

# 关于低影响开发设施设计降雨量确定方法的讨论

王家彪<sup>1</sup>, 沈子寅<sup>2</sup>, 赵建世<sup>1</sup>, 王浩<sup>1,3</sup>, 雷晓辉<sup>3</sup>

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 美国 ACT 工程咨询公司, 美国; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 我国《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《指南》)中以年降雨总量控制率作为径流总量控制目标,并由长系列多年全样本统一排序的方式确定标准控制率下对应的设计降雨量。由于降雨的年际变异性,采用这种多年平均的方法仅能体现降雨量的多年平均控制程度,其置信概率有待进一步确定,该方法也未明确“年控制”的概念。为此,以我国北京、武汉、广州为代表城市,比较分析了多年平均和年单样本两种方法下低影响开发设施的降雨量设计问题,并通过 P-Ⅲ型频率曲线推求了年单样本方法下的设计降雨量。将两种方法得到的 80% 控制率下的设计值与《指南》中的同标准设计值进行对比,结果表明,《指南》中的设计值反映的是多年平均降雨水平,该设计值下仅有约 60% 的概率实现年降雨总量控制目标;而年单样本方法考虑了降雨的年际变异性,可通过频率分析的方式实现统计意义上的“年控制”,此方法能给出不同频率下的设计降雨量,可避免决策者和公众对城市降雨控制水平的错误估计。

**关键词:** 低影响开发; 降雨总量控制; 设计降雨量; 多年平均法; 年单样本法; 频率分析

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)01-0127-07

## Discussion on Determination Approaches for Design Rainfall Depth of Low Impact Development Facilities

WANG Jia-biao<sup>1</sup>, SHEN Zi-yin<sup>2</sup>, ZHAO Jian-shi<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1,3</sup>, LEI Xiao-hui<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. ACT Engineering, USA; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** According to *Sponge City Development Technical Guide: Low Impact Development*, the capture ratio of total annual rainfall is adopted to determine the capture ratio of runoff, and the design rainfall depth corresponding to the standard capture ratio is determined by the unified ranking of the whole samples for a long series of multiple years. Because of the yearly variability of the rainfall, this approach only reflects the degree of multiple years average capture ratio of rainfall. What's more, it fails to explain the concept of annual capture target clearly, and its probability remains to be further confirmed. Therefore, rainfall depth design of low impact development facilities under average of multiple years and one sample per year methods was compared and analyzed in Beijing, Wuhan and Guangzhou, and design

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401302、2017YFC0404403、2016YFC0402900); 国家自然科学基金资助项目(91747208、51579129)

通信作者: 赵建世 E-mail: zhaojianshi@tsinghua.edu.cn

rainfall depth under the one sample per year method was determined by using the P-Ⅲ distribution curve. The design values obtained by the two methods at 80% capture ratio were compared with those under the same standard in the guide. The results showed that the design value in the guide represented an average rainfall of multiple years. Under this design value, there was only about 60% probability to achieve the annual total rainfall capture target. By contrast, annual variability of rainfall was considered by using the one sample per year method, which could achieve statistical “annual control” by means of frequency analysis. The approach could determine the design rainfall depth under different frequency of occurrences, which could avoid the wrong estimation of urban rainfall control level by authorities and publics.

**Key words:** low impact development; volume capture of rainfall; design rainfall depth; average of multiple years method; one sample per year method; frequency analysis

2014年我国住房和城乡建设部下发了《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《指南》),并将年降雨总量控制率作为径流总量控制目标,给出了低影响开发(LID)下设计降雨量的确定方法。目前,《指南》已指导我国各地海绵城市建设4年时间,尽管如此,《指南》中所采用的综合控制目标以及对应的降雨量设计方法仍存在争议<sup>[1-2]</sup>。早期的工程设计更加注重初期雨水的控制,且多采用定量的雨量控制值(如25.4 mm)<sup>[3-4]</sup>。随着世界范围内该问题的逐渐明晰,综合经济效益最佳的控制指标研究逐渐得到重视和认可<sup>[5]</sup>。例如,Guo等人根据收益递减原理研究了雨水设施在总量或场次控制下应设计的最大控制比例<sup>[6]</sup>。然而,这些控制指标并没有完全兼顾水质和水量的综合效应。《指南》中以径流总量控制率为综合目标存在其工程和应用层面上的合理性,但也存在一些理论上的不足,其中关于径流总量控制率的问题,文献[7]中已做了较为详细的讨论,为此笔者主要针对径流总量控制目标下的降雨量设计方法进行探讨。在该方面,车伍、李俊奇等提出了采用长系列多年平均的设计降雨量确定方法<sup>[8-9]</sup>。王虹等认为在确定较大城市水文控制指标时应考虑降雨的区域分布性和随时间的变化性<sup>[10]</sup>。车伍等在后期解读《指南》时提出,《指南》仍缺少具有科学性的前期分析,包括城市开发前后的水文计算等<sup>[11-12]</sup>。此外,还有专家指出目前《指南》中对年径流总量控制率这一指标的定位主要在多年平均概念上,并没有明确体现出“年控制”的概念,而且我国雨水系统设计标准采用重现期法,长系列多年平均的方法无法与其一一对应<sup>[13-14]</sup>。

《指南》中设计降雨量的确定方法与美国EPA

所采用的方法类似。根据《指南》中设计降雨量的定义:为实现一定的年径流总量控制目标(年径流总量控制率),用于确定低影响开发设施设计规模的降雨量控制值,一般通过当地多年日降雨资料统计数据获取,通常用日降雨量(mm)表示。具体计算时,将30年以上的历史日降雨资料按由小到大的顺序进行排序后求取不同降雨段的多年平均降雨量,从而确定出标准控制率下对应的雨量值,其设计值实质上是一个多年平均雨量值。一方面,这种设计方法与年径流控制概念并不严格对应,《指南》中所定义的一年径流总量控制目标旨在控制全年(而非多年平均)内一定比例的降雨量不外排径流,若按多年平均方法推出的设计值进行LID建设,很可能出现丰水年连续多年不满足控制目标的情况<sup>[15]</sup>,从而影响设计标准的公众可信度;另一方面,在统计上,仅采用样本均值指标不能体现出降雨系列的波动特征,方法未能考虑未来降雨的年际变异性,忽略了不确定条件下降雨量控制存在“保证率”的问题<sup>[16]</sup>,例如丰水年的实际控制率偏低、枯水年的实际控制率偏高。

笔者针对《指南》中降雨量设计方法存在的不足,提出了降雨量设计的年单样本方法,并以我国北京、武汉、广州为代表城市,从设计过程和设计结果两方面对两种设计方法分别进行了探讨。同时,对年单样本法在降雨量设计中的运用进行了详细介绍,该方法采用P-Ⅲ型分布曲线对逐年单样本雨量系列进行频率分析后,推求出我国部分城市80%降雨总量控制率下对应于不同频率的设计降雨量。最后将设计结果与《指南》中的同标准设计值进行对比分析,以期为我国城市低影响开发下的雨水控制提供更为科学的理论指导和方法借鉴。

## 1 《指南》设计方法及设计降雨量

《指南》中指出海绵城市低影响开发建设目标一般可通过径流总量控制来综合实现。而年径流总量控制率与设计降雨量之间有一一对应关系,尽管这种说法及其控制模式不尽合理,但无论是径流总量控制还是径流场次控制,其最终都可归结为控制一定降雨量不外排径流的问题<sup>[7]</sup>。因此降雨量设计是城市低影响开发建设的前提。《指南》中给出降雨量设计方法为:根据中国气象科学数据共享服务网中国地面国际交换站气候资料数据,选取至少近30年(反映长期的降雨规律和近年气候的变化)日降雨(不包括降雪)资料,扣除小于或等于2 mm降雨事件的降雨量,将降雨量日值由小到大进行排序,统计小于某一降雨量的降雨总量(小于该降雨量的按真实雨量计算出降雨总量,大于该降雨量的按该降雨量计算出降雨总量,两者累计总和,如图1所示)在总降雨量中的比率,此比率(即年径流总量控制率)对应的降雨量(日值)即为设计降雨量。

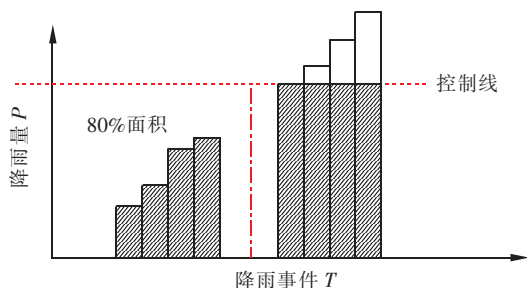


图1 80%控制率下的设计降雨量示意

Fig. 1 Design rainfall depth under 80% capture ratio

图1中,将统计年所有的日降雨事件从小到大进行排序,以柱状图高度示意每日降雨量,每一条块代表了一日降雨。其中,阴影部分面积代表得到控制的降雨总量,包括小于设计值降雨事件的全部雨量和超出设计值降雨事件的部分雨量,具体计算由式(1)实现。

$$R_v = \frac{\sum_{P_i < P_{\text{设计}}} P_i + m \cdot P_{\text{设计}}}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (1)$$

式中: $R_v$ 为年径流总量控制率(实际为年降雨总量控制率); $P_i$ 为图1中第*i*个日雨量值,mm; $P_{\text{设计}}$ 为设计降雨量,mm; $m$ 为超出设计值 $P_{\text{设计}}$ 的降雨天数; $N$ 为总降雨天数。

以北京为例,按《指南》中的方法进行设计,采

用日降雨作为场次降雨的划分方式,对1951年—2015年共65年的降雨资料(排除降雪等特殊降水事件)进行统计分析,绘制出控制雨量值与对应总量控制率之间的关系,如图2所示。

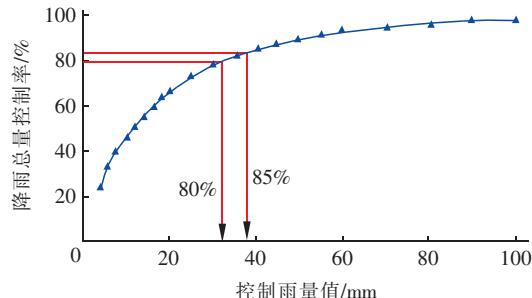


图2 北京年控制雨量值与降雨总量控制率之间的关系

Fig. 2 Relationship between the rainfall capture volume and capture ratio of Beijing

由图2可估算出80%和85%控制率下对应的控制雨量值分别为32.1 mm和38.9 mm,而《指南》中附表2-1给出的设计值分别为27.3 mm和33.6 mm,在两控制率下都相差5~6 mm。考虑到本研究采用的是1951年—2015年的降雨资料,较《指南》中所用资料(1983年—2012年)延长了1倍多。因此,为确定本研究计算结果是否与《指南》完全一致,同样采用北京1983年—2012年的数据按降雨总量控制模式推求不同总量控制率下对应的设计降雨量,然后对比分析本研究的设计结果和《指南》中的设计值,结果表明,在60%、70%、75%、80%、85%的控制率下,本研究得出的对应控制雨量值分别为14.0、19.3、23.0、27.4、33.6 mm,而《指南》中给出的设计值分别为14.0、19.4、22.8、27.3、33.6 mm。可以看出,同样降雨系列情况下,本研究得到的设计值和《指南》中的设计值并无明显出入,可见,图2中的差异确实是源于降雨系列的不同。但考虑到长系列数据的代表性和规律性更强,能更好地体现出降雨的时间变化特征<sup>[9]</sup>,本研究采用1951年—2015年的降雨资料进行分析。

## 2 年单样本设计方法

区别于《指南》中多年平均的方法,年单样本法的核心思想是于每年中仅取单个样本进行分析。首先将每一个统计年内的日降雨量由小到大进行排序,然后在该年内确定出满足控制要求的雨量值(由降雨总量控制率确定)作为该年的唯一代表样本,最后对所选取的逐年单样本雨量系列进行频率

分析,根据频率分析结果推算出不同出现频率下的设计降雨量。需要说明的是,该方法所选取的样本并非年最大值法中的最大值样本,而是满足降雨总量控制率要求的对应年内分位值,该方法能对应于“年控制”概念,体现出单年降雨量的年内平均。

年单样本方法的关键步骤是频率分析,一般可通过拟合经验频率分布曲线来实现。其中常见的频率分布曲线有皮尔逊Ⅲ型分布(P-Ⅲ)、对数皮尔逊Ⅲ型分布(LP-Ⅲ)、广义极值分布(GEV)、极值分布(EV1/EV2/EV3)以及对数正态分布(LN2/LN3)等。不同国家由于水文气候条件的差异其所适合选用的分布线型有所不同,我国最常用的是皮尔逊Ⅲ型分布(P-Ⅲ)<sup>[12]</sup>。因此,本研究选用P-Ⅲ型分布曲线进行频率分析。

采用年单样本方法进行降雨量设计的具体推求步骤如下:

① 获取设计城市30年以上的日降雨数据并进行排序整理。数据从中国气象科学数据共享服务网下载,将降雪等非降雨数据和异常数据(特殊标记的如缺测等)剔除后再扣除累计小于或等于2 mm的日降雨。

② 依次由每年降雨数据确定出对应控制率下的雨量值,得到逐年单样本雨量系列值(如图3所示,以北京80%降雨总量控制率为例)。

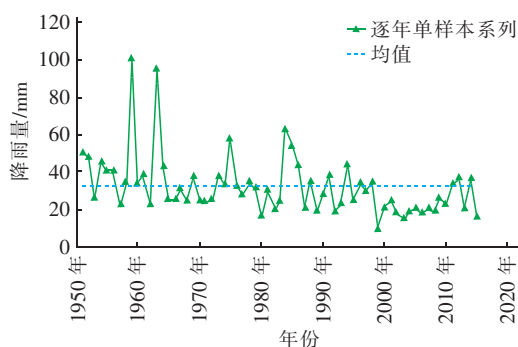


图3 北京80%年降雨总量控制率下1951年—2015年的逐年单样本雨量系列值

Fig.3 Annual capture rainfall value of Beijing from 1951 to 2015 at 80% volume capture ratio

③ 将得到的逐年单样本雨量系列值按从大到小的顺序进行排位和经验频率计算<sup>[17]</sup>。

④ 按P-Ⅲ型分布进行配线分析,并计算出均值( $E_x$ )、离势系数( $C_v$ )和偏态系数( $C_s$ )等主要参数值。

⑤ 由下式按不同设计频率 $p$ (不小于某一设计值的频率)推算出标准控制率下的设计降雨量。

$$P_{\text{设计}} = E_x \cdot (C_v \cdot \varphi_p + 1) \quad (2)$$

式中: $\varphi_p$ 为相应于设计频率 $p$ 的标准化变量,可以根据计算得到的偏态系数 $C_s$ 查P-Ⅲ型曲线的 $\varphi$ 值表确定<sup>[17]</sup>。

### 3 年单样本方法下代表城市的设计降雨量

#### 3.1 设计降雨量推求

《指南》指出绿地年径流总量外排率为15%~20%,并借鉴发达国家实践经验推荐了降雨总量的最佳控制率为80%~85%。此外,根据Guo等人<sup>[6]</sup>的研究以及前文北京1951年—2015年的降雨资料统计成果也可分析出比较经济合理的控制率为80%~85%<sup>[7]</sup>(见图4)。为此,以北京、武汉、广州为例,分别选取1951年—2015年(其中广州缺1951年的资料)逐日降雨量值,研究80%总量控制率下的设计降雨量。

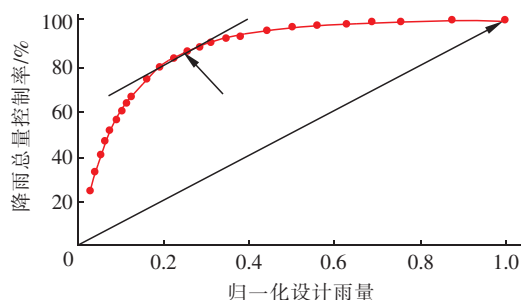


图4 北京降雨总量控制下的最优控制率分析

Fig.4 Optimal volume capture ratio of Beijing

首先分析80%降雨总量控制率下的频率分布曲线。各城市采用P-Ⅲ型分布拟合的结果见表1。

表1 80%降雨总量控制率下逐年单样本系列

P-Ⅲ型曲线拟合结果

Tab.1 Curve fitting results with P-Ⅲ to capture rainfall of Beijing at 80% volume capture ratio

项 目	$E_x/\text{mm}$	$C_v$	$C_s$	拟合度 $R$
北京	32.29	0.48	1.89	0.928
武汉	34.65	0.36	1.58	0.988
广州	36.30	0.29	1.24	0.921

#### 3.2 代表城市设计降雨量频率分析

根据表1,无论采用何种降雨总量控制率,其设计降雨量都可近似为一个满足P-Ⅲ型分布的随机变量,未来年份出现大于不同设计值的降雨频率是不同的。实际计算时,可根据P-Ⅲ型拟合曲线由式(2)确定出不同频率下的设计值或不同设计值所对



应的频率。现以80%控制率为例分别推算出代表城市不同频率下的设计降雨量,如表2所示。

表2 代表城市80%降雨总量控制率下的设计降雨量

Tab.2 Design capture rainfall value of typical cities at 80% volume capture ratio

项 目	年单样本法不同频率对应的设计日降雨量/mm								多年平均法设计日降雨量及对应频率	
	均值	10%	20%	50%	75%	80%	90%	99.99%	设计值/mm	频率/%
北京	32.29	52.61	42.03	27.75	21.15	20.06	17.99	15.89	32.10	37.95
武汉	34.65	51.24	43.11	31.51	25.53	24.44	22.19	18.87	34.30	40.58
广州	36.30	50.41	43.96	34.18	28.56	27.44	24.96	19.45	34.90	47.10

注:表中的频率指的都是不小于该设计值的频率。

与城市暴雨设计所采用的年最大值样本不同,表2中采用的是80%降雨总量控制率下对应的年样本值(分位值),其设计值表征的含义是任何一年中80%的年降雨总量得到控制的可能性大小。以北京为例,如按75%频率选择设计降雨量的话,则为21.15 mm,任何一年只有25%的可能性实现80%降雨总量控制的目标;如按10%频率选择设计降雨量,则为52.61 mm,任何一年有90%的可能性实现80%降雨总量控制的目标。

#### 4 两种设计方法的比较

考虑这样一个问题:若按《指南》中80%降雨总量控制率所对应的设计降雨量进行低影响开发后,能否保证在任何一年内都有80%的降雨总量得到控制呢?显然,答案是否定的。在统计学上,降雨量可被视为满足一定分布规律的随机变量。而采用《指南》中的设计方法得到的实为该随机变量的均值,是多年平均降雨总量控制率,忽略了年际间降雨的差异,该方法仅能实现多年平均下的降雨总量等效控制<sup>[15]</sup>。相比较而言,采用年单样本法则可推求单年的年降雨总量控制率,分析未来不确定条件下每年中设计降雨量的出现概率<sup>[18]</sup>,或给出对应于不同频率的设计降雨量(见表2)。

为便于比较两种设计方法对应的设计降雨量,将第2节中多年平均方法所计算的设计值也列于表2中。由表2可知,多年平均法下各城市设计降雨量对应的频率分别为37.95%、40.58%和47.10%,与年单样本法所推算的系列均值比较接近。这一方面说明按《指南》中的方法进行降雨量设计能反映出统计年份的平均降雨水平,另一方面也说明采用《指南》中的设计值进行低影响开发其控制目标实现具有很大的不确定性,实际只有60%左右的概率(小于该设计值的统计概率)控制住这一年80%的降雨总量。以北京为例,针对任何一年,按《指南》

中的设计降雨量建设的设计LID实际只有62.05%的概率控制住这一年80%的降雨总量,即每3年中几乎有1年实现不了所设计的降雨总量控制目标。

此外,需要指出的是,根据表2和各城市逐年单样本系列P-Ⅲ型频率分布拟合曲线可以发现,《指南》中设计值的对应频率都位于频率曲线内部拟合较好的区段,而相比于防洪工程等小频率设计值的外推,在该区段推算设计值其不确定性要小得多。

总体来说,《指南》中的设计方法从多年平均的角度出发,体现出了场地内对历史降雨总量的多年平均控制水平,该方法原理简单,易于理解和实现,但无法考虑未来年份控制保证率的问题,在实现年总量控制目标时具有很大的不确定性。而年单样本方法则从“年控制”角度出发,反映的是场地内具体某一年的降雨量控制水平,采用该方法进行降雨量设计时能弥补《指南》中所用方法“不能反映出降雨的年际变异性”的不足,其统计学意义明确。因此,在海绵城市降雨量设计时,不仅可利用年单样本方法分析《指南》中设计值的出现频率,还可直接利用该方法给出对应于不同设计频率和雨水控制条件下的设计降雨量,避免决策者和公众对城市LID降雨控制水平的错误估计。

#### 5 结论

① 由于降雨的年际变异性,采用长系列多年平均的方式仅能体现出未来年份降雨量的多年平均控制程度,在《指南》中设计值下进行低影响开发仅有约60%的概率实现单年降雨总量控制目标。

② 年单样本方法考虑了降雨的年际变异性,能给出不同频率下的设计降雨量,并可确切分析出《指南》中设计值的出现频率,弥补《指南》中所用方法“不能反映出降雨的年际变异性”的不足。

③ 实际工程设计时,建议采用年单样本的设计方法替代《指南》中的设计方法,或作为辅助方法

对《指南》中的设计值进行不确定性分析。

④ 尽管本研究仍是按照《指南》中的径流总量控制模式进行设计降雨量分析,推求的是一定降雨总量控制率下的设计降雨量,但年单样本的设计方法对于场次控制模式仍然适用。

⑤ 本研究探讨的是如何在给定径流总量控制标准下进行LID的降雨量设计,在理论上对降雨不确定条件下LID的设计标准进行了精细化考量与再评估。本研究提出的方法,需要进一步结合工程实际案例,进一步从污染控制和经济性等多个方面综合分析其在LID设计和工程实践中的作用和影响。

#### 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 about some issues on the determination and implementation of urban total runoff volume capture target[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(10): 61-69 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] Bedan E S, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 45(4): 998-1008.
- [4] 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).
- [5] Fletcher T D, Shuster W, Hunt W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more - The evolution and application of terminology surrounding urban drainage [J]. Urban Water Journal, 2014, 12(7): 525-542.
- [6] Guo J C Y, Urbonas B. Maximized detention volume determined by runoff capture ratio [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 1996, 122(1): 33-39.
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 李俊奇,王文亮,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水,2015,31(8):6-12.  
Li Junqi, Wang Wenliang, Che Wu, et al. Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: regional division for total rainfall runoff volume capture target [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 6-12 (in Chinese).
- [10] 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.  
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 (in Chinese).
- [11] 车伍,赵杨,李俊奇,等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水,2015,31(8):1-5.  
Che Wu, Zhao Yang, Li Junqi, et al. Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: basic concepts and comprehensive goals [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 1-5 (in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 潘笑文,徐得潜. 基于典型年法的海绵城市建设控制指标研究[J]. 水土保持通报,2017,37(1):123-127,131.

- Pan Xiaowen, Xu Deqian. Research on control objectives in sponge city construction using typical hydrological year method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37 (1): 123 - 127, 131 (in Chinese).
- [14] 徐得潜,汪维伟,余育速. 合肥市建筑小区雨水利用设计方法[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 225 - 230.
- Xu Deqian, Wang Weiwei, Yu Yusu. Design method for rainwater utilization in residential areas of Hefei City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 225 - 230 (in Chinese).
- [15] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之城市径流总量控制指标[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 18 - 23.
- Wang Wenliang, Li Junqi, Che Wu, et al. Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: planning index for urban total runoff volume capture [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 18 - 23 (in Chinese).
- [16] 雒文生,宋星原. 工程水文及水利计算[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- Luo Wensheng, Song Xingyuan. Engineering Hydrology and Water Conservancy Calculation [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2010 (in Chinese).
- [17] 郭生练. 设计洪水研究进展与评价[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- Guo Shenglian. Research Progress and Evaluation of Design Flood [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005 (in Chinese).
- [18] National Research Council. Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies [M]. Washington D C: National Academy Press, 2000.



作者简介:王家彪(1990 - ),男,江西吉安人,博士研究生,主要从事水文学及水资源方面的研究。

E-mail: waterwhu@foxmail.com

收稿日期:2018-06-24

(上接第126页)

- 应用进展[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 49 - 53.
- He Zhenjun, Wang Bin, Yang Yu, et al. Review on vertical shaft in urban wastewater drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(10): 49 - 53 (in Chinese).
- [4] 王广华,陈彦,李昀涛,等. 深层排水隧道系统泵站的三维数值模拟分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(6): 13 - 17.
- Wang Guanghua, Chen Yan, Li Yuntao, et al. Three-dimensional numerical analog analysis on pumping station in deep drainage tunnel [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 13 - 17 (in Chinese).
- [5] 朱颖儒,张利平,白朝伟. 竖井旋流放水洞水力学特性三维数值模拟分析[J]. 西北水电, 2017(5): 82 - 86.
- Zhu Yingru, Zhang Liping, Bai Chaowei. Analysis on 3D numerical simulation of hydraulic characteristics of spilling tunnel with swirling flow in shaft [J]. Northwest Water Power,

2017(5): 82 - 86 (in Chinese).



作者简介:夏海(1994 - ),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要从事城市深隧调蓄系统研究。

E-mail: xh\_fighting@163.com

收稿日期:2018-06-20