

降雨间隔对雨水年径流总量控制率的影响规律探析

李俊奇^{1,2}, 林翔^{1,2}, 王文亮³, 王耀堂³

(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. 北京建筑大学 国家级水环境实验教学示范中心, 北京 100044; 3. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要: 由统计方法得到的雨水年径流总量控制率与设计降雨量关系曲线是规划指导海绵城市建设的重要依据。理论证明,以合理的降雨间隔划分得到的降雨场次数据作为统计源数据,能得到更加切合实际径流控制效果的统计结果。采用《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》的统计方法分析降雨间隔对雨水年径流总量控制率的统计结果带来的影响,对“总量控制偏差”现象做出诠释,提出分析溢流频次及“总量控制偏差”的统计方法作为确定降雨间隔取值的依据,在特定分析条件下,降雨间隔一般接近或小于排空时间的一半;具有下渗功能的雨水设施规模一般由蓄水层有效调蓄量与下渗量两部分组成,经SWMM模拟验证,以2 h作为下渗历时取值偏小,应适当延长下渗历时,可考虑采用平均降雨历时作为下渗历时。

关键词: 雨水年径流总量控制率; 城市雨水管理; 降雨间隔; 排空时间; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0120-07

Analysis of Influence of Rainfall Interval on Volume Capture Ratio of Annual Rainfall

LI Jun-qi^{1,2}, LIN Xiang^{1,2}, WANG Wen-liang³, WANG Yao-tang³

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. National Water Environment Experimental Teaching Demonstration Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

Abstract: The relation curve between volume capture ratio of annual rainfall obtained by statistical method and design rainfall is an important basis for planning and guiding the construction of sponge city. It was theoretically proved that the data of rainfall events obtained by reasonable dividing the rainfall intervals could be used as the statistical source data to get more practical results of runoff control. The influence of rainfall interval on the statistical results of volume capture ratio of annual rainfall was analyzed by using the statistical method of *Sponge City Development Technical Guide: Low Impact Development*. The phenomenon of “deviation of total runoff volume capture” was interpreted, and a statistical method for analyzing overflow frequency and “deviation of total runoff volume capture” was proposed as the basis for determining the rainfall interval. Under specific conditions, the rainfall interval was generally close to or less than half of the draining time. The scale of the infiltration facilities were

generally composed of surface storage volume and infiltration volume. According to SWMM simulation, the infiltration duration of 2 h was too small, and it should be appropriately extended. The average rainfall duration could be considered as the infiltration duration.

Key words: volume capture ratio of annual rainfall; urban stormwater management; rainfall interval; draining time; SWMM

雨水年径流总量控制率是海绵城市建设的核心控制指标,通过统计学方法得到的雨水年径流总量控制率与设计降雨量的关系曲线受到诸多因素影响,其中降雨间隔是重要的因素之一。《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》)推荐以多年24 h(20:00—次日20:00)降雨资料作为统计基础数据,但雨水设施对径流的实际控制效果与降雨间隔密切相关,24 h降雨不等于场降雨,由此统计得出的年径流总量控制率与实际控制效果之间的差异需要深入研究。王文亮等认为以24 h降雨量进行年径流总量控制率的统计分析忽略了不同间隔时间的场降雨事件对设施控制效果的影响,应考虑实际工程设施的排空时间,设定合理的降雨场次划分后再进行统计分析^[1]。

自然降雨具有持续性和间断性,连续的降雨数据可以划分为多场独立的场次降雨,受主观因素影响较大(需要人为确定最小降雨间隔及无雨标准)。《给水排水设计手册》(第2版)中规定两场降雨的判别标准为“低于0.1 mm/min的降雨(包括停止降雨)持续时间超过120 min”,这里以2 h作为最小降雨间隔。Adams等人分析了降雨间隔与降雨特性参数值之间的关系,提出进行场雨划分的降雨间隔在1~6 h之间时实际应用性较强^[2]。

在雨水设施的设计中,为保证径流总量控制效果,最小降雨间隔应与雨水设施的设计排空时间相匹配。分析降雨间隔对年径流总量控制率的影响,有利于确定合理的年径流总量控制率与设计降雨量关系曲线,为科学设计雨水设施规模提供理论依据。

1 降雨间隔与雨水设施排空时间的关系

1.1 排空时间的确定

雨水设施的排空时间是指在雨水完全充满设施(与有效深度齐平)的情况下,完全排空设施蓄水空间内雨水所需的时间,排空方式可为土壤下渗、排水管重力排出或泵提升排出。如表1所示,典型的雨水设施排空时间为12、24、48 h^[3]。如果排空时间太短,雨水设施中的污染物未及时沉淀即排空,对污染

物的去除效率将降低;如果排空时间太长,雨水设施的溢流量将增加,径流总量控制率将降低^[4]。因此最佳排空时间应权衡考虑污染物去除率与径流总量控制率两方面。Waugh等建议湿塘、雨水花园采用12 h排空时间,干塘、砂滤池采用24 h排空时间^[5];典型延时调节池的排空时间为24~48 h^[4],美国丹佛城市排水与防洪机构建议延时调节池采用40 h排空时间^[6]。

表1 部分典型雨水设施的排空时间

Tab.1 Drain time of several typical rainwater facilities

雨水设施类型	名称	排空时间
下渗类	透水铺装	不应大于48 h
	下沉式绿地	一般为24~48 h
	渗塘	不应大于24 h
储存类	湿塘	不应大于48 h
	雨水湿地	不应大于24 h
调节类	调节塘	一般不大于24 h
	雨水调节池	不应大于12 h

1.2 降雨间隔与设计降雨量

对连续降雨数据进行场雨划分需要确定最小降雨间隔,降雨间隔是指上一场降雨停止至下一场降雨开始时的时间跨度。Asquith等认为最小降雨间隔可以依据雨水设施的排空时间、雨水渗滤时间及污染物处理时间确定^[7]。当降雨间隔大于设施的排空时间时,设施内滞留的径流雨水能够在指定时间内排除,保证下一场降雨前设施处于零负荷状态。

采用不同的划分原则,将北京市30年(1976年—2005年,小时精度)连续降雨数据分为5类,前4类分别以6、12、24、48 h为降雨间隔进行场降雨划分,最后一类以20:00—次日20:00为时间跨度进行24 h降雨划分,采用《指南》中的统计方法分别计算出年径流总量控制率与对应设计降雨量的关系,见表2。可知,场雨划分所使用的降雨间隔越大,同一年径流总量控制率下的设计降雨量取值就越高;20:00—次日20:00降雨数据类型统计得出的设计降雨量数值最小,约为48 h降雨间隔的0.5倍。产生以上差异的原因为,随着降雨间隔的增加,更长

时间跨度的连续降雨数据被看作是一场降雨而不是多场,划分得到的有效降雨场次减少。假设一场径流量为 50 mm 的降雨,40 mm 规模的雨水设施才能达到 80% 的年径流总量控制率,如果划分场雨的降

雨间隔减小,该场降雨可能被平均分为两场径流量为 25 mm 的降雨,这时只需规模为 20 mm 的雨水设施就能达到 80% 的年径流总量控制率。因此降雨间隔越大,统计得出的设计降雨量就越高。

表 2 北京市不同降雨数据类型下设计降雨量与年径流总量控制率的关系(1976 年—2005 年)

Tab. 2 Relationship between volume capture ratio of annual rainfall and design rainfall under different types of rainfall data in Beijing (1976 - 2005)

降雨数据类型	有效降雨场次	年径流总量控制率对应的设计降雨量/mm					
		50%	60%	70%	75%	80%	85%
降雨间隔 = 6 h	829	13.4	18.4	24.9	29.3	34.9	42.3
降雨间隔 = 12 h	803	14.6	20.1	27.3	32.1	38.5	46.7
降雨间隔 = 24 h	713	16.5	22.7	31.0	36.8	43.9	53.1
降雨间隔 = 48 h	573	20.7	28.4	39.1	46.2	55.3	67.4
20:00—次日 20:00	983	11.1	15.3	20.8	24.2	28.6	34.6

注:有效降雨场次是指扣除极端小降雨后的降雨数据。

1.3 “总量控制偏差”现象

以具有下渗功能的雨水设施为例,径流从产生到进入雨水设施至最后溢流遵循如下规律:降雨初期地表径流持续进入雨水设施,当入流量大于下渗量(出流量),雨水设施内水位开始上升,在降雨中后期发生溢流,直至入流量小于下渗量,溢流停止。当第 2 场降雨发生在降雨停止的 24 h 后(假设设施排空时间为 24 h),雨水设施内的径流雨水已经完全排空,则重复如上过程;如果第 2 场降雨的时间间隔较短,如 6 h,由于仍有部分雨水滞留在雨水设施内来不及排走,设施储水空间被“压缩”,更多径流将会溢流。多溢流的这部分雨水在统计之初被认为是可以得到控制的,因此实际的径流总量控制率会低于理论的径流总量控制率。这里将此现象称之为“总量控制偏差”现象,降雨间隔小于排空时间是造成这种现象的直接原因。

统计中选择较大的降雨间隔能降低“总量控制偏差”出现的频次,但是过大的降雨间隔同样会导致设计降雨量取值偏高的问题。因此在特定排空时间下,最优降雨间隔的选择需要同时考虑“总量控制偏差”及“设计降雨量取值”这两方面因素。

2 最佳降雨间隔的确定方法

2.1 溢流频次及“总量控制偏差”的统计方法

为量化分析“总量控制偏差”现象,提出了多年降雨溢流频次及“总量控制偏差”现象出现频次的统计分析方法(以下 H 相关量纲均为降雨深度)。

① 将精度至少为小时的降雨数据以特定降雨间隔进行场雨划分,扣除小于或等于 2 mm 的降雨

数据,同时确定每场雨的历时及场雨间的间隔。

② 将场降雨量 H_p 转换为径流量 H_r ,其中 φ 为径流系数:

$$H_r = \varphi H_p \quad (1)$$

③ 假设上一场降雨滞留的径流量为 H_{pre} ,则当前场雨中设施收集到的总径流量 H_t 为:

$$H_t = H_r + H_{pre} \quad (2)$$

④ 假设设施规模为 H ,排空时间为 T_e ,则设施的排空率 q 为(此处设施规模不包含排空量, H 与汇流面积的乘积为设施的蓄水容积):

$$q = \frac{H}{T_e} \quad (3)$$

⑤ 假设降雨历时为 T_d ,降雨过后剩余的径流量 H_{re} 为:

$$H_{re} = H_t - qT_d \quad (4)$$

若 $H_{re} < 0$,则 $H_{re} = 0$;若 $H_{re} > H$,则 $H_{re} = H$ 。

⑥ 假设距离下一场降雨的时间间隔为 T_{next} ,下一场降雨滞留的径流量 H_{next} 为:

$$H_{next} = H_{re} - qT_{next} \quad (5)$$

如果 $H_{next} < 0$,则 $H_{next} = 0$ 。

⑦ 判定某场雨发生溢流的条件为 $H_{re} > H$,多年降雨总溢流次数为 N_o 。

⑧ “总量控制偏差”现象的出现需要同时满足两个条件:上一场降雨滞留的径流量 $H_{pre} > 0$;本场降雨的总径流量 H_t 大于设施规模,即 $H_t > H$ 。

2.2 不同降雨间隔下的多年总溢流次数

以北京市 1976 年—2005 年 30 年的逐小时降雨数据为例,采用不同降雨间隔进行降雨场次划分,

场地的径流系数取0.7,统计在48 h和24 h排空时间下,不同降雨数据类型(不同降雨间隔)的多年总溢流次数 N_o 、“总量控制偏差”现象出现的次数 N_d 、多年溢流总量及偏差溢流量。

溢流次数是衡量雨水设施对径流总量控制的重要参数。如图1所示,在20、30、40 mm的设施规模

下,随着降雨间隔的增加,多年总溢流次数不断减少。多年总溢流次数呈现一开始下降迅速而后逐渐趋于平缓的变化趋势,因此一定存在某一个降雨间隔作为临界值(溢流曲线由陡转缓的转折点),在该降雨间隔下年径流总量控制率最高。采用幂函数拟合曲线,求出临界降雨间隔数值,如表3所示。

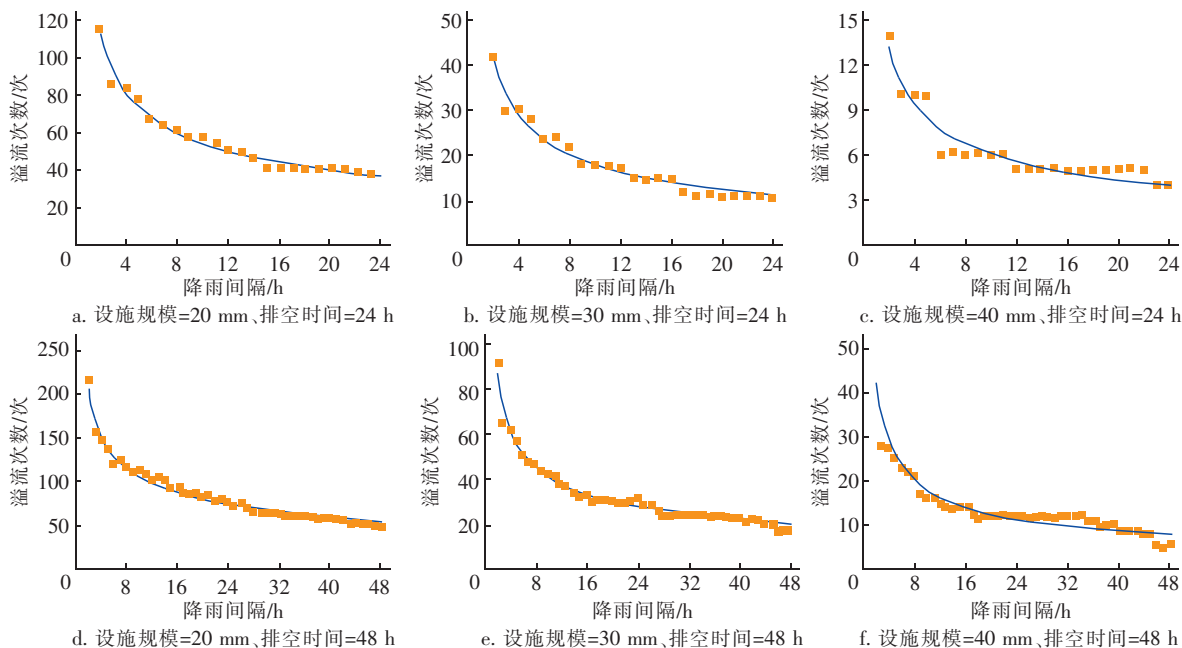


图1 不同设施规模下的多年总溢流次数

Fig. 1 Total overflow times under different scales of facilities

表3 基于多年总溢流次数的临界降雨间隔

Tab. 3 Critical rainfall intervals based on total overflow times

排空时间/h	设施规模/mm	幂函数拟合曲线	临界降雨间隔/h
24	20	$y = 153.58x^{-0.45}, R^2 = 0.9811$	7.8
	30	$y = 66.544x^{-0.58}, R^2 = 0.9644$	8.0
	40	$y = 16.411x^{-0.43}, R^2 = 0.8831$	6.8
48	20	$y = 295.66x^{-0.45}, R^2 = 0.9701$	11.8
	30	$y = 123.93x^{-0.47}, R^2 = 0.9762$	10.6
	40	$y = 57.702x^{-0.51}, R^2 = 0.8576$	9.5

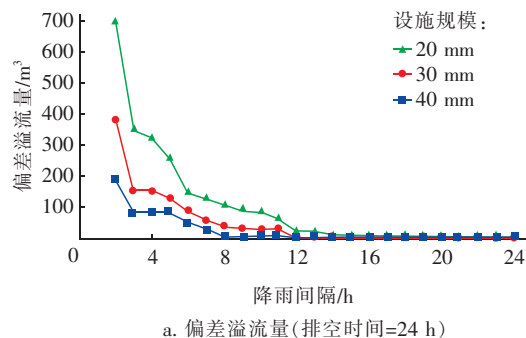
2.3 不同降雨间隔下的偏差溢流量

理论年径流总量控制率($\alpha_{\text{理论}}$)与实际年径流总量控制率($\alpha_{\text{实际}}$)的计算方法如下: $\alpha_{\text{理论}}$ (或 $\alpha_{\text{实际}}$) = [多年径流总量 - 理论(或实际)多年溢流总量] / 多年径流总量。理论年径流总量控制率认为每场降雨过后设施内滞留的雨水及时排空,不存在偏差溢流量。而在实际情况下,不一定能保证场雨之间的间隔足够长,以给予设施充分的排空时间,偏差溢流量不仅存在,而且是实际多年溢流总量不可或缺的组

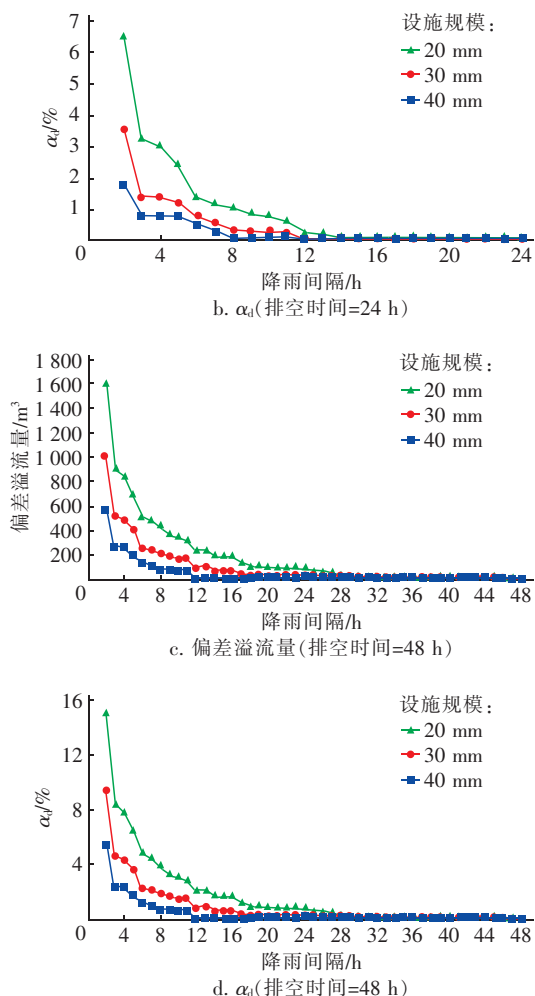
成部分。因此实际多年溢流总量会大于理论多年溢流总量,二者之间的差值即为偏差溢流量。据此计算理论年径流总量控制率与实际年径流总量控制率的差值(α_d):

$$\alpha_d = \alpha_{\text{理论}} - \alpha_{\text{实际}} (\alpha_d > 0) \quad (6)$$

由于年径流总量控制率一般取整数(如80%),依据四舍五入取近似值原理,当 $\alpha_d < 0.5\%$ 时可视为二者取值相等。不同降雨间隔的偏差溢流量及 α_d 见图2,典型降雨间隔的 α_d 见表4。



a. 偏差溢流量(排空时间=24 h)

图2 不同设施规模下的偏差溢流量及 α_d Fig.2 Deviation discharge and α_d under different scales of facilities表4 典型降雨间隔的 α_d Tab.4 α_d of typical rainfall intervals %

排空时间/h	设施规模/mm	典型降雨间隔/h				
		2	6	12	24	48
24	20	6.50	1.33	0.21	0	0
	30	3.58	0.79	0	0	0
	40	1.78	0.47	0	0	0
48	20	15.05	4.73	2.12	0.70	0
	30	9.43	2.37	0.84	0.23	0
	40	5.37	1.27	0.15	0	0

2.4 降雨间隔取值的确定

尽管选择较小降雨间隔能够减小设计降雨量取值,但降雨间隔太小会增加溢流次数以及“总量控制偏差”现象出现的可能性,实际的总量控制效果会大打折扣。为同时满足总溢流次数和偏差溢流量削减的要求,在上述特定分析条件下,不同排空时间

及设施规模可选择的降雨间隔见表5。当排空时间为24 h时,20、30、40 mm的设施规模可采用的降雨间隔分别为12、8、7 h;当排空时间为48 h时,可采用的降雨间隔则分别为27、17、12 h。总体来看,不同设施规模的降雨间隔取值一般接近或小于排空时间的一半。需要注意的是,上述结论是基于特定场地条件分析得出的,并不具有普遍适用性,可以确定的是,最优降雨间隔一般小于排空时间。国外学者对降雨间隔的取值也做过具体分析,Urbonas等建议采用排空时间的一半作为降雨间隔^[8],Driscoll等建议采用6 h降雨间隔进行场雨划分^[9],Guo和Urbonas对比了降雨间隔设为排空时间的一半和等于排空时间这两种情况,前者比后者具有更加真实可信的统计结论,同时指出当降雨间隔等于排空时间时会导致设施规模偏大^[3]。综上,降雨间隔的取值需小于排空时间,在未做特定分析的情况下,可采用雨水设施排空时间的一半作为降雨间隔。

表5 不同排空时间及设施规模下的降雨间隔取值

Tab.5 Recommended values of optimal rainfall interval under different drain times and facility scales

排空时间/h	设施规模/mm	基于多年总溢流次数的临界降雨间隔/h	$\alpha_d < 0.5\%$ 对应的降雨间隔/h	降雨间隔取值/h
24	20	≥ 7.8	≥ 12	12
	30	≥ 8.0	≥ 8	8
	40	≥ 6.8	≥ 6	7
48	20	≥ 11.8	≥ 27	27
	30	≥ 10.6	≥ 17	17
	40	≥ 9.5	≥ 12	12

3 基于场雨划分统计的渗透设施规模计算

3.1 调蓄量+下渗量

生物滞留设施、渗透塘、渗井等具有蓄水空间的渗透设施,其设施规模由两部分组成,即蓄水层有效调蓄量与下渗量。若下渗量取值偏小则会导致蓄水层有效调蓄量增加,表层设施规模偏大;反之,蓄水层有效调蓄量将减小,设施溢流量将增加,径流总量控制率将降低。以场降雨数据进行年径流总量控制率统计能得到理想的设计降雨量取值,然而在具有下渗功能的雨水设施的规模计算中还需考虑合理的蓄水层有效调蓄量与下渗量分配。

依据《指南》,渗透设施有效调蓄容积 V_s 的计算方法如下:

$$V_s = V - W_p \quad (7)$$

式中: V 为渗透设施进水量; W_p 为渗透设施下渗量,可由公式 $W_p = KJA_s t_s$ 计算得出,其中 K 为土壤渗透系数, J 为水力坡度, A_s 为有效渗透面积, t_s 为下渗历时。 t_s 是计算的关键参数,根据《指南》下渗历时一般可取 2 h。然而经模拟发现 2 h 下渗历时取值偏小,不能代表真实的下渗时间。在对多年连续降雨数据进行场雨划分后可以精确计算平均降雨历时,可考虑以平均降雨历时作为下渗历时。

3.2 模拟验证

为验证哪种降雨历时取值更能代表真实的下渗时间,采用北京市 30 年(1976 年—2005 年)的分钟降雨数据,通过 SWMM 模型模拟不同设计降雨间隔条件下的年径流总量控制率,下渗历时分别取不同降雨间隔条件下的平均降雨历时和 2 h。

场地面积取 1 hm^2 ,硬化面积比例取 75%(径流系数为 0.713),设施排空时间取 24 h,排空以土壤下渗方式实现,雨水设施蓄水层高度取 250 mm,排空速率为 10.41 mm/h 。在 6、12、24 h 的降雨间隔下,80% 年径流总量控制率所需的设计降雨量分别为 34.9、38.5、43.9 mm。采用容积法计算相应的调蓄容积,扣除下渗量,将剩余调蓄容积分配到雨水设施蓄水层中,通过调整设施面积保证蓄水层高度不变。相关设计参数及模拟结果如表 6 和表 7 所示。可知,当下渗历时取平均降雨历时,模拟得出的年径流总量控制率与统计结果相近;当下渗历时取 2 h 时,模拟得出的年径流总量控制率远高于 80%,设施有效渗透面积约为前者的 2 倍,设施规模过大。因此在上述特定模拟条件下,2 h 下渗历时取值偏小,平均降雨历时更能代表真实的下渗时间。

表 6 不同降雨间隔条件下的设计参数及模拟结果
(下渗历时为平均降雨历时)

Tab. 6 Design parameters and simulation results under different rainfall interval (infiltration duration equals the average rainfall duration)

相关设计参数	降雨间隔/h		
	6	12	24
80% 年径流总量控制率对应设计降雨量/mm	34.9	38.5	43.9
下渗历时 t_s /h	13.42	18.28	27.12
调蓄容积 V (容积法)/ m^3	248.7	274.3	312.8
下渗量 W_p / m^3	89.1	118.6	165.9
设施有效渗透面积 A_s / m^2	638.1	623.0	587.6
年径流总量控制率/%	78.0	77.5	76.1

表 7 不同降雨间隔条件下的设计参数及模拟结果
(下渗历时为 2 h)

Tab. 7 Design parameters and simulation results under different rainfall interval (2 h of infiltration duration)

相关设计参数	降雨间隔/h		
	6	12	24
80% 年径流总量控制率对应设计降雨量/mm	34.9	38.5	43.9
下渗历时 t_s /h	2	2	2
调蓄容积 V (容积法)/ m^3	248.7	274.3	312.8
下渗量 W_p / m^3	23.4	25.9	29.5
设施有效渗透面积 A_s / m^2	1 126.1	1 242.2	1 416.5
年径流总量控制率/%	89.1	89.4	90.9

4 结论与建议

① 采用场降雨数据进行年径流总量控制率统计可充分考虑排空时间与降雨间隔的关系,得到更为符合实际控制效果的年径流总量控制率曲线。然而场降雨划分对降雨数据的精度要求更高,划分的过程需要借助编程来实现,这在一定程度上限制了该方法的推广。此外,降雨站点覆盖的区域范围内,由 24 h 降雨数据确定的年径流总量控制率与设计降雨量关系具有唯一性,而基于场降雨的统计方法不具备这样的特性,因其针对的是区域内的某一设计排空时间的雨水设施,在使用上容易出现概念混淆,这使得其统计结果难以作为区域性指标进行推广。即便如此,仍然推荐有条件的区域采用基于场降雨数据的年径流总量控制率统计方法,将其结果与 24 h 降雨数据确定的年径流总量控制率进行比较分析后综合确定。

② 降雨间隔是影响降雨场次划分结果的重要因素之一,合理选择降雨间隔,权衡设施排空时间与降雨间隔的关系,可减小“总量控制偏差”现象,使实际的径流控制效果达到规划设计的要求,同时也不会造成雨量调蓄容积偏大。

③ 对北京市 1976 年—2005 年降雨资料的统计分析可知,当排空时间为 24 h 时,20、30、40 mm 的设施规模可采用的降雨间隔分别为 12、8、7 h;当排空时间为 48 h 时,可采用的降雨间隔则分别为 27、17、12 h。不同设施规模的降雨间隔取值一般接近或小于 0.5 倍的排空时间。由于上述结论是基于特定场地条件分析得出的,不具有普遍适用性,实际应用中,有条件的区域可依据“最佳降雨间隔确定方法”进行降雨间隔取值确定的统计分析。我国南

方地区的土壤下渗性能差,雨水设施排空时间较长(超过24 h),降雨间隔取值可适当延长(如12 h);而北方地区,由于土壤下渗性能好,雨水设施排空时间短,可取较小的降雨间隔,但一般不小于6 h。在未做特定分析的情况下,可采用雨水设施排空时间的一半作为降雨间隔。

④ 径流源头减排设施一般为具有下渗功能的雨水设施,可同时满足径流总量和径流污染控制目标,其调蓄容积由蓄水层有效调蓄量与下渗量两部分组成。SWMM模拟结果表明,采用2 h的下渗历时取值偏小,为合理分配蓄水层有效调蓄量与下渗量,使设计得出的年径流总量控制率趋于理想设计效果,计算中可采用平均降雨历时作为下渗历时。

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 several problems of determining and implementing of total rainfall runoff volume capture target [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(10): 61-69 (in Chinese).
- [2] Adams B J, Fraser H G, Howard C D D, et al. Meteorological data analysis for drainage system design[J]. J Environ Eng, 1986, 112(5): 827-848.
- [3] Guo J C Y, Urbonas B. Maximized detention volume determined by runoff capture ratio[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1996, 122(1): 33-39.
- [4] Guo J C Y, Urbonas B, MacKenzie K. Water quality capture volume for storm water BMP and LID designs[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4): 682-686.
- [5] Waugh P D, Jones J E, Urbonas B R, et al. Denver urban storm drainage criteria manual[A]. Proceedings of Ninth International Conference on Urban Drainage [C]. New

York: American Society of Civil Engineers, 2002.

- [6] Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD). Urban Storm Drainage Criteria Manual: Volume 3 Best Management Practices[M]. Denver: Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD), 2011.
- [7] Asquith W H, Roussel M C, Cleveland T G, et al. Statistical Characteristics of Storm Interevent Time, Depth, and Duration for Eastern New Mexico, Oklahoma, and Texas [M]. Austin: USGS Texas Water Science Center, 2006.
- [8] Urbonas B, Guo J C Y, Tucker L S. Maximization of storm water quality control volume [A]. Proceedings of ASCE Engrg. Foundation Conference on Urban Stormwater Quality Enhancement [C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1990.
- [9] Driscoll E D, Palhegyi G E, Strecker E W, et al. Analysis of Storm Events Characteristics for Selected Rainfall Gauges throughout the United States [M]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1989.



作者简介:李俊奇(1967-),男,山西稷山人,博士,教授,主要从事城市雨水控制利用理论与技术、水环境生态技术、环境与资源政策等方面的研究。

E-mail: lijunqi@bucea.edu.cn

收稿日期:2018-12-16