

# 降雨场次划分方法对降雨控制率的影响分析

张宇航<sup>1,2</sup>, 杨默远<sup>1</sup>, 潘兴瑶<sup>1</sup>, 宋磊<sup>3</sup>, 于磊<sup>1</sup>

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;  
3. 北京市水文总站, 北京 100089)

**摘要:** 年降雨总量控制率是海绵城市建设的主要考核指标,降雨场次划分方法是影响降雨总量控制率计算的重要因素。以北京城市副中心海绵城市试点区为例,系统分析了降雨场次划分方法对降雨总量和降雨场次控制率的影响作用规律。结果表明,最小降雨间隔时间是影响降雨场次划分结果的重要因素,随着最小降雨间隔时间的增加,小量级降雨事件与邻近降雨事件进行合并,增加了中等和强降雨事件的发生频率与降雨总量;降雨场次划分方法对降雨控制率的影响程度随设计降雨量的增加而减少,且对降雨总量控制率的影响程度高于对降雨场次控制率的影响程度;与《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中选取的日降雨数据相比,场次降雨数据更能反映实际的降雨特征,在最小降雨间隔时间取6 h和24 h时,日降雨数据计算得到的设计降雨量分别偏低19.81%和35.10%。因此,在实际的海绵城市规划设计和工程建设中,应收集短历时场次降雨数据用以计算设计降雨量,从而保证设计目标(径流总量控制率)与实际建设效果的一致性。

**关键词:** 海绵城市; 降雨总量控制率; 降雨场次控制率; 最小降雨间隔时间

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)13-0122-06

## Influence of Rainfall Division Method on Capture Ratio of Rainfall

ZHANG Yu-hang<sup>1,2</sup>, YANG Mo-yuan<sup>1</sup>, PAN Xing-yao<sup>1</sup>, SONG Lei<sup>3</sup>, YU Lei<sup>1</sup>

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Hydrographic Station of Beijing, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The volume capture ratio of annual rainfall is the main assessment index for the construction of sponge city, and the rainfall division method is an important factor affecting the volume capture ratio of annual rainfall. Taking the sponge city pilot area of Beijing sub-center as an example, the influence of rainfall division method on the volume capture ratio of rainfall and the event capture ratio of rainfall was systematically analyzed. It was found that the minimum interval of rainfall was an important factor affecting rainfall division results. With the increase of the minimum rainfall interval, small rainfall events were combined with adjacent rainfall events, which increased the occurrence frequency and the volume of moderate and heavy rainfall events. The influence of rainfall division method on the capture ratio of rainfall decreased with the increase of the designed rainfall volume, and its influence on the

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002、2017ZX07103-007); 北京市科委科技新星计划项目(Z161100004916085); 北京市科委重大项目(Z161100001116104)

**通信作者:** 杨默远 E-mail: ymoyuan@163.com

volume capture ratio of rainfall was much higher than the influence on the event capture ratio of rainfall. Compared with the daily rainfall data in *Sponge City Development Technical Guide: Low Impact Development*, the event data could better reflect the rainfall characteristics. When the minimum intervals of rainfall were 6 h or 24 h, the designed volume of rainfall calculated by daily rainfall data decreased by 19.81% and 35.10% respectively. Therefore, event rainfall data should be collected to calculate the designed volume of rainfall during the design and construction of sponge city, in order to guarantee the consistency of design goal (volume capture ratio of annual rainfall) and practical construction effect.

**Key words:** sponge city; volume capture ratio of rainfall; event capture ratio of rainfall; minimum interval of rainfall

2014年住建部下发了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(简称为《指南》),将径流总量控制作为各地低影响开发雨水系统构建的首要目标,并将年径流总量控制率作为海绵城市建设的主要考核目标。后经《指南》编制专家车伍教授等人解释,“年径流总量控制率”实为“年降雨总量控制率”,在工程实践中,该指标的落实是通过控制降雨产生的径流来实现的,同时达到控制径流污染的目标<sup>[1]</sup>。与美国环保署(USEPA)提出的降雨场次控制率指标不同<sup>[2]</sup>,《指南》以维持城市开发前自然水文状态为出发点,基于不少于30年的日降雨数据进行统计分析,得到降雨总量控制率与设计降雨量的对应关系。

随着人们对海绵城市理解的不断加深,以及实际建设经验的不断丰富,年径流总量控制率的内涵及计算方法的研究引起了大家的广泛讨论。王家彪等<sup>[3]</sup>对降雨控制模式进行了深入探讨,分别讨论了降雨总量控制和降雨场次控制的区别,指出降雨总量控制率不等于径流总量控制率,降雨控制需将降雨转换为径流后才能与径流控制对应,而降雨场次控制率等于径流场次控制率,其降雨控制与径流控制直接对应。李俊奇等<sup>[4]</sup>探析了极端降雨事件对年径流总量控制率和24h降雨场次控制率的影响规律,最后确定计算过程中极端降雨时间的最佳扣除比例。张建云等<sup>[5]</sup>认为海绵城市中径流控制效果与场次暴雨总量及时程分布有直接关系,根据地域降雨特征来设置径流控制指标更合理。

但从工程实践的角度来讲,无论是依据《指南》的降雨总量控制目标,还是USEPA的降雨场次控制目标,设计降雨量的计算依据均为场次降雨数据,因此与降雨场次的划分方法密切相关<sup>[6-7]</sup>。对于某一确定的历史降雨序列,不同的场次划分方法对应不

同的设计降雨量-降雨控制率曲线,从而导致不同的海绵城市建设规模和控制效果,因此,有必要深入研究场次降雨事件划分方法对降雨控制率的影响作用规律,从而在数据资料精度允许的条件下,合理计算降雨控制率。笔者以北京城市副中心海绵城市试点区为例,基于长序列场次降雨摘录数据,对比分析不同场次降雨划分方法(设置不同的最小降雨间隔时间和《指南》选用的逐日降雨数据)计算得到的场次降雨特性。在此基础上,识别不同场次降雨划分结果对降雨总量控制率和降雨场次控制率的影响作用规律,定量分析实际场次降雨数据和《指南》中采用的日降雨数据对降雨控制率计算结果的具体影响,研究成果能够为海绵城市建设目标的合理确定提供依据。

## 1 数据资料

以北京城市副中心海绵城市试点区为例,试点区位于北京市通州区,包括北京城市副中心行政办公区。数据资料为北京市水文部门提供的通州站场次降雨摘录数据,数据资料序列长度为65年(1951年—2016年)。为了验证数据资料的可靠性,将该降雨序列与《指南》选用的北京站日降雨数据(来源于中国气象科学数据共享服务网)进行了初步的对比分析,结果显示,两个数据序列的相关性较高,相关系数为0.87。由于通州站与北京站相距约18km,考虑到降雨的空间分布差异性,本研究所用数据资料可靠,且更能够反映研究区的实际降雨特性。

## 2 降雨场次划分结果

对于某一确定的历史降雨序列,降雨场次的划分方法不同,得到的划分结果也不同。目前在海绵城市建设中常用的降雨场次划分方法有两种:一是《指南》中采用的日降雨数据,即20时至次日20时内的累计降雨量;二是按照实际降雨过程进行划分,

其关键是最小降雨间隔时间( $T$ )的合理确定。相比较而言,以日降雨数据作为场次降雨数据是一种固定化的划分方法,较实际情况存在较大偏差。如图1所示<sup>[1]</sup>,仅在降水事件1的情形时,日降雨量和场次降雨量一致;当降雨历时超过24 h且降雨间隔时间 $t < T$ 时(降水事件2),1个连续的降雨场次被划分为3个独立的日降雨事件;同样地,对于降水事件3,1个连续的降雨场次被划分为2个独立的日降雨事件。因此,在数据资料的时间分辨率满足条件时(至少为小时降雨数据),按照最小降雨间隔时间进行降雨场次划分更为合理。

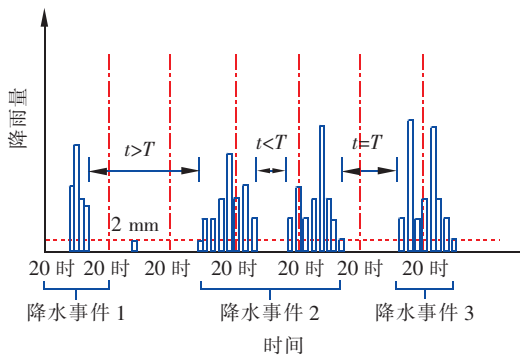


图1 场次降雨事件划分示意

Fig. 1 Schematic diagram of event rainfall division

两个降雨事件之间的最小降雨间隔时间( $T$ )可依据设施排空时间<sup>[1,8]</sup>、流域最大汇流时间<sup>[9-10]</sup>等因素确定。一般而言,城市流域(排水分区)的最大汇流时间在2 h左右,生物滞留设施的积水时间不超过6 h<sup>[11]</sup>,雨水渗透设施和湿塘的排空时间为12 h<sup>[7]</sup>,蓄水池的排空时间可以达到24 h<sup>[12]</sup>。基于上述分析,为充分对比不同划分方法得到的降雨场次特性差异,反映不同划分结果对降雨控制率-设计降雨量关系的影响作用规律,本研究中 $T$ 取值为1, 2, ..., 24 h。

根据《指南》的要求,认为场降雨量 $\leq 2$  mm的场次(一般不产生径流)为无效降雨, $> 2$  mm的场次为有效降雨。按照不同划分标准计算得到的总降雨场次、无效降雨场次和有效降雨场次数量如图2所示。可以看出,随着最小降雨间隔时间的增加,划分得到的总降雨场次数量不断减少。在 $1 \text{ h} < T < 6 \text{ h}$ 的区间内,无效降雨场次数量和总降雨场次数量的减少趋势相似且明显,有效降雨场次数量的减少不明显,因此,总降雨场次数量的减少主要因为无效降雨场次数量的减少。6 h是最小降雨间隔时间对

降雨场次数量的影响阈值,当 $T > 6 \text{ h}$ 时,其对有效降雨场次数量的影响不显著。

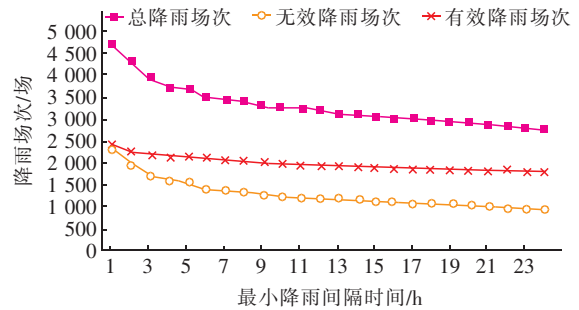
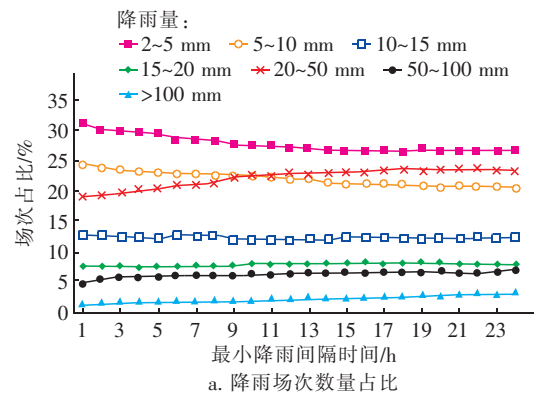


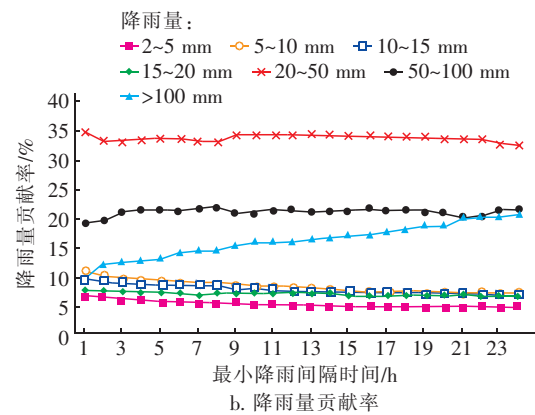
图2 不同划分方法对应的降雨场次分布规律

Fig. 2 Rainfall distribution corresponding to different division methods

为了反映最小降雨间隔时间对不同量级降雨分布规律的影响,依次统计不同量级降雨对应的降雨场次数量和降雨总量,并分别计算降雨场次占比(不同量级降雨场次数量/有效降雨场次数量)和降雨量贡献率(不同量级降雨总量/有效降雨总量),结果见图3。



a. 降雨场次数量占比



b. 降雨量贡献率

图3 不同量级降雨场次数量占比和降雨量贡献率的变化

Fig. 3 Variation of the event ratios and volume ratios among different rainfall levels

由图3(a)可以看出,2~5 mm的降雨场次占比较大(超过25%),5~10 mm次之(约占22%),且随着 $T$ 的增加,其占比有一定程度的减小;20~50 mm降雨场次占比随 $T$ 的增加而增加;其余降雨量级对应的降雨场次占比较小,且无明显变化规律。因此,随着最小降雨间隔时间的增加,小强度降雨事件(2~10 mm)逐渐与邻近的降雨事件进行合并,中等强度降雨事件(20~50 mm)占比由19.0%增加到23.3%。

由图3(b)可以看出,降雨量在20~50 mm的场次在总降雨贡献率中最大(约为35%),50~100 mm降雨贡献率次之,且贡献率基本稳定;100 mm以上降雨贡献率随着 $T$ 的增加而增加;小量级降雨(0~20 mm)对应的降雨贡献率较小,且随 $T$ 的增加而缓慢减小。

综合降雨场次占比和降雨量贡献率的变化规律可以得出,降雨量在20~50 mm的场次占比和降雨量贡献率均较高,且随最小降雨间隔时间的变化较敏感,此降雨区间也是海绵城市建设重点控制对象<sup>[13]</sup>。随着最小降雨间隔时间的增加,小量级降雨事件与邻近降雨事件进行合并,增加了中等和强降雨事件的发生频率与降雨总量。对于降雨场次占比而言,中等强度降雨事件(20~50 mm)的增加明显;对于降雨量贡献率而言,强降雨事件(>100 mm)的增加明显。

### 3 最小降雨间隔时间对降雨控制率的影响

根据《指南》给出的统计方法,得到不同最小降雨间隔时间对应的设计降雨量与降雨控制率关系曲线箱型图,如图4所示。可以看出,不同 $T$ 对应的设计降雨量与降雨总量控制率和降雨场次控制率关系有明显差异。当已知设计降雨量,推求降雨总量控制率时[见图4(a)], $T$ 的影响程度随设计降雨量的增加而减少。例如10 mm设计降雨量对应的降雨总量控制率在35%~45%之间变化,而对于40 mm的设计降雨量,该变化区间为75%~82%,设计降雨量>50 mm后, $T$ 的取值对控制率的影响显著减少(约为 $\pm 2\%$ ),这可能与控制率已达到最优值有关<sup>[14]</sup>。当已知降雨总量控制率,推求设计降雨量时[见图4(b)],最小降雨间隔时间的影响程度随设计降雨量的增加而增加,在80%降雨总量控制率目标下,随最小降雨间隔时间取值的不同,设计降雨量变化区间为33~50 mm。

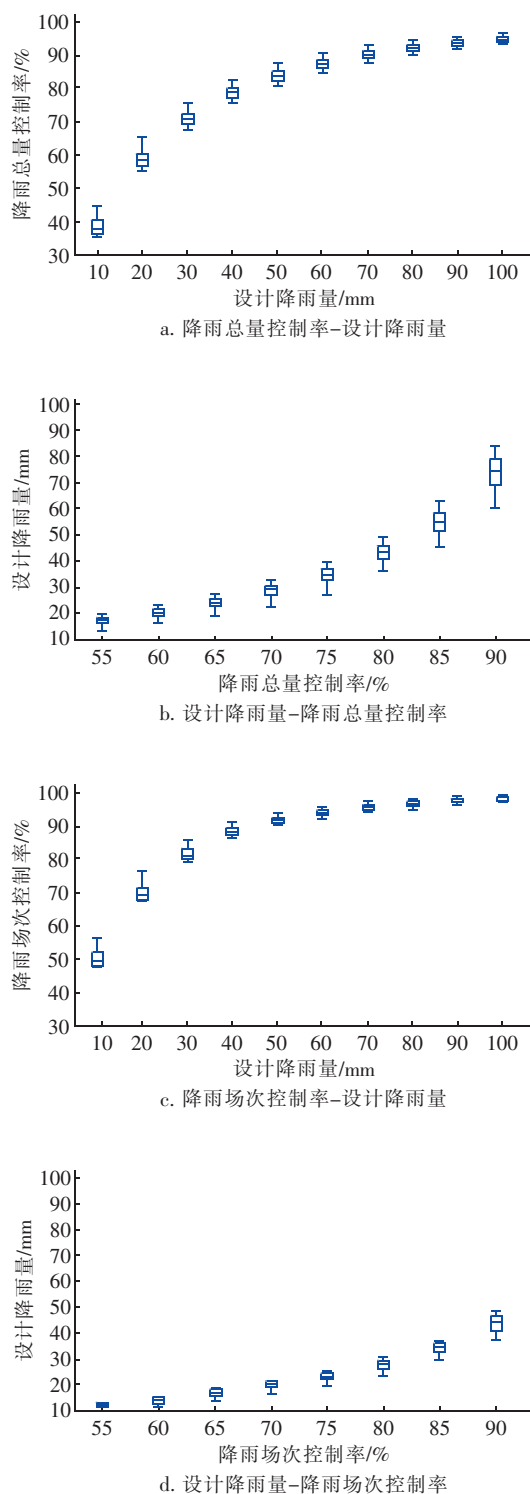


图4 最小降雨间隔时间对降雨总量控制率和降雨场次控制率的影响

Fig. 4 Influence of minimum rainfall interval on volume capture ratio and event capture ratio of rainfall

类似的结果也适用于设计降雨量与降雨场次控制率的关系[见图4(c)和(d)]。总体而言,同一设



计降雨对应的降雨场次控制率明显高于降雨总量控制率,且降雨场次控制率受最小降雨间隔时间的影响程度较小。在40 mm的设计降雨量条件下,随 $T$ 取值的不同,降雨场次控制率相差5%,降雨总量控制率相差7%;在80%的降雨场次控制率条件下,设计降雨量相差8 mm;在80%的降雨总量控制率条

件下,设计降雨量相差15 mm。

#### 4 与《指南》计算结果的对比分析

《指南》中给出的降雨总量控制率与设计降雨量关系曲线是利用日降雨数据计算得到的。基于场次降雨数据和日降雨数据(《指南》方法)计算得到的降雨总量控制率如表1所示。

表1 代表性划分方法下降雨总量控制率对应的设计降雨量

Tab.1 Relationship between volume capture ratio of rainfall and design rainfall depth for typical division method

降雨总量 控制率/%	设计降雨量/mm					《指南》方法/mm	《指南》数值/mm
	$T=1\text{ h}$	$T=2\text{ h}$	$T=6\text{ h}$	$T=12\text{ h}$	$T=24\text{ h}$		
60	16.8	17.9	19.7	21.2	23.8	16.3	14.0
70	23.3	25.0	27.5	29.7	33.5	22.8	19.4
75	27.7	30.0	33.0	35.5	40.5	27.3	22.8
80	33.2	36.4	40.4	43.7	50.0	32.9	27.3
85	41.1	45.8	51.2	55.3	63.7	40.7	33.6
90	53.2	60.7	68.0	74.0	84.8	52.3	—

由表1可以看出,当最小降雨间隔时间取1 h时,其统计结果与《指南》方法得到的计算结果较一致,6个典型降雨控制率对应的设计降雨量均值相差1.75%。随着 $T$ 的增加,《指南》方法与基于场次降雨数据计算得到设计降雨量取值的差别逐渐增加,当 $T$ 为6、24 h时,对于表1中所列的6种降雨总量控制率,《指南》方法得到的设计降雨量均值分别偏低19.81%和35.10%。本研究基于《指南》方法计算得到的设计降雨量高于《指南》中直接给出的北京地区设计降雨量计算结果,其原因主要是由于降雨序列长度的不同,《指南》中所选取的数据序列为1983年—2012年,而本研究所选取的数据序列为1951年—2016年。因此,降雨序列长度和序列阶段,同样对设计降雨量的计算结果影响较大。

#### 5 结论和建议

① 最小降雨间隔时间是降雨场次划分结果的重要影响因素,随着最小降雨间隔时间的增加,小量级降雨事件与邻近降雨事件进行合并,增加了中等和强降雨事件的发生频率与降雨总量,随着最小降雨间隔时间由1 h增加到24 h,20~50 mm降雨事件的降雨场次占比由19.0%增加到23.3%。

② 降雨场次划分方法的影响程度随着设计降雨量的增加而减少,对于40 mm的设计降雨量,降雨总量控制率的变化区间为75%~82%,设计降雨量>50 mm后,降雨场次划分方法对降雨总量控制率的影响显著减少(约为 $\pm 2\%$ )。

③ 同一设计降雨对应的降雨场次控制率明显

高于降雨总量控制率,且降雨场次划分方法对降雨总量控制率的影响高于对降雨场次控制率的影响。在40 mm的设计降雨量条件下,不同降雨场次划分方法对应的降雨总量控制率相差7%,降雨场次控制率相差5%。

④ 较《指南》中选取的日降雨数据而言,场次降雨数据更能反映实际的降雨特征,在最小降雨间隔时间取6 h和24 h时,《指南》方法得到的设计降雨量分别偏低19.81%和35.10%。

⑤ 在实际的海绵城市规划设计和工程建设中,应收集短历时场次降雨数据用以计算设计降雨量,从而保证设计目标(径流总量控制率)与实际建设效果的一致性。

#### 参考文献:

- [1] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 雨水径流总量控制目标确定与落地的若干问题探讨[J]. 给水排水,2016,42(10):61-69.  
Wang Wenliang, Li Junqi, Che Wu, et al. Discussion on some problems in the determination and realization of total rainfall runoff flow rate control [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(10): 61-69 (in Chinese).
- [2] EPA 841-B-09-001. Technical Guidance on Implementing the Stormwater Runoff Requirements for Federal Projection under Section 438 of Energy Independence and Security Act [S]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2009.

- [3] 王家彪,赵建世,沈子寅,等. 关于海绵城市两种降雨控制模式的讨论[J]. 水利学报,2017,48(12):1490-1498.  
Wang Jiabiao, Zhao Jianshi, Shen Ziyin, *et al.* Discussion about the two rainfall control approaches in sponge city construction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12):1490-1498 (in Chinese).
- [4] 李俊奇,林翔. 极端降雨事件对雨水年径流总量控制率和24 h降雨场次控制率的影响规律探析[J]. 给水排水,2018,44(1):21-26.  
Li Junqi, Lin Xiang. Analysis of influence of extreme rainfall event on annual total runoff volume capture ratio and 24 h rainfall event capture ratio [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(1):21-26 (in Chinese).
- [5] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展,2016,27(6):793-799.  
Zhang Jianyun, Wang Yintang, Hu Qingfang, *et al.* Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6):793-799 (in Chinese).
- [6] 王虹,丁留谦,程晓陶,等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. 水利学报,2015,46(11):1261-1271,1279.  
Wang Hong, Ding Liuqian, Cheng Xiaotao, *et al.* Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(11):1261-1271, 1279 (in Chinese).
- [7] Guo J C Y, Urbonas B, Mackenzie K. Water quality capture volume for storm water BMP and LID designs [J]. J Hydrol Eng, 2014, 19(4):682-686.
- [8] 潘国庆,车伍,李俊奇,等. 中国城市径流污染控制量及其设计降雨量[J]. 中国给水排水,2008,24(22):25-29.  
Pan Guoqing, Che Wu, Li Junqi, *et al.* Urban runoff pollution control quantity and its design rainfall in China [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(22):25-29 (in Chinese).
- [9] Jin C X. Determination of basin lag time in rainfall-runoff investigations [J]. Hydrological Processes, 1993, 7(4):449-457.
- [10] Yu B, Rose C W, Ciesiolka C C A, *et al.* The relationship between runoff rate and lag time and the effects of surface treatments at the plot scale [J]. Hydrological Sciences Journal, 2000, 45(5):709-726.
- [11] 殷瑞雪,孟莹莹,张书函,等. 生物滞留池的产流规律模拟研究[J]. 水文,2015,35(2):28-32.  
Yin Ruixue, Meng Yingying, Zhang Shuhan, *et al.* Study on runoff of bioretention by model simulation [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(2):28-32 (in Chinese).
- [12] Chen J, Adams B J. Analysis of storage facilities for urban stormwater quantity control [J]. Advances in Water Resources, 2005, 28(4):377-392.
- [13] 车伍,张鹏,张伟,等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水,2016,32(6):9-14.  
Che Wu, Zhang Kun, Zhang Wei, *et al.* Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6):9-14 (in Chinese).
- [14] 任心欣,汤伟真. 海绵城市年径流总量控制率等指标应用初探[J]. 中国给水排水,2015,31(13):105-109.  
Ren Xinxin, Tang Weizhen. Application of capture ratio of total annual runoff volume in spongy city [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(13):105-109 (in Chinese).



作者简介:张宇航(1994-),男,河南三门峡人,硕士研究生,主要研究方向为城市水文学。

E-mail: zhangyh@hhu.edu.cn

收稿日期:2018-12-22