

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.032.

魏祯, 张守红, 李睿贤, 等. 智慧水箱径流调控效益研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 222-229.

Wei Zhen, Zhang Shouhong, Li Ruixian, et al. Runoff Control Performance of Smart Tanks[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 222-229.

智慧水箱径流调控效益研究

魏 祯^{1,2,3}, 张守红^{1,2,3}, 李睿贤¹, 张文龙¹, 陈都伟¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统
国家野外科学观测研究站, 山西 临汾 042200; 3. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘 要: [目的] 探究智慧水箱的径流调控效益变化规律, 定量解析关键因素对其径流调控效益的综合影响, 以为智慧水箱的水文设计和径流调控效益评估提供科学参考。[方法] 基于日降雨和日需水数据, 构建智慧水箱水量平衡模型, 采用雨水截留率、溢流率和溢流频率 3 个指标综合评估智慧水箱的径流调控效益, 分析了智慧水箱的径流调控效益变化规律, 定量解析水箱容积、水箱排放上限和降雨强度对智慧水箱径流调控效益的影响。[结果] (1) 智慧水箱和普通水箱雨水截留率相等, 均随水箱容积的增大而增加。水箱容积为 0~100 m³ 时, 雨水截留率为 0~87%; (2) 智慧水箱的溢流率比同容积普通水箱低 0~19%, 且溢流率随水箱排放上限的增大而减小; (3) 智慧水箱的溢流频率比同容积普通水箱低 0~13%, 且溢流频率随降雨强度的增大而增加。[结论] 智慧水箱径流调控效益优于普通水箱, 可以通过增加水箱容积和排放上限, 降低强降雨条件对智慧水箱径流调控效益的影响。

关键词: 雨水收集利用; 智慧水箱; 雨水截留率; 溢流率; 溢流频率

中图分类号: TU991.34

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0222-08

Runoff Control Performance of Smart Tanks

Wei Zhen^{1,2,3}, Zhang Shouhong^{1,2,3}, Li Ruixian¹, Zhang Wenlong¹, Chen Duwei¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. National Station for Forest Ecosystem Research in Ji Country, Linfen, Shanxi 042200, China;

3. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the variation of runoff control performance of smart tanks, quantitatively to analyze the influence of key factors on their performance, thereby providing scientific references for the design and runoff control performance evaluation of smart tanks. [Methods] This study developed a smart operating rule which was used for a tank water balance model based on daily rainfall and daily water demand data. The runoff control performance of the smart tank was quantitatively evaluated through three indicators, i. e., stormwater capture efficiency, overflow rate, and overflow frequency. The influence of three main factors, i. e., tank size, tank discharge upper limit, and rainfall intensity, on the three indicators was quantitatively analyzed to reveal the change rule of runoff control performance of smart tanks. [Results] The stormwater capture efficiencies of the smart tank and the conventional tank are equal and both rise with the increase in tank size. When the tank size ranges from 0 to 100 m³, the stormwater capture efficiency ranges from 0 to 87%. The overflow rate of the smart tank is 0 to 19% lower than that of the conventional tank of the same size. The overflow rate decreases with the growth of the discharge upper limit. The overflow frequency of the smart tank is 0 to 13% lower than that of the conventional tank of the same size. The overflow frequency rises with the increase in rainfall intensity. [Conclusion] The runoff control performance of smart tanks is better than that of conventional tanks. The impact of heavy rainfall intensity on the runoff control

收稿日期: 2023-06-25

修回日期: 2023-08-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“城市雨水利用工程径流控制与供水功能变化机理与优化调控”(52279001)

第一作者: 魏祯(1999—), 女, 天津武清人, 硕士研究生, 研究方向为城市雨水控制与利用研究。E-mail: weizhen@bjfu.edu.cn

通信作者: 张守红(1985—), 男, 河南信阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为城市雨水控制与利用研究。E-mail: zhangs@bjfu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

performance of smart tanks can be reduced by increasing tank size and discharge upper limit.

Keywords: rainwater harvesting; smart tank; stormwater capture efficiency; overflow rate; overflow frequency

随着城镇化进程的加快,道路、停车场和屋顶等不透水面的面积比例不断增加,导致降雨发生时入渗量减少,汇流速度和径流总量增加,引发城市内涝积水等问题^[1-4]。同时,城市人口不断增加,需水量也随之升高,城市水资源供给系统正面临越来越大的挑战^[5-7]。雨水收集利用系统作为海绵城市建设的重要措施之一,能够收集屋顶等不透水面的雨水径流并储存在水箱中,以满足冲厕和灌溉等用水需求^[8-9]。研究表明,在城市区域应用雨水收集利用系统可以减少3%~75%的地表径流量^[10-12],降低城市洪涝灾害发生的风险。

雨水收集利用系统通常由集雨面、水箱及输水设施3个基本部分组成^[13]。水箱作为雨水收集利用系统的核心部件,其容积很大程度上决定了雨水收集利用系统的径流调控效益上限^[14-15]。Almeida等^[16]研究发现,当水箱容积由10 m³增大至170 m³,雨水收集利用系统的雨水截留率由46%提升至95%。相反地,当水箱容积较小时,雨水收集利用系统极易发生溢流。Jones等^[17]监测发现,当场次降雨量大于10 mm时,水箱容积为5.3 m³的雨水收集利用系统溢流频率达94%。虽然增大水箱容积可在一定程度上提升雨水收集利用系统的径流调控效益,但水箱容积大小还受到用地面积、投资成本等因素的限制^[18-20]。如何在提升径流调控效益的同时尽可能使用较小容积的水箱,是雨水收集利用系统应用过程中亟待解决的难点问题。

目前,国外学者开始尝试基于天气预测信息和对水箱内水量的实时调控构建智慧水箱,期望通过智慧水箱来提升雨水收集利用系统的径流调控效益。智慧水箱是应用物联网技术的新一代雨水收集利用系统。与普通水箱相比,智慧水箱增加了物联网模块,能够基于天气预测信息对水箱内水量进行实时调控^[21-23]。智慧水箱通过控制水泵和阀门装置,在降雨前排出水箱内储存的雨水,增加应对即将发生降雨的调蓄空间,能够容纳更多雨水径流,实现更优的径流调控效益(图1)。目前,通过对比智慧水箱和普通水箱在不同水箱容积、降雨前排水量和降雨特征下的径流调控效益,国外的研究中得出了一些初步结论。Xu等^[24]研究发现,当水箱容积为2.5~15 m³时,智慧水箱的溢流频率比普通水箱降低了约1%。Snir等^[25]研究发现,当智慧水箱在降雨前排放水箱内50%的雨水,溢流率比普通水箱低65%。Roman等^[26]研究发现,当场次降雨量为38~102 mm时,智慧水箱的雨水截留率比普通水箱高7%~55%。然而国内尚缺乏智慧水箱相关研究。虽然智慧水箱在

径流调控方面已经表现出较大应用潜力,但水箱容积、水箱排放上限和降雨强度均是影响径流调控效益的重要因素,已有研究仅分析了单个因素对智慧水箱径流调控效益的影响,仍缺乏有关水箱容积、水箱排放上限和降雨强度对智慧水箱径流调控效益综合影响的定量研究。

本文基于日降雨和日需水数据,构建智慧水箱水量平衡模型,采用雨水截留率、溢流率和溢流频率3个指标综合评估智慧水箱的径流调控效益,以北京市为例,定量解析水箱容积、水箱排放上限和降雨强度对智慧水箱径流调控效益的影响,以期为智慧水箱的水文设计和径流调控效益评估提供科学参考。

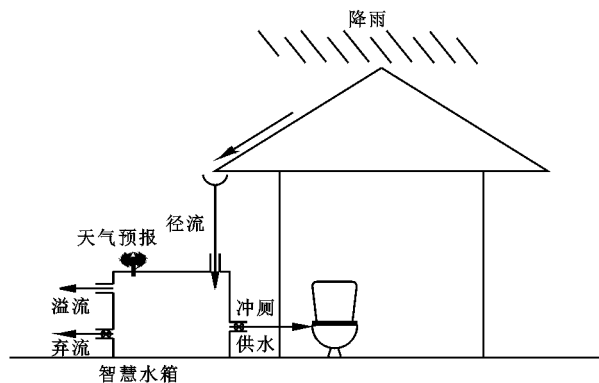


图1 智慧水箱结构示意图

Fig. 1 Structure of the smart tank

1 方法

1.1 研究区及数据

选择北京市作为研究区,该地区属典型暖温带半湿润大陆性季风气候,月平均降水量为2~167 mm,降雨主要集中在6—8月。北京市1991—2020年共30年的日降雨数据源自国家气象数据网(<http://data.cma.cn>)。研究地点假设为一个屋顶面积为1 000 m²,约100人居住的多层住宅。需水情景设置为冲厕用水,根据《海绵城市雨水控制与利用工程设计规范》(DB11/685-2021)^[27],住宅楼每人每天冲厕需水量为32 L,据此将冲厕需水量设置为3.2 m³/d。

1.2 普通水箱径流调控过程

基于水量平衡原理,构建水箱水量平衡模型^[28-30]。第 t 天屋顶可收集的径流量可由式(1)计算:

$$I_t = \varphi H_t A / 1000 \quad (1)$$

式中: I_t 为第 t 天屋顶收集的径流量(m³); H_t 为第 t 天的有效降雨量(mm),根据《指南》^[31]要求,降雨量大于2 mm的降雨视为有效降雨量,否则值为0; A

为屋顶面积(m^2); φ 为径流系数,取值为 0.9^[32-34]。

忽略封闭水箱产生的蒸发及渗漏损失,水箱的储水量可由式(2)计算:

$$R_t = \min(R_{t-1} + I_t - D_t, S_{\max}) \quad (2)$$

式中: R_t 、 R_{t-1} 分别为第 t 天、第 $t-1$ 天($t \geq 1$)水箱的储水量(m^3); D_t 为第 t 天的需水量(m^3); S_{\max} 为水箱的设计容积,即最大容积(m^3)。

水箱每日供水量可由式(3)计算:

$$Y_t = \min(R_{t-1} + I_t, D_t) \quad (3)$$

式中: Y_t 为第 t 天水箱可供应的水量(m^3)。

水箱的溢流量可由式(4)计算:

$$O_t = \max(R_{t-1} + I_t - D_t - S_{\max}, 0) \quad (4)$$

式中: O_t 为第 t 天水箱溢出的水量(m^3)。

1.3 智慧水箱径流调控过程

智慧水箱径流调控过程如图 2 所示。参考 Liang 等研究^[35],本文使用提前 24 h 的历史日降雨数据作为天气预测数据。智慧水箱在第 t 天接收天气预测信息,当预测第 $t+1$ 天有降雨且水箱会发生溢流时,智慧水箱在第 t 天供水后进行水箱内雨水的主动排放。可控排放量(CR_t)为智慧水箱第 t 天需要调控的雨水径流量。以调控后的水箱在 $t+1$ 天刚好不溢流为目标, CR_t 理论上等于水箱在第 $t+1$ 天预计溢出的水量。但当水箱在第 t 天供水后水箱内剩余储水量过少,不足以排出与第 $t+1$ 天预计溢流相等的水量时, CR_t 为水箱内全部剩余储水量。

智慧水箱设有水泵装置,受水泵排水能力限制,智慧水箱每日可排水量存在上限,即 $P_{t\max}$ 。因此,智慧水箱第 t 天实际的弃流量(Q_t)需通过比较 CR_t 与 $P_{t\max}$ 进行确定。考虑到智慧水箱排水能力的差异,设置了 5 种智慧水箱排放情景,分别为智慧水箱最大容积(S_{\max})的 0%,25%,50%,75%和 100%。当 $P_{t\max} = 0$ 时,智慧水箱没有主动排水能力,即为普通水箱。

智慧水箱第 t 天的排放上限可由式(5)计算:

$$P_{t\max} = \alpha S_{\max} \quad (5)$$

式中: $P_{t\max}$ 为智慧水箱每日排放上限(m^3); α 为排放系数,取值为 0,0.25,0.5,0.75,1。

智慧水箱第 t 天的弃流量可由式(6)判断:

$$Q_t = \min(\text{CR}_t, P_{t\max}) \quad (6)$$

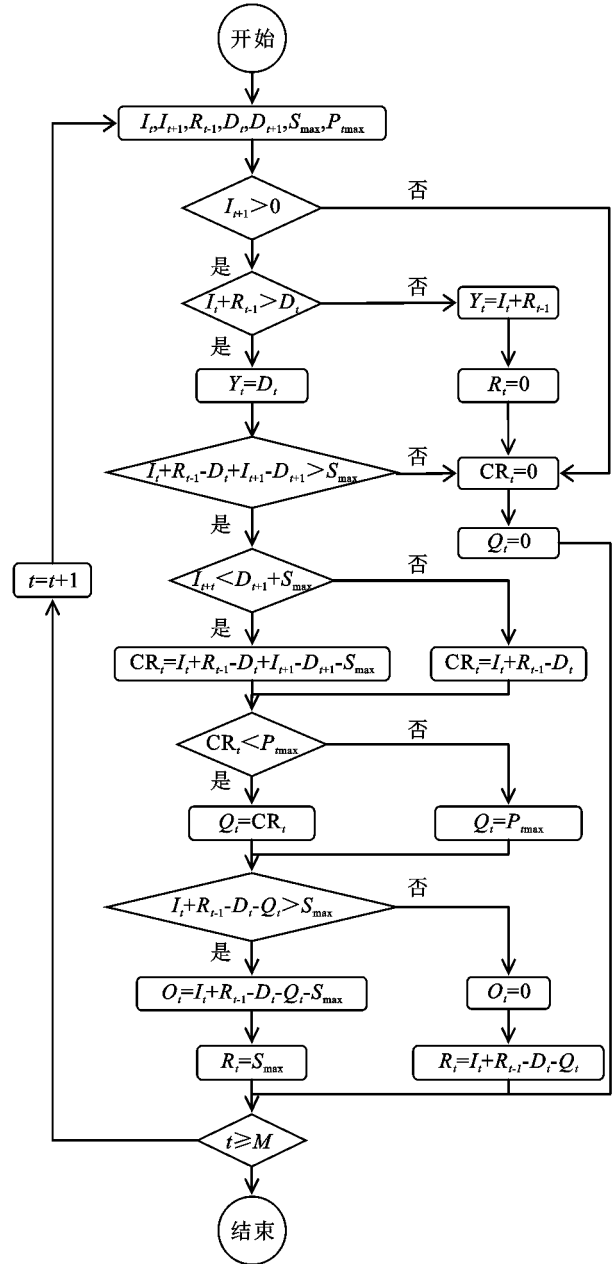
式中: Q_t 为智慧水箱第 t 天实际弃流的水量(m^3); CR_t 为智慧水箱第 t 天需要调控的雨水径流量,即可控排放量(m^3)。

智慧水箱第 t 天的可控排放量可由式(7)计算:

$$\text{CR}_t = \max[\min(R_{t-1} + I_t - D_t, R_{t-1} + I_t - D_t + I_{t+1} - D_{t+1} - S_{\max}), 0] \quad (7)$$

智慧水箱第 t 天的供水量可由式(3)计算。智慧水箱在第 t 天结束时的储水量可由式(8)计算:

$$R_t = \max[\min(R_{t-1} + I_t - D_t - Q_t, S_{\max}), 0] \quad (8)$$



注: I_t 表示第 t 天的径流量(m^3); R_t 表示第 t 天结束时水箱储存量(m^3); D_t 表示第 t 天的需水量(m^3); Y_t 表示第 t 天的供水量(m^3); CR_t 表示智慧水箱第 t 天的可控排放量(m^3); $P_{t\max}$ 表示智慧水箱每日排水上限(m^3); Q_t 表示智慧水箱第 t 天的弃流量(m^3); O_t 表示水箱第 t 天的溢流量(m^3); S_{\max} 表示水箱最大容积(m^3); M 表示模拟总日数。

图 2 智慧水箱径流调控过程

Fig. 2 Runoff control process of smart tank

智慧水箱第 t 天的溢流量可由式(9)计算:

$$O_t = \max[R_{t-1} + I_t - D_t - Q_t - S_{\max}, 0] \quad (9)$$

1.4 径流调控效益评价指标

雨水截留率(Stormwater Capture Efficiency, SCE)为水箱截留并用于满足用水需求的总水量占收

集总径流量的比例^[29],计算如下:

$$SCE = \frac{\sum Y_t}{\sum I_t} \times 100\% \tag{10}$$

溢流率(Overflow Rate, OR)为水箱总溢流量占收集总径流量的比例,计算如下:

$$OR = \frac{\sum O_t}{\sum I_t} \times 100\% \tag{11}$$

溢流频率(Overflow Frequency, OF)为水箱总溢流日数占总有效降雨日数的比例,计算如下:

$$OF = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{12}$$

式中: n 为水箱溢流日数; N 为有效降雨日数。

2 结果与分析

2.1 智慧水箱雨水截留率

图 3 为智慧水箱和普通水箱在容积为 0~100 m³时的雨水截留率。智慧水箱和普通水箱的雨水截留率相等,为 0~87%。雨水截留率随水箱容积的增大而增加,但其增速逐渐变缓。当水箱容积从 0 m³增加至 20 m³时,雨水截留率增加了 65%,而当水箱容积从 20 m³增加到 100 m³时,雨水截留率仅增长了 22%。这是因为当水箱容积较小时,水箱在降雨期间截留的雨水可以被完全消耗,水箱有效储存容积决定了水箱截留的雨水量。随着水箱容积的增加,由于用水相对固定,水箱的大部分空间被前时段雨水径流填充,并不能为下一时段降雨腾出有效储存空间,导致雨水截留率随着水箱容积增长而变化的程度渐缓。

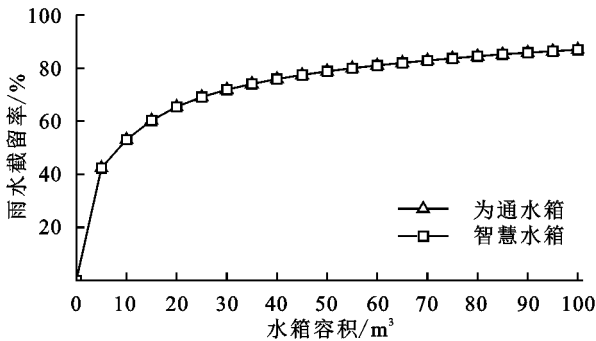


图 3 智慧水箱与普通水箱雨水截留率
Fig. 3 Stormwater capture efficiencies of smart and conventional tanks

根据日降雨量等级,截取北京市 30 年历史降雨序列中日降雨强度相同的水量平衡模拟结果。以容积为 50 m³的智慧水箱为例,定量分析降雨强度对雨水截留率的影响(图 4)。智慧水箱的雨水截留率随降雨强度的增大而减小。容积为 50 m³的智慧水箱在小雨、中雨、大雨和暴雨及以上的平均雨水截留率分别为 75%,24%,11%和 5%。因此,智慧水箱在小

雨条件的雨水截留率最大。由于有限的水箱容积无法容纳强降雨径流,智慧水箱的雨水截留率随降雨强度的增大而减小。

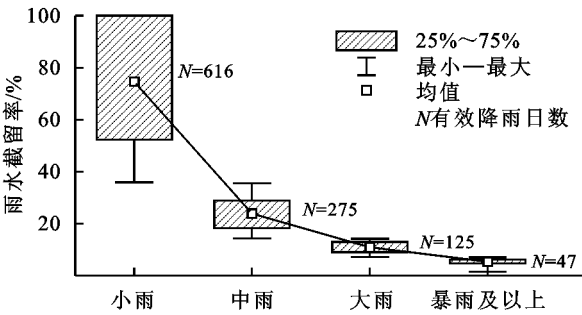


图 4 不同降雨强度下智慧水箱的雨水截留率
Fig. 4 Stormwater capture efficiencies of smart tanks under different rainfall conditions

2.2 智慧水箱溢流率

图 5 为不同排放上限的智慧水箱和普通水箱在容积为 0~100 m³时的溢流率。智慧水箱的溢流率随水箱容积的增大而减小,减小的速度逐渐减缓。当水箱容积超过 55 m³时,智慧水箱的溢流率均小于 10%。其中,排放上限为 75%和 100%的智慧水箱在水箱容积为 100 m³时,溢流率分别降至 1%和 0%。

当水箱容积相同时,智慧水箱的溢流率随水箱排放上限的增大而减小。智慧水箱的溢流率低于普通水箱。当水箱容积为 0~100 m³时,普通水箱的溢流率为 13%~100%,同容积的智慧水箱溢流率降低了 0~19%。以容积为 50 m³的智慧水箱为例,当水箱排放上限分别为 25%,50%,75%和 100%时,溢流率分别为 11%,6%,4%和 3%。水箱排放上限为 100%时,智慧水箱溢流率最小。这是由于随着水箱排放上限增大,智慧水箱在降雨前可排放的雨水量增加,进而增大了降雨时水箱的储存容积,有效减少了溢流量。

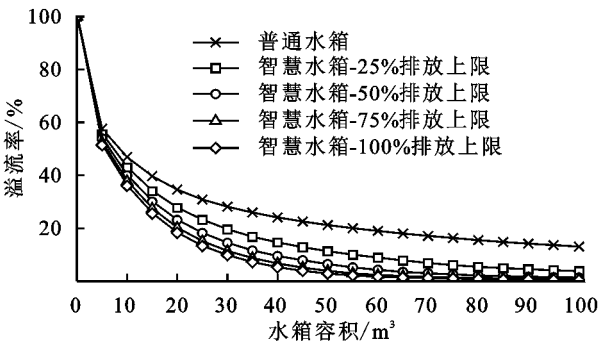


图 5 智慧水箱与普通水箱的溢流率
Fig. 5 Overflow rates of smart and conventional tanks

图 6 以 50%排放上限的智慧水箱为例展示了降雨强度对不同容积智慧水箱溢流率的影响。智慧水箱的溢流率随降雨强度的增加而增大。容积为 20 m³的智慧水箱,在小雨、中雨、大雨和暴雨及以上时的溢流率分别为 0%,4%,24%和 62%。容积为 40 m³的智

慧水箱,在小雨、中雨、大雨和暴雨及以上时的溢流率分别为0%,1%,4%和32%。由此可知,在水箱容积较小的情况下($\leq 20 \text{ m}^3$),智慧水箱也可对小雨、中雨及大雨产生较好的径流调控效果,将溢流率控制在25%以下。然而,在暴雨及以上降雨条件下实现较高的径流调控效益(溢流率 $\leq 25\%$),需增加智慧水箱的水箱容积($\geq 47 \text{ m}^3$)。

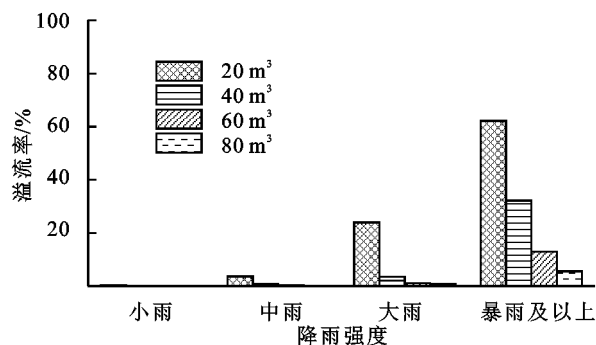


图6 不同降雨强度下智慧水箱的溢流率

Fig. 6 Overflow rates of smart tanks under different rainfall conditions

2.3 智慧水箱溢流频率

图7为不同排放上限的智慧水箱和普通水箱的溢流频率。智慧水箱的溢流频率低于普通水箱。在水箱容积为0~100 m^3 时,普通水箱的溢流频率为8%~100%,同容积的智慧水箱溢流频率降低了0~13%。智慧水箱的溢流频率随着水箱排放上限的增大而减小。当水箱容积为50 m^3 时,水箱排放上限为25%,50%,75%和100%的智慧水箱溢流频率分别为7%,4%,3%和2%。随着水箱排放上限的增大,智慧水箱发生溢流的次数减少,溢流频率总体维持在较低的水平。这是由于1991—2020年总有效降雨日数为1 063 d,其中不易导致水箱发生溢流的小雨和中雨有效降雨日数为891 d,占总有效降雨日数的84%,而易导致水箱发生溢流的大雨、暴雨及以上有效降雨日数为172 d,仅占总有效降雨日数的16%,因此,水箱的溢流频率总体较低。

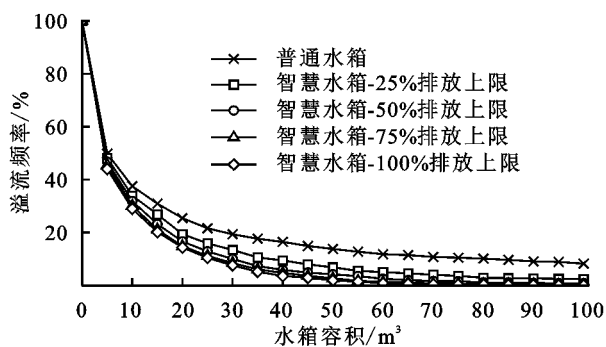


图7 智慧水箱与普通水箱的溢流频率

Fig. 7 Overflow frequency of smart and conventional tanks

图8以50%排放上限的智慧水箱为例展示降雨强度对不同容积智慧水箱溢流频率的影响。智慧水箱的溢流频率随降雨强度的增大而增加。容积为20 m^3 的智慧水箱在小雨、中雨、大雨和暴雨及以上时的溢流频率分别为1%,8%,82%和100%。智慧水箱的溢流频率与溢流率变化趋势相近,但溢流频率普遍高于溢流率。这是由于智慧水箱主要削减溢流的水量,然而不是所有日降雨产生的溢流量都会被削减至0,因此溢流率降低较多,而溢流频率降低较少。

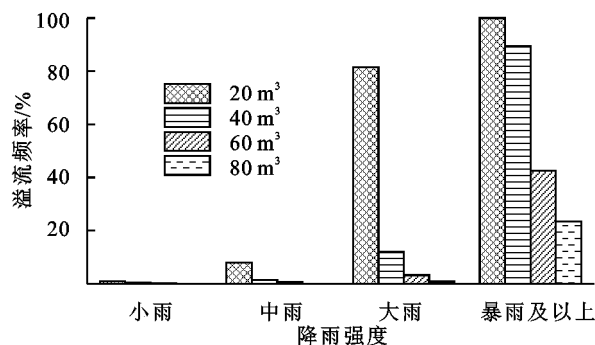


图8 不同降雨强度下智慧水箱的溢流频率

Fig. 8 Overflow frequencies of smart tanks under different rainfall conditions

图8也显示了智慧水箱的溢流频率随水箱容积的变化规律。当降雨强度为大雨及以上时,智慧水箱的溢流频率随着水箱容积的增大而减小。容积为20 m^3 , 40 m^3 , 60 m^3 和80 m^3 的智慧水箱在大雨时的溢流频率分别为82%,12%,3%和1%。然而在小雨、中雨时,随着水箱容积的增加,溢流频率降低不明显甚至不变。因此,在设计水箱容积时需考虑当地的降雨特征。当降雨以小雨或中雨为主时,较小容积的水箱几乎不发生溢流,增加水箱容积并不会使溢流频率发生明显改善。当降雨以大雨或暴雨及以上为主时,较小容积的水箱溢流频繁,此时增加水箱容积可以明显降低水箱的溢流频率。

3 讨论

3.1 智慧水箱相较于普通水箱的径流调控增益

智慧水箱与普通水箱的雨水截留率相等(图3)。这是由于本研究中雨水截留量为水箱截留并用于满足用水需求的总水量,智慧水箱主动弃流的雨水不计入水箱截留部分。智慧水箱与普通水箱的径流调控过程均遵循供水优先原则,智慧水箱在每日供水之后进行智慧调蓄过程,供水过程不受影响,智慧水箱与普通水箱总供水量相等^[36],因此,二者雨水截留率相等。也有研究表明智慧水箱相较普通水箱,雨水截留率有7%~55%的提升^[26,37]。这是由于上述研究在计算智慧水箱雨水截留率时将弃流量包含在雨水截

留量中,造成智慧水箱雨水截留率偏高。

智慧水箱相比普通水箱有更好的溢流控制效益。由图 5 和图 7 可知,智慧水箱的溢流率与溢流频率均明显低于普通水箱,与 Roman^[26]、Xu^[38]等结论一致。排放上限为 50%、容积为 15 m³ 的智慧水箱和容积为 26 m³ 的普通水箱溢流率均为 30%,排放上限为 50%、容积为 18 m³ 的智慧水箱和容积为 30 m³ 的普通水箱溢流频率均为 20%。这表明,较小容积的智慧水箱可达到与较大容积普通水箱相当的溢流控制效果,应用智慧水箱,可降低水箱占地规模,减少水箱建设投资成本。

3.2 水箱容积和排放上限对智慧水箱径流调控效益的影响

智慧水箱的径流调控效益随水箱容积的增大而增加,随水箱排放上限的增大而增加,这与 Behzadian^[39]、Snir^[25]等的研究结论一致。然而,前人缺乏对水箱容积和水箱排放上限综合作用的分析。本文发现当水箱容积过小时,改变水箱的排放上限不能提升智慧水箱的径流调控效益。图 9 展示了智慧水箱在暴雨及以上条件下的溢流频率。当水箱容积较小时(20 m³),增大水箱的排放上限,溢流频率未发生变化。当水箱容积较大时(40~80 m³),增加排放上限,可显著降低溢流频率。这是因为改变排放上限提高智慧水箱径流调控效益的作用受水箱容积的限制。另可发现,低水箱容积与高排放上限的智慧水箱可实现与高水箱容积与低排放上限相近的溢流控制效益。例如,水箱容积为 60 m³,排放上限为 50% 的智慧水箱和容积为 80 m³,排放上限为 25% 的智慧水箱的溢流频率分别为 43%,45%。这是由于水箱排放上限在水箱容积的基础上发挥作用,通过增加水箱排放上限,智慧水箱能够在较小的水箱容积情况实现较好的溢流控制效果。

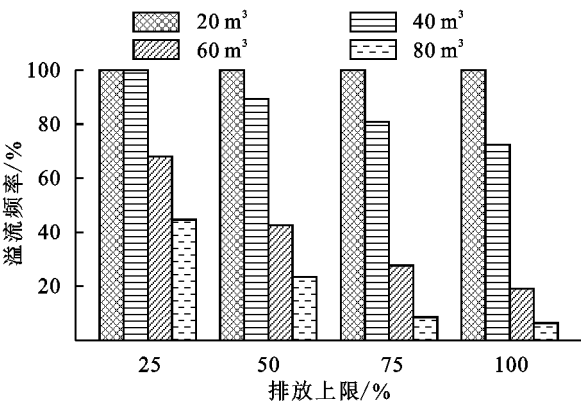


图 9 智慧水箱在暴雨及以上时的溢流频率
Fig. 9 Overflow frequencies of smart tanks during heavy rainfall conditions

3.3 降雨强度对智慧水箱径流调控效益的影响

降雨强度也是影响智慧水箱径流调控效益的重要因素。智慧水箱在小雨、中雨和大雨时的溢流控制

效果较好,但在暴雨及以上降雨条件下,降雨径流量过大,智慧水箱无法避免溢流发生。Dirckx 等^[40]发现,当年降雨量增加 6%~7%,智慧水箱的溢流率增加 3%~5%。虽然智慧水箱的径流调控效益随着降雨强度的增加呈下降趋势,但智慧水箱在暴雨及以上降雨条件下仍可发挥较强的径流调控功能。水箱容积为 80 m³,排放上限为 50% 的智慧水箱在暴雨及以上的降雨强度仍可将溢流率削减至 6%,溢流频率削减至 23%。因此,在进行智慧水箱的设计时,需结合当地的降雨特征,通过合理配置水箱容积与排放上限,优化径流调控效益。

4 结论

(1) 智慧水箱的雨水截留率与普通水箱相等,均随水箱容积的增大而增加。当水箱容积为 0~100 m³ 时,雨水截留率为 0~87%。

(2) 智慧水箱的溢流率低于普通水箱,且溢流率随着水箱排放上限的增大而减小。水箱容积为 0~100 m³,排放上限为 25%~100% 的智慧水箱溢流率比同容积的普通水箱低 0~19%。

(3) 智慧水箱的溢流频率低于普通水箱,且溢流频率随着水箱排放上限的增大而减小。水箱容积为 0~100 m³,排放上限为 25%~100% 的智慧水箱溢流频率比同容积的普通水箱低 0~13%。

(4) 智慧水箱的径流调控效益随降雨强度的增大而降低。当降雨强度由大雨增大至暴雨及以上时,水箱容积为 20 m³,排放上限为 50% 的智慧水箱溢流率由 24% 增加至 62%,溢流频率由 82% 增加至 100%。

综上,智慧水箱径流调控效益优于普通水箱,可以通过增加水箱容积和排放上限,降低强降雨条件对智慧水箱径流调控效益的影响。

参考文献 (References):

[1] 潘国艳,张翔,夏军.城市雨水径流的问题与处理综述[J].给水排水,2012,48(S1):113-117.
Pan G Y, Zhang X, Xia J. Review of urban stormwater runoff treatment[J]. Water and Wastewater Engineering, 2012,48(S1):113-117.

[2] 刘家宏,王浩,高学睿,等.城市水文学研究综述[J].科学通报,2014,59(36):3581-3590.
Liu J H, Wang H, Gao X R, et al. Summary of urban hydrology research[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(36):3581-3590.

[3] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):594-605.
Zhang J Y, Song X M, Wang G Q, et al. Development

- and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. Hydrological response to urbanization[J]. *Advances in Water Science*, 2014,25(4):594-605.
- [4] 朱正威.海绵城市的实践探索与韧性治理[J].*人民论坛*, 2021,723(32):74-77.
- Zhu Z W. Practical exploration and resilience management of sponge city[J]. *People's Tribune*, 2021,723(32):74-77.
- [5] Zhang S H, Zhang J J, Jing X E, et al. Water saving efficiency and reliability of rainwater harvesting systems in the context of climate change[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,196:1341-1355.
- [6] 王浩.城市化进程中水源安全问题及其应对[J].*给水排水*, 2016,52(4):1-3.
- Wang H. Problems and countermeasures of water source safety in the process of urbanization [J]. *Water and Wastewater Engineering*, 2016,52(4):1-3.
- [7] 井雪儿,张守红.北京市雨水收集利用蓄水池容积计算与分析[J].*水资源保护*, 2017,33(5):91-97.
- Jing X E, Zhang S H. Volume calculation and analysis of rainwater harvesting and utilization reservoir in Beijing[J]. *Water Resources Protection*, 2017,33(5):91-97.
- [8] 岳桐霞.降雨和用水变化对城市雨水收集利用系统最优容积影响研究[D].北京:北京林业大学,2021.
- Yue T J. Impacts of rainfall and water demand on optimal tank size of rainwater harvesting system[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2021.
- [9] Notaro V, Liuzzo L, Freni G. Reliability analysis of rainwater harvesting systems in southern Italy[J]. *Procedia Engineering*, 2016,162:373-380.
- [10] Palla A, Gnecchi I, La Barbera P. The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017,191:297-305.
- [11] Zhang X Q, Hu M C, Chen G, et al. Urban rainwater utilization and its role in mitigating urban waterlogging problems: A case study in Nanjing, China[J]. *Water Resources Management*, 2012,26(13):3757-3766.
- [12] Li Y, Huang Y, Ye Q, et al. Multi-objective optimization integrated with life cycle assessment for rainwater harvesting systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558:659-666.
- [13] Melville-Shreeve P, Ward S, Butler D. Rainwater harvesting typologies for UK houses: A multi criteria analysis of system configurations[J]. *Water*, 2016,8(4):129.
- [14] Campisano A, Butler D, Ward S, et al. Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives[J]. *Water Research*, 2017, 115: 195-209.
- [15] Litofsky A L E, Jennings A A. Evaluating rain barrel storm water management effectiveness across climatology zones of the United States[J]. *Journal of Environmental*, 2014,140(4), DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000815.
- [16] Almeida A P, Liberalesso T, Silva C M, et al. Dynamic modelling of rainwater harvesting with green roofs in university buildings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,312(1), DOI:10.1016/j.jclepro.2021.127655.
- [17] Jones M P, Hunt W F. Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010,54(10): 623-629.
- [18] Ward S, Memon F A, Butler D. Performance of a large building rainwater harvesting system[J]. *Water Research*, 2012,46(16):5127-5134.
- [19] Ghaffarianhoseini A, Tookey J, Ghaffarianhoseini A, et al. State of the art of rainwater harvesting systems towards promoting green built environments: A review[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016,57(1):95-104.
- [20] Semaan M, Day S D, Garvin M, et al. Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: A systematic literature review[J]. *Resources, Conservation & Recycling*: X, 2020,6:100033.
- [21] Xu W D, Fletcher T D, Burns M J, et al. Real time control of rainwater harvesting systems: The benefits of increasing rainfall forecast window [J]. *Water Resources Research*, 2020,56(9):e2020WR027856.
- [22] Oberascher M, Zischg J, Palermo S A, et al. Smart rain barrels: Advanced LID management through measurement and control[J]. *Green Energy and Technology*, 2018:777-782.
- [23] Oberascher M, Kinzel C, Kastlunger U, et al. Integrated urban water management with micro storages developed as an IoT-based solution-The smart rain barrel [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021,139:105028.
- [24] Xu W D, Fletcher T D, Duncan H P, et al. Improving the multi-objective performance of rainwater harvesting systems using real-time control technology[J]. *Water*, 2018,10(2):w10020147.
- [25] Snir O, Friedler E. Dual benefit of rainwater harvesting: High temporal-resolution stochastic modelling[J]. *Water*, 2021,13(17):w13172415.
- [26] Roman D, Braga A, Shetty N, et al. Design and modeling of an adaptively controlled rainwater harvesting system[J]. *Water*, 2017,9(12),974:w9120974.
- [27] 北京市建筑设计研究院有限公司.海绵城市雨水控制与利用工程设计规范[S].北京市规划和自然资源委员

- 会 DB11/685, 2021.
- Beijing Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd.. Code for design of stormwater management and harvest engineering[S]. Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, DB11/ 685, 2021.
- [28] Jing X E, Zhang S H, Zhang J J, et al. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 126: 74-85.
- [29] Zhang S H, Zhang J J, Yue T J, et al. Impacts of climate change on urban rainwater harvesting systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 262-274.
- [30] Ali S, Zhang S H, Yue T J. Environmental and economic assessment of rainwater harvesting systems under five climatic conditions of Pakistan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120829.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)[M].北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC. Technical Guidelines for Sponge City construction-Construction of Rainwater System for Low Impact Development(Trial) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [32] Imteaz M A, Ahsan A, Shanableh A. Reliability analysis of rainwater tanks using daily water balance model: Variations within a large city[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 77: 37-43.
- [33] Sample D J, Liu J. Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 75: 174-194.
- [34] Okoye C O, Solyali O, Akintuğ B. Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 104: 131-140.
- [35] Liang R, Di Matteo M, Maier H, et al. Real-time, smart rainwater storage systems: Potential solution to mitigate urban flooding[J]. *Water*, 2019, 11(12): 2428; w11122428.
- [36] Parker E A, Grant S B, Sahin A. Can smart stormwater systems outsmart the weather? Stormwater capture with real-time control in southern California[J]. *Acs Est Water*, 2022, 2(1): 10-21.
- [37] Sefton C, Sharp L, Quinn R, et al. The feasibility of domestic raintanks contributing to community oriented urban flood resilience[J]. *Climate Risk Management*, 2022, 35: 100390.
- [38] Xu W D, Burns M J, Cherqui F, et al. Enhancing stormwater control measures using real-time control technology: A review[J]. *Urban Water Journal*, 2020, 18(2): 101-114.
- [39] Behzadian K, Kapelan Z, Mousavi S J, et al. Can smart rainwater harvesting schemes result in the improved performance of integrated urban water systems [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(20): 19271-19282.
- [40] Dirckx G, Korving H, Bessembinder J, et al. How climate proof is real-time control with regard to combined sewer overflows?[J]. *Urban Water Journal*, 2017, 15(6): 1-8.

(上接第 221 页)

- [25] 郭倩汝, 许彦红, 杨旭, 等. 昆明市海口林场栎类林分枯落物层及土壤层水源涵养功能的研究[J]. *西南林业大学学报: 自然科学版*, 2021, 41(4): 136-143.
- Guo Q R, Xu Y H, Yang X, et al. Study on water conservation function of litter layer and soil layer of oak stand in Haikou Forest Farm of Kunming[J]. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2021, 41(4): 136-143.
- [26] Zhao L, Hou R, Fang Q. Differences in interception storage capacities of undecomposed broad-leaf and needle-leaf litter under simulated rainfall conditions [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 446(8): 135-142.
- [27] Sun J, Yu X, Wang H, et al. Effects of forest structure on hydrological processes in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561(6): 187-199.
- [28] Liu X, Feng Y, Liu P, et al. Soil moisture dominated the temporal dynamics of litter moisture content in subtropical forests: A 7-year observation in south China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 41(6): 101102-101112.
- [29] Kucza J. Laboratoryjne badania zatrzymywania wody w poziomach organicznych i mineralnych gleb wybranych dolnoreglowych drzewostanow swierkowych w Beskidzie Slaskim. Czesc I. Wplyw dlugosci czasu przesychnania probki organicznej na jej zdolnosc zatrzymywania wody [J]. *Acta Agraria Et Silvestria. Series Silvestris*, 2003, 41(5): 39-58.