

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.05.016

北京市雨水收集利用蓄水池容积计算与分析

井雪儿^{1,2}, 张守红^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要:基于北京市1984—2013年的日降雨资料,以北京林业大学林业楼及其周边绿地为研究区,设置3种用水情景(冲厕、绿地灌溉及冲厕+绿地灌溉),采用连续模拟法,分别绘制3种用水情景下雨水收集利用工程的雨水截留率、自来水替代率、供水保证率以及效益费用比变化曲线,并通过综合分析这些曲线的变化特征确定雨水蓄水池最佳设计容积($60 \sim 82 \text{ m}^3$)。同时采用设计暴雨法计算1~5年不同重现期的蓄水池设计容积($77 \sim 248 \text{ m}^3$)。结果表明,连续模拟法计算过程相对复杂,但可用于综合衡量雨水收集利用工程的雨洪管理效益,以及缓解水资源短缺效益、供水可靠性及经济可行性分析。

关键词:雨水收集利用;设计暴雨法;连续模拟法;雨水截留率;供水保证率;效益费用比

中图分类号:TU991.34

文献标识码:A

文章编号:1004-6933(2017)05-0091-07

Volume calculation and analysis of rainwater collection and utilization reservoir in Beijing

JING Xueer^{1,2}, ZHANG Shouhong^{1,2}

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

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

Abstract: In this study, based on the daily rainfall data of Beijing from 1984 to 2013, the Forestry Building and the surrounding lawns in the main campus of Beijing Forestry University are chosen as the study area, three types of rainwater usage scenarios (i. e., flushing toilets inside the building, irrigating lawns around the building and combination of flushing the toilets and irrigating the lawns) are set, the continuous simulation approach is applied to draw the variation curves of rainfall interception rate, tap water replacement rate, probability of water supply and cost-benefit rate for these rainwater collection and utilization projects under the said three kinds of rainwater usage scenarios. Then the optimal design capacity ($60 \sim 82 \text{ m}^3$) of the rainwater storage reservoir is determined by comprehensively analyzing the change features of these curves. Meanwhile, the design storm approach is also applied to calculate the design storage capacities of the reservoir for 1~5 years of different recurrence interval. Comparison of the two design approaches shows that the continuous simulation approach can be used to comprehensively measure stormwater management effects, effects of relieving water resources shortage, water supply reliability as well as economic feasibility analysis of these rainwater collection and utilization projects, though its computation process is relatively more complex.

Key words: rainwater collection and utilization; design storm approach; continuous simulation approach; rainfall interception rate; probability of water supply; benefit-cost ratio

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(YX2015-18);国家自然科学基金(51609004)

作者简介:井雪儿(1993—),女,硕士研究生,研究方向为雨水控制与利用、水土保持。E-mail:jingxueer0323@163.com

通信作者:张守红,副教授,博士。E-mail:zhangs@bjfu.edu.cn

我国水资源总量丰富,但时空分布不均匀,人均水资源量不足世界人均水平的 1/3,属严重缺水国家之一。近年来,城镇化进程加快,城市人口增加,需水量也随之升高,进而改变了城市水资源供需关系并影响城市供水安全^[1]。中国环境与发展国际合作委员会报告指出,全国 600 多个城市中存在供水不足的城市有 400 多个,比较严重的缺水城市有 110 个。城市快速扩张的同时也深刻改变了下垫面条件和水文机制^[2],导致城市内涝积水等问题^[3]。水资源短缺、雨水资源浪费和内涝积水等问题同时存在,严重制约城市生态环境改善和可持续发展。为解决这些问题,我国借鉴低影响开发(low impact development, LID)模式^[4-5],提出并推广海绵城市建设理念^[6]。作为海绵城市和 LID 模式的重要措施之一,雨水收集利用具有缓解城市水资源短缺、削减径流及洪峰流量、减轻排水系统压力等效益^[7]。

在雨水收集利用系统的设计过程中,如何综合考虑雨水收集场地的气候和下垫面条件、用水特征和当地的经济技术水平等因素,合理确定雨水蓄水池的容积,往往是雨水收集利用工程可行与否的关键。以往关于雨水收集利用的研究主要通过雨水利用效率以及替代自来水的经济效益分析来确定雨水蓄水池的最佳容积^[8-9],缺乏对雨水收集利用系统的城市雨洪管理效益、供水能力及可靠性的综合分析,也缺乏对不同设计方法计算结果的对比研究。目前,常用的蓄水池容积设计方法可分为两类,分别是设计暴雨法和连续模拟法^[10]。设计暴雨法根据特定重现期的设计暴雨计算蓄水池容积。胡良明等^[11]采用该方法以郑州市第一中学雨水利用为背景,对蓄水池容积计算行了实例分析,连续模拟法根据逐日来水量和用水量的变化曲线计算蓄水池容积。基于连续模拟法,潘志辉等^[8-9]分别探讨了深圳和天津的雨水蓄水池容积的设计计算。Guizani 等^[12-13]也采用该方法分别研究了沙特阿拉伯、美国以及意大利的雨水收集系统的设计规模及其经济可行性。这两种方法考虑的因素、需要的数据资料以及计算过程不尽相同,因而计算结果会存在较大差异。除以上两种方法外,概率解析法^[14]也可用于雨水蓄水池容积计算,但该方法需要建立在特定区域降雨特征的概率密度分布函数基础之上,应用区域范围相对受限。

北京市人口密集,降雨量年内分配不均,水资源短缺问题突出,且雨季容易形成城市内涝。本文基于北京市 1984—2013 年的日降雨资料,设置冲刷、

绿地灌溉及冲刷 + 绿地灌溉共 3 种用水情景,分别采用设计暴雨法和连续模拟法计算雨水蓄水池容积,并采用雨水截留率、自来水替代率、供水保证率以及费用效益比等指标,综合分析雨水收集利用系统的经济效益、雨洪管理效益和供水的可靠性,确定蓄水池最佳容积。以期城市雨水收集利用系统的水文设计提供科学参考。

1 研究区概况

研究区位于北京市海淀区北京林业大学清华东路校区,包括林业楼及其周边绿地,总占地面积为 4 180 m²,其中屋顶面积为 1 800 m²,周围绿地面积为 2 200 m²,硬化道路约占 180 m²。林业楼以教学和办公为主要功能,共有办公室、实验室和教室 136 间,服务于教职工与师生约 300 名。雨水收集利用的水源为弃除初期径流后的屋顶雨水径流。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

采用的北京气象站 1984—2013 年逐日降雨量数据来源于“中国气象科学数据共享服务网”(http://cdc.nmic.cn/home.do)。月平均降雨量如图 1 所示,由图 1 可见,降雨主要集中于 6—8 月,年内分配极不均匀。

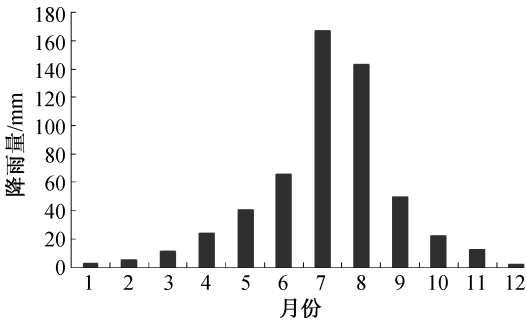


图 1 北京 1984—2013 年月平均降雨量

2.2 研究方法

2.2.1 设计暴雨法

设计暴雨法根据设计暴雨计算汇水区域的径流量,将径流量扣除初期径流弃流量所得到的可收集雨水量作为雨水蓄水池的设计容积。该方法使用简便,需要的数据量小,只需确定设计暴雨的降雨量、汇水面积、径流系数和初期弃流量等参数即可得到设计容积^[15]。具体计算公式为

$$V = \frac{(h_y - \delta)\psi F}{1\,000} \quad (1)$$

式中: V 为蓄水池设计容积, m³; h_y 为设计暴雨降雨

量,mm; δ 为初期雨水弃流量,mm; ψ 为径流系数; F 为汇水面积, hm^2 。

2.2.2 连续模拟法

连续模拟法根据水量平衡原理,利用长时间序列的逐日可收集雨水量和用水量情景,通过连续模拟计算获得蓄水池设计容积^[16]。城市雨水蓄水池一般为全封闭式,蒸发和渗漏损失微小,因此,雨水蓄水池的水量平衡方程可表示为

$$R_t = \begin{cases} Q_t & Q_t + S_t - D_t \leq V \\ V - S_t + D_t & Q_t + S_t - D_t > V \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_t 为蓄水池第 $t(t \geq 1)$ 天拦蓄的雨水量, m^3 ; Q_t 为第 t 天汇水区可收集的雨水量, m^3 ; S_t 为蓄水池在第 t 天开始时的储水量, m^3 ; D_t 为第 t 天的需水量(可根据实际需水情况或相关设计规范确定), m^3 。

Q_t 可按式计算:

$$Q_t = \begin{cases} 0 & H_t \leq \delta \\ 10\psi(H_t - \delta)F & H_t > \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中, H_t 为第 t 天的降雨量,mm。

蓄水池的储水量(S_t)可按式(4)计算:

$$S_t = \begin{cases} 0 & Q_{t-1} + S_{t-1} - D_{t-1} \leq 0 \\ Q_{t-1} + S_{t-1} - D_{t-1} & 0 < Q_{t-1} + S_{t-1} - D_{t-1} \leq V \\ V & Q_{t-1} + S_{t-1} - D_{t-1} > V \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_{t-1} 为蓄水池在第 $t-1$ 天开始时的储水量, m^3 ; Q_{t-1} 为第 $t-1$ 天汇水区可收集的雨水量, m^3 ; D_{t-1} 为第 $t-1$ 天的需水量, m^3 。

雨水截留率 η 是指在一定时期内蓄水池积蓄的总雨水量占汇水区产生的径流总量的比值。 η 是衡量雨水收集利用工程缓解城市内涝问题功效的重要指标之一,可由式(5)计算:

$$\eta = \frac{\sum R_t}{10\psi F \sum H_t} \cdot 100\% \quad (5)$$

自来水替代率 W 是指在一定时期内蓄水池积蓄的总雨水量(蓄积雨水将全部用于替代自来水使用)与该时期内的总需水量的比值。 W 是衡量雨水收集利用工程缓解城市水资源短缺问题功效的一个重要指标,可由式(6)计算:

$$w = \frac{\sum R_t}{\sum D_t} \cdot 100\% \quad (6)$$

供水保证率 g 是指在一定时期内雨水收集利用系统能够充分满足研究区需水量的时间概率。 g 是评价雨水收集利用工程供水能力和可靠性的重要指

标,计算公式如下:

$$g = \frac{N - U}{N} \cdot 100\% \quad (7)$$

式中: N 为纳入计算期的总天数, d ; U 为蓄水池蓄水量无法满足当日需水量($Q_t + S_t < D_t$)的天数, d 。

2.3 经济效益分析

经济效益是衡量雨水收集利用工程是否可行的决定性因素之一。效益费用比(benefit-cost ratio)指建设项目在计算期内效益现值(V_{TB})与费用现值(V_{P})的比值,可用于衡量雨水收集利用工程的经济效益。其计算公式为

$$V_{\text{P}} = I + C \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (8)$$

$$V_{\text{TB}} = B \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (9)$$

$$R_{\text{BC}} = \frac{V_{\text{TB}}}{V_{\text{P}}} \quad (10)$$

式中: R_{BC} 为效益费用比,元; I 为固定总投资,元; C 为年运行成本,元; B 为年均总效益,元; i 为社会折现率; n 为工程使用寿命,年。

$R_{\text{BC}} \geq 1$,表明项目的效益现值优于费用现值,资源配置经济效率达到可接受水平。参照相关文献,雨水蓄水池设施的使用年限为30年^[17],折旧残值为零,社会折现率为8%^[18-19]。

2.3.1 经济收益分析

左建兵等^[20]根据城市水文学原理和经济学原理,将雨水收集利用工程的效益划分为直接使用价值、间接使用价值、选择价值和存在价值4大类。在本文主要考虑的城市雨水利用效益包括:节约自来水的收益(B_1),节水增加的国家财政收入(B_2),消除污染排放而减少的社会损失(B_3),节省城市排水系统设施的运行费用(B_4)。具体的计算方法为

$$B = P_{\text{tap}} V_{\text{r}} + P_{\text{s}} V_{\text{r}} + \frac{1}{\alpha} P_{\text{a}} V_{\text{u}} + P_{\text{n}} V_{\text{r}} \quad (11)$$

式中: P_{tap} 为自来水水价,元/ m^3 ,北京高校执行2014年调整后的水价,自来水水价(未包含污水处理费)为4.64元/ m^3 ; V_{r} 为雨水收集利用工程使用年限内雨水利用总量, m^3 ; P_{s} 为每缺水1 m^3 所造成的经济损失,元/ m^3 ;在考虑南水北调的情况下,2010年北京市缺水量为1.62亿 m^3 ,缺水造成的经济损失的期望值达23.84亿元,据此计算北京市每缺水1 m^3 ,所造成的经济损失14.70元/ m^3 ^[19]; P_{a} 为污水处理费,元/ m^3 ,北京高校的污水处理费为1.36元/ m^3 ; α

为环境治理的投入产出比,据分析,为消除污染每投入 1 元可以减少环境损失 3 元,即投入产出比 $\alpha = 0.33$; V_u 为排水量, m^3 , 据统计,排水量在数值上等于拦蓄雨水量的 80%; P_u 为单方水的管网运行费用,元/ m^3 ,据分析,雨水利用可以减少雨水向管网排放量,减轻市政管网的压力,水的管网运行费用约为 0.08 元/ m^3 ^[20]。

除了以上经济收益外,雨水收集利用工程的经济收益还体现在回补地下水的收益,雨水利用提高城市防洪能力而降低排水系统扩建费用,改善城市生态环境带来的收益以及减少地面沉降灾害损失等,因这些收益较难精确估算而常被忽略。

2.3.2 成本投入分析

雨水收集利用工程的成本主要包括固定资产的投资 I 以及运行成本 C 两部分。年运行成本 C 包括动力费 C_1 、药剂消耗费 C_2 、维护管理费及其他费用 C_3 。雨水利用工程总费用见表 1^[21]、表 2^[10]。

表 1 雨水收集利用工程固定资产投资费用				
项目	单位	数量	单价/元	总价/元
雨水蓄水池	m^3	V	1 500	1 500 V
管道配件及其他设备	m	200	50	10 000
加压泵	台	1	2 500	2 500

注:当回用雨水的方向为绿地灌溉时,无管道配件及其他设备费用。

表 2 雨水收集利用工程年运行费用 ^[10]				
费用类别	单位	数量	单价/元	总价/元
动力费	元/($kW \cdot h$)	3 660	0.488 7	1 788
药剂费	m^3 /元	V_r	0.10	0.1 V_r
维护费及其他费用	m^3 /元	V_r	0.65	0.65 V_r

本工程的雨水收集利用工程总费用($C_{总}$)模型:
 $C_{总} = I + C = 14\,288 + 1\,500V + 0.75V_r$ (12)

2.4 用水情景设置

水泥或沥青屋面雨水污染含量低、集水效率高,是雨水收集利用的重要汇水区域^[22]。徐军红等^[23]研究表明,屋面雨水水质能够满足《城市污水再生利用、城市杂用水水质》的要求,可以用于冲厕、灌溉草坪、洗车、浇洒道路以及景观用水等。根据研究区特征,收集屋顶雨水的回用途径为冲厕和绿地灌溉两种。鉴于这两种雨水回用途径可设置如下 3 种用水情景。

a. 冲厕用水。北京市《雨水控制与利用工程设计规范》^[24]规定办公楼、教学楼每人每天冲厕用水量为 15~20 L。学校采用节水型马桶,每天冲厕用水量为 15 L。据此,可估算林业楼(300 名师生)冲厕需水量为 4.5 m^3 /d。

b. 绿地灌溉用水。林业楼周围绿地为冷季型草坪,面积约 2 200 m^2 ,采用二级养护。参照北京市《草坪节水灌溉技术规定》^[25],灌水定额取平均值 0.020 m^3/m^2 ,可计算得到研究区不同月份的日均绿地灌溉需水量^[25](表 3)。其中,1—2 月、12 月天气寒冷,无需灌溉,灌水定额为零。

c. 综合用水。综合用水情景是指将收集的屋顶雨水同时回用于楼内冲厕及周边绿地灌溉。

表 3 冷季型草坪逐月灌水次数、灌水定额和灌水周期				
月份	灌水定额/ ($m^3 \cdot m^{-2}$)	二级养护		日平均 灌水定额/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)
		灌水次数	灌水周期/d	
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0.015~0.025	1	15~20	1.42
4	0.015~0.025	4	6~8	5.87
5	0.015~0.025	6	4~5	8.52
6	0.015~0.025	5	5~6	7.34
7	0.015~0.025	2	10~15	2.84
8	0.015~0.025	2	10~15	2.84
9	0.015~0.025	3	8~10	4.4
10	0.015~0.025	1	15~20	1.42
11	0.015~0.025	1	15~20	1.42
12	0	0	0	0

3 实例分析

3.1 利用设计暴雨法计算蓄水池设计容积

北京市《雨水控制与利用工程设计规范》规定雨水收集设施的重现期宜按 1~2 a 取值。根据实际需要,也可选择更高设计标准(如 3~5 a)。根据当地降雨数据,可分析计算不同频率的设计暴雨降雨量。前人研究表明,屋面径流系数较大,一般可取值为 0.9^[9,11,26]。车武等^[27]根据北京市降雨曲线和水质变化曲线确定屋顶雨水收集利用的初期弃流量宜采用 2 mm。根据式(1),可计算得到不同设计标准的蓄水池设计容积(表 4)。

表 4 不同重现期下的蓄水池设计容积		
重现期/a	最大 24 h 降雨量/ mm ^[24]	蓄水池设计容积/ m^3
1	45	77
2	81	144
3	108	189
5	141	248

3.2 利用连续模拟法计算蓄水池设计容积

基于北京气象站 1984—2013 年逐日降雨资料,采用与设计暴雨法相同的径流系数和初期弃流量,根据式(2)~(4)进行雨水蓄水池日水量平衡的连续模拟。分别采用式(5)~(8)计算 3 种用水情景

下不同蓄水池容积所对应的雨水截留率、自来水替代率、供水保证率和效益费用比,并绘制它们的变化曲线。综合分析这4条曲线的变化特征,确定各用水情景的蓄水池最佳设计容积。

3.2.1 冲厕用水

当收集屋顶雨水仅用于教学楼冲厕时,雨水收集利用工程的雨水截留率、自来水替代率、供水保证率以及效益费用比随蓄水池容积的变化曲线见图3。雨水收集系统的效益费用比随蓄水池容积的增加呈现出先增加再减小的变化规律。当蓄水池容积为5~75 m³时,效益费用比大于1,表明雨水收集利用系统经济收益现值优于费用现值,资源配置经济效率达到了可接受的水平。其中,当蓄水池容积为14 m³,效益费用比达到最大值约1.66,表明此时经济效率达到最高水平。因此,如果仅考虑经济效益,该用水情景下蓄水池的容积应不大于75 m³,最佳经济容积为14 m³。

如图3所示,冲厕用水情景下,雨水截留率、自来水替代率和供水保证率随着蓄水池容积的增加而增加,但是增加的速度逐渐减缓。而当蓄水池容积大于67 m³时,以上3个指标增长缓慢。综合考虑雨水收集利用的雨洪管理效益、供水可靠性和经济效益,在该用水情景下,雨水蓄水池的最佳设计容积为70 m³,此时的效益费用比为1.08,雨水截留率、自来水保证率和供水保证率分别为57.22%、30.99%和29.02%。

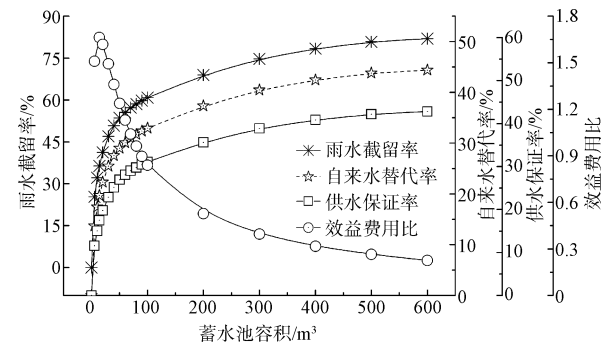


图3 冲厕用水情景下各指标变化曲线

3.2.2 绿地灌溉

当收集的屋顶雨水仅用于灌溉绿地时,雨水收集利用工程的雨水截留率、自来水替代率、供水保证率以及效益费用比曲线见图4。当蓄水池容积小于70 m³时,效益费用比大于1,其中,当蓄水池容积为11 m³,效益费用比达到最大值1.94。因此,仅考虑经济效益情况下,该用水情景下雨水蓄水池的容积应不大于70 m³,最佳经济容积为10 m³。当蓄水池容积大于60 m³时,以上3个指标增长缓慢。因此,

综合考虑雨洪管理效益、供水可靠性和经济效益,在该用水情景下,雨水蓄水池的最佳设计容积为60 m³,此时的效益费用比为1.11,雨水截留率、自来水保证率和供水保证率分别为50.08%、40.50%和34.91%。

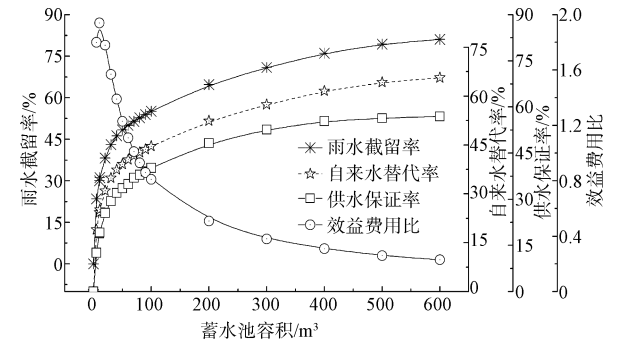


图4 绿地灌溉用水情景下各指标变化曲线

3.2.3 综合用水

在综合用水情景(冲厕+绿地灌溉)下,雨水截留率、自来水替代率、供水保证率以及效益费用比曲线见图5。当蓄水池容积小于95 m³时,效益费用比大于1,其中,当蓄水池容积为9 m³,效益费用比达到最大值2.05。因此,仅考虑经济效益情况下,该用水情景下雨水蓄水池的容积应不大于95 m³,最佳经济容积为9 m³。当蓄水池容积大于80 m³时,雨水截留率、自来水替代率和供水保证率增长缓慢。综合考虑雨洪管理效益、供水可靠性和经济效益,在该用水情景下,雨水蓄水池的最佳设计容积为82 m³,此时的效益费用比为1.10,雨水截留率、自来水保证率和供水保证率分别为66.94%、21.71%和17.48%。

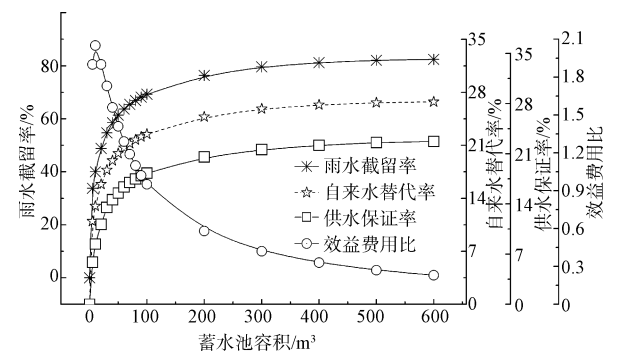


图5 综合用水情景下各指标变化曲线

3.3 两种方法对比分析

设计暴雨法仅把特定频率或重现期的设计暴雨作为设计参考,将可收集的雨水量作为蓄水池容积设计的唯一考量因素,未考虑降雨量和用水量的波动变化,计算方法简便。但该方法无法确定不同用水情景下雨水收集系统的长期平均雨水截留效益、自来水替代率、供水保证率以及效益费

用比等指标。根据设计暴雨法计算得到 1 ~ 5 a 重现期的雨水池设计容积 (77 ~ 248 m³) 基本上大于采用连续模拟法得到的不同用水情景下的最佳设计容积 (60 ~ 82 m³)。因此,采用设计暴雨法设计的雨水蓄水池规模相对偏大,雨水收集利用系统的利用效率相对较低。

连续模拟法基于连续降雨数据,同时考虑降雨量和用水量的波动变化,需要数据量大,计算过程相对复杂。但基于该方法,可计算得到雨水收集利用工程的雨水截留率、自来水替代率、供水保证率以及效益费用比等指标,这些指标可用于衡量雨水收集利用工程的雨洪管理效益,进行缓解水资源短缺效益、供水可靠性及经济可行性分析。通过对这些指标的综合分析,可以确定在不同雨水回用途径或情景下的雨水蓄水池最佳设计容积。

4 结论与展望

雨水收集利用有利于缓解城市水资源短缺和加强城市雨洪管理。雨水蓄水池容积计算是雨水收集利用水文设计的关键环节。本文以北京市海淀区北京林业大学林业楼及其周围绿地为例,分不同用水情景(冲厕、绿地灌溉和冲厕 + 绿地灌溉),探讨了雨水蓄水池设计容积的计算方法,得到以下结论:

a. 连续模拟法数据需求量大,计算过程相对复杂,但可对雨水收集利用工程进行雨洪管理、自来水替代、供水可靠性及经济效益等综合分析,确定不同雨水回用途径或情景下雨水蓄水池最佳设计容积。

b. 设计暴雨法数据需求小、计算简便,但无法对雨水收集利用工程进行雨洪管理、自来水替代、供水可靠性及经济效益等综合分析,所得的雨水蓄水池设计容积较连续模拟法确定的最佳容积偏大。

经济效益是衡量雨水收集利用工程规模是否可行的决定性因素之一。本文关于雨水收集利用系统的经济效益分析仅考虑了节约自来水的收益,节水增加的国家财政收入、消除污染排放而减少的社会损失、节省城市排水系统设施的运行费用尚未考虑。由于数据获取难度限制,没有考虑雨水收集利用回补地下水的收益,提高城市防洪能力而降低蓄排水系统扩建等费用。在内涝频繁发生的新形势下,回补地下水,减少地面沉降所带来的生态效益,以及降低城市排水系统改建/扩建费用是城市雨水收集利用经济和社会效益的重要体现。在本文研究的基础

上,定量并货币化衡量雨水收集利用系统的雨洪管理、自来水替代及供水可靠性的综合效益,可为海绵城市建设提供重要科学参考。

参考文献:

[1] ROGERS P. Facing the freshwater crisis[J]. Scientific American, 2008, 299: 46-53.

[2] SURIYA S, MUDGA B V. Impact of urbanization on flooding: the Thirusoolam subwatershed; a case study [J]. Journal of Hydrology, 2012, 412 /413: 210-219.

[3] GRANT S B, SAPHORES J D, FELDMAN D L, et al. Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability[J]. Science, 2012, 337(6095): 681-686.

[4] PGC (Prince George’s County, Maryland). Low impact development design strategies-an integrated design approach[S]. Prince George’s County: MD Department of Environmental Resources, Watershed Protection Branch, MD Department of Environmental Protection, Landover, MD, 1993.

[5] U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). Low impact development (LID), A literature review [R]. Washington D C: Office of Water, 2000.

[6] 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行) [S]. 北京: 住房城乡建设部, 2014.

[7] LITOFISKY A, JENNINGS A A. Evaluating rain barrel storm water management effectiveness across climatology zones of the United States [J]. Journal of Engineering, 2014, 140(4): 4001-4009.

[8] 潘志辉, 鲁梅, 王莉芸, 等. 深圳市雨水蓄水池容积设计计算探讨[J]. 给水排水, 2012, 38(10): 43-46. (PAN Zhihui, LU Mei, WANG Liyun, et al. Study on calculation of water tank volume design of Shenzhen [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(10): 43-46. (in Chinese))

[9] 邢国平, 李爽, 周建芝, 等. 基于日水量平衡模型的城市小区雨水池计算分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 120-123. (XING Guoping, LI Shuang, ZHOU Jianzhi, et al. Calculation and analysis of rainwater tank in urban district based on the model of daily water balance [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(2): 120-123. (in Chinese))

[10] GB 50400—2006 建筑与小区雨水利用工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[11] 胡良明, 李逸之, 樊思熠. 城市雨水蓄水池容积计算与研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(4): 22-24. (HU Liangming, LI Yizhi, FAN Siyi. Study on the volume derermination of rainwater cistern in cites [J]. Journal of North China Institute of Water

Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33(4): 22-24. (in Chinese))

[12] GUIZANI M. Storm water harvesting in Saudi Arabia: a multipurpose water management alternative [J]. Water Resources Management, 2016,30(5):1819-1833.

[13] LIUZZO L, NOTARO V, FRENI G. A reliability analysis of a rainfall harvesting system in Southern Italy [J]. Water, 2016, 8(1): 1-20.

[14] GUO Y, BRIAN W B. Sizing of rainwater storage units for green building application [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12: 197-205.

[15] 张兆祥, 杨帆, 黄咏洲. 城市雨水资源利用及规划 [C]//中国城市规划学会. 2012 中国城市规划年会论文集. 昆明:中国城市规划学会, 2012.

[16] IMTEAZ M A, AHSAN A, SHANABLEH A. A reliability analysis of rainwater tanks using daily water balance model: variation within a large city [J]. Resources Conservation & Recycling, 2013, 77(2): 37-43.

[17] 李俊奇, 车武, 孟光辉, 等. 城市雨水利用方案设计与技术经济分析[J]. 给水排水, 2001, 27(2): 25-28. (LI Junqi, CHE Wu, MENG Guanghui, et al. Design and technical economic analysis of urban rainwater utilization Project [J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27(2): 25-28. (in Chinese))

[18] 国家计委, 建设部. 建设项目经济评价方法与参数 [M]. 3 版. 北京: 中国计划出版社, 2008.

[19] 韩宇平, 阮本清. 水资源短缺风险经济损失评估研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1253-1257. (HAN Yuping, RUAN Benqing. Economic loss assessment of shortage risk of water resources [J]. Journal of Hydraulics Engineering, 2007, 38(10): 1253-1257. (in Chinese))

[20] 左建兵, 刘昌明, 郑红星. 城市雨水利用的成本效益分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1295-1302. (ZUO Jianbin, LIU Changming, ZHENG Hongxing. Cost-benefit analysis of urban rainwater harvesting: a case study of Beijing [J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1295-1302. (in Chinese))

[21] 车伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[22] ZHANG Qianqian, WANG Xiaoke, HOU Peiqiang, et al. Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 132C: 178-187.

[23] 徐军红, 刘舜. 屋面雨水收集回用的应用分析[J]. 给水排水, 2010(增刊 2): 117-119. (XU Junhong, LIU Shun. Application analysis of roof rainwater harvesting [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010(sup2): 117-119. (in Chinese))

[24] DB11/685—2013 雨水控制与利用工程设计规范[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2013.

[25] DB11/T 349—2006 草坪节水灌溉技术规定[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2006.

[26] 胡茂川, 张兴奇, 陈刚. 城市屋面雨水利用潜力分析: 以南京市河西地区某小区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012(4): 489-493. (HU Maochuan, ZHANG Xingqi, CHEN Gang. Analysis of potential of urban roof rainwater utilization: a case study on a community of Hex in Nanjing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012(4): 489-493. (in Chinese))

[27] 车武, 汪慧珍, 任超, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(6): 57-61. (CHE Wu, WANG Huizhen, REN Chao, et al. Study on the pollution and utilization of rainwater in the roof of Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(6): 57-61. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-12-26 编辑: 徐 娟)

(上接第 52 页)

[38] 王丽娟, 张宏伟. 供水管网漏失模型研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(9): 68-70. (WANG Lijuan, ZHANG Hongwei. Study on leakage loss model for water distribution network[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(9): 68-70. (in Chinese))

[39] 涂敏. 供水管网在线监测漏失定位模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[40] MOUNCE S R, BOXALL J B, MACHELL J. Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136(3): 309-318.

[41] 韩阳, 王威. 供水管网实时故障诊断的支持向量机模型 [J]. 给水排水, 2007, 33(2): 109-112. (HAN Yang, WANG Wei. SVM based model for realtime diagnostic of water distribution network [J]. Water and Wastewater Engineering, 2007, 33(2): 109-112. (in Chinese))

[42] ANDRES J, PICAZO T, FRANCISCO G G, et al. Accounting for operating environments in measuring water utilities' managerial efficiency [J]. Service Industries Journal, 2009, 29(6): 761-773.

(收稿日期: 2016-09-05 编辑: 王 芳)