。$$

令 $C_o = 0.60$, 计算管堵开孔面积: $A_o = \frac{Q}{C_o \sqrt{2g\Delta H}} =$

$$\frac{0.000\,69}{0.60 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.44}} = 0.000\,39 \text{ m}^2, \text{管堵开孔}$$

孔径为: $d_o = \sqrt{\frac{4A_o}{\pi}} = 0.022 \text{ m}$, 总排空时间为: $T_e =$

$$\frac{Y_0}{f} + \frac{D_s}{f} = \frac{200}{100} + \frac{215}{100} = 4.15 \text{ h}。$$

② 变水头条件下的排空时间

分别按式(16)、(18)、(19)、(20)计算采取流量控制时的排空时间: $T_d = \frac{1}{3\,600} \left\{ 2A_b \left[(H-h)^{1/2} - (D-h)^{1/2} \right] \right\} / (C_o A_o \sqrt{2g}) = \frac{1}{3\,600} \left\{ 2 \times 25 \times \left[(0.85 - 0.05)^{1/2} - (0.65 - 0.05)^{1/2} \right] \right\} / (0.60 \times 0.000\,39 \times \sqrt{2 \times 9.81}) = 1.60 \text{ h}。$

$T_1 = 1.55 \text{ h}$, $T_2 = 2.06 \text{ h}$, $T_e = 1.60 + 1.55 + 2.06 = 5.20 \text{ h}$, 则底部排水管的流量系数 $C_f = \frac{2(H-h)^{1/2}}{T_e} = \frac{2 \times (85-5)^{1/2}}{5.20} = 3.44 \text{ cm}^{0.5}/\text{h}。$

4 结论与建议

① 当土壤介质层和粗砂排水层的水力传导率已知时, 可通过该方法评估表层排空时间和结构层排空时间; 当排空时间已知时, 可反推土壤介质层和粗砂排水层的入渗性能。实际运行时, 可在排水管出口安装限流孔控制排空时间, 该方法可用于计算限流孔孔径。建议通过更多实测数据对该方法进行验证。

② 变水头条件下排空时间计算方法不考虑渗流沿程损失, 当底部排水管采取限流措施时, 结构层处于饱和状态, 渗流沿程损失较小, 对排空时间的影响较小, 计算得到的总排空时间可能长于恒定水头条件下计算结果。该研究所举实例中, 变水头条件下计算所得的排空时间与实际观测值较为一致。

③ 采用该研究提出的方法可计算底部排水管的流量系数 C_f , 将其作为 SWMM 模型 LID 设施的输入参数, 可用于模拟 LID 设施的实际运行效果。

参考文献:

- [1] 中国城镇供水排水协会. 雨水生物滞留设施技术规范: TU/CUWA 40052—2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022: 4—9.
China Urban Water Association. Technical Specification for Stormwater Bioretention Facility: TU/CUWA 40052—2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022: 4—9 (in Chinese).
- [2] GUO J C Y, WANG W L, LI J Q. Urban Drainage and Storage Practices [M]. Florida: CRC Press, 2023: 357—388.
- [3] ROSSMAN L A. Stormwater Management Model User's Manual[M/OL]. (2022-02-01)[2024-12-26]. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.

作者简介: 王文亮(1984—), 男, 山东临沂人, 工学博士, 副教授, 海绵城市研究院副院长, 主要研究方向为城市水文、内涝治理与合流制溢流控制。

E-mail: wangwenliang@bucea.edu.cn

收稿日期: 2024-10-15

修回日期: 2024-12-27

(编辑: 沈靖怡)