

述评与讨论

国内外雨水径流总量控制指标统计方法对比剖析

李俊奇^{1,2}, 林翔¹, 王文亮³, 刘超⁴

(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; 4. 北京市首都规划设计工程咨询开发有限公司, 北京 100045)

摘要: 年径流总量控制率、年降雨场次控制率是雨水径流总量控制典型指标, 国内外多采用指南统计法、PONDRIK 统计法、PERCENTILE 函数统计法确定其取值, 总结了三种统计方法的基本原理、统计过程, 并结合案例分析了三种方法的优缺点及适用条件, 以期为合理确定雨水源头控制设施的规模提供参考。

关键词: 年径流总量控制率; 年降雨场次控制率; 城市雨水; 径流系数; 统计方法
中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)08-0011-06

Comparison of Statistical Methods of Runoff Volume Control Indexes at Home and Abroad

LI Jun-qi^{1,2}, LIN Xiang¹, WANG Wen-liang³, LIU Chao⁴

(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; 4. Capital Urban Planning & Design Consulting Development Corporation, Beijing 100045, China)

Abstract: Volume capture ratio of annual rainfall and annual rainfall event capture ratio are typical indexes of runoff volume control. Guide Statistical Method, Pondrisk Statistical Method and Percentile Function Statistical Method are usually used to determine their value at home and abroad. The paper summarized the basic principle and statistical process of the three statistical methods. With a view to provide reference for determining the size of rainwater source control facilities reasonably, examples are given to analyze the advantages, disadvantages and applicable conditions of them.

Key words: volume capture ratio of annual rainfall; annual rainfall event capture ratio; urban rainwater; runoff coefficient; statistical method

高强度城市开发带来了一系列水环境问题, 究其原因 是千百年以来形成的自然排水系统的排水路

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708015); 北京市社会科学基金重点项目(14CSA001); 北京市未来城市设计高精尖创新中心资助项目(UDC2016040100)

径遭到破坏、天然的调蓄容积减缩,原有的水循环系统失衡,因此需要建立多目标多层次的城市雨洪管理体系。雨水年径流总量控制率、年降雨场次控制率是径流源头减排系统的核心指标,2015年10月,国务院办公厅印发了《关于推进海绵城市建设的指导意见》(国办发[2015]75号),要求在城市总规层面因地制宜地确定城市雨水年径流总量控制率及其对应的设计降雨量。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)》(以下简称《指南》)、美国《联邦工程项目实施EISA 438条文的雨水径流控制技术导则》(以下简称《438技术导则》),以及James C. Y. Guo等学者均给出了雨水径流总量控制指标的具体统计方法^[1,2],即指南统计法、PONDRIK统计法、PERCENTILE函数统计法等。由于指标选择及其分析方法、工具、数据精度等不同,因此得出的结果也不同。理清三种统计方法之间的差异,有助于加深对雨水径流总量控制内涵的理解,并合理选择相应方法确定源头雨水径流总量控制目标。

1 指南统计法

1.1 出发点

自然降雨的一部分形成径流汇入河川,未形成径流的部分,或被植物截留,或因吸热而蒸发,或通过下渗补给地下水。国内外雨洪管理实践表明,保护并重塑城市良性的水文循环应作为综合解决城市雨水问题、保障城市生态系统的核心理念与最高目标^[3],雨水年径流总量控制目标应以开发建设后径流排放量接近开发建设前自然地貌时的径流排放量为标准。《指南》从维持区域良性水文循环角度提出雨水年径流总量控制率,即得到控制的雨量(包括下渗减排、集蓄利用或净化后外排等多种形式控制的雨量)占全年总降雨量的比例。

1.2 统计过程

参考《指南》,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)24 h降雨数据(20:00—20:00),扣除小于或等于2 mm的降雨和降雪等数据后,按雨量由小到大进行排序,依次分别统计小于或等于该序列降雨量数值的降雨总量(小于或等于降雨量值的按真实雨量计算出降雨总量,大于降雨量值的按该降雨量值计算出降雨总量,两者累计总和)在总降雨量中的比例,得到雨

水年径流总量控制率序列值,该序列值对应的24 h降雨量即为设计降雨量。

以北京地区1983年—2012年降雨数据为例,扣除小于或等于2 mm的降雨数据,将剩余1 098个降雨数据按照从小到大顺序排列,依次编号。以降雨数据序号为横坐标,24 h降雨量数值为纵坐标,形成多年24 h降雨量分布图,如图1所示。

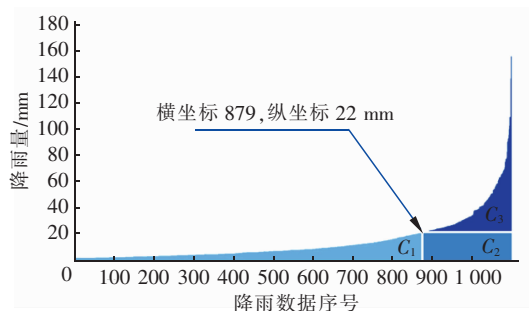


图1 北京市多年24 h降雨量分布(1983年—2012年)

Fig. 1 24 h rainfall distribution of Beijing for many years (1983–2012)

根据此分布图进一步说明年径流总量控制率、年降雨场次控制率的关系如下:

① 30年总降雨量

30年总降雨量为图中阴影部分之和,即: $C_1 + C_2 + C_3$ 。

② 年降雨场次控制率

若将每个24 h降雨量数据记为一场降雨的降雨量,每一横坐标值与30年降雨总场次的比值即为年降雨场次控制率,而该横坐标对应的纵坐标值即为其对应的设计降雨量。例如,80%年降雨场次控制率对应的设计降雨量为22 mm(总场次数为1 098, $\frac{879}{1\,098} \times 100\% = 80\%$)。

③ 年径流总量控制率

由上述可知,设计降雨量22 mm对应的年径流总量控制率 = $(C_1 + C_2) / (C_1 + C_2 + C_3) \times 100\%$,此例的计算值为73.9%。

1.3 设施规模计算

《指南》指出,源头减排设施的规模应根据控制目标及设施在具体应用中发挥的主要功能,选择容积法、流量法或水量平衡法等方法计算确定。《指南》中的容积法计算公式为:

$$V = 10H\Psi F \quad (1)$$

式中 V ——设计调蓄容积, m^3

H ——设计降雨量,mm

Ψ ——综合雨量径流系数

F ——汇水面积, hm^2

“指南统计法+容积法”构成了总量减排设施规模计算的基本体系。需指出的是,指标就雨量进行统计,不考虑径流系数,统计结果不针对特定场地条件。此外,指南统计法采用的24 h降雨量资料,并非严格意义上的系列“场降雨事件”。

2 PONDRIK与WQ-COSM统计法

2.1 出发点

WQ-COSM(Water Quality Capture Optimization and Statistics Model, 2012)是由美国城市水域研究所(Urban Watersheds Research Institute)、城市排水与防洪区研究所(Urban Drainage and Flood Control District Institute)以及科罗拉多丹佛大学土木工程系(UCD)合作研发的免费模型^[4]。使用者可以从美国国家气候数据中心(NCDC)下载小时或15 min降雨数据,用以计算年径流总量控制率(Volume capture ratio of annual rainfall)或年降雨场次控制率(Annual rainfall event capture ratio),以确定延时调节设施的最佳水质控制容积(WQC_V)。

WQ-COSM是一个基于Windows的计算机程序软件,代替了早期的基于DOS程序的软件PONDRIK^[1],计算原理基本相同,不同之处在于前者为连续性降雨过程模拟演算,后者是基于场降雨的静态降雨统计分析。二者均要求进行降雨场次划分,而且场雨划分的降雨间隔时间根据设施的排空时间确定,此外还需将降雨量转换为径流量,因此该方法是一种针对特定下垫面条件,以径流污染控制为核心目标的统计方法。

2.2 统计过程

延时调节设施的规模确定方法可基于降雨统计分析或模型连续计算^[5],PONDRIK统计法与指南统计法均为基于(场)降雨的静态降雨统计分析,未进行分钟或小时降雨精度的连续“降雨—径流—溢流”过程演算,二者之间更具可比性,因此,主要介绍PONDRIK统计法的统计过程^[2]。

① 将连续降雨数据(小时或15 min)按照所需降雨间隔(6、12、24 h)进行场次划分。

② 将场次降雨量换算为径流量,具体计算如下:

$$P_r = C(P_t - P_i) \quad (2)$$

式中 P_r ——径流量, m^3

C ——径流系数

P_t ——场降雨量,mm

P_i ——降雨的初期损失,一般取0.1英寸(2.54 mm)

③ 设施平均排空率及最大控制容积计算。这里假设,如果场降雨的径流量低于最大控制容积,则认为该径流被完全收集处理,如果场降雨的径流量高于最大控制容积,超出部分被视为溢流。

具体计算如下:

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

$$P_c = P_p + q \times T_d \quad (4)$$

式中 q ——设施平均排空率,mm/h

P_p ——设施规模,mm

T_e ——排空时间,h

P_c ——最大控制容积,mm

T_d ——降雨历时,h

④ 累计溢流量的计算。计算所有场次的溢流量,并累计总和,具体如下:

$$P_{tr} = \sum_{j=1}^N P_{rj} \quad (5)$$

$$P_{to} = \sum_{j=1}^N (P_{rj} - P_{cj}) \quad [\text{当 } P_{rj} - P_{cj} < 0 \text{ 时 } (P_{rj} - P_{cj}) \text{ 取零}] \quad (6)$$

式中 P_{tr} ——累计径流量,mm

P_{rj} ——第 j 场降雨产生的径流量,mm

P_{cj} ——第 j 场降雨最大控制容积,mm

P_{to} ——累计溢流量,mm

⑤ 径流总量控制率与径流场次控制率计算。径流总量控制率与径流场次控制率计算公式如下:

$$R_v = 1 - (P_{to}/P_{tr}) \quad (7)$$

$$R_n = 1 - (N_{to}/N) \quad (8)$$

式中 R_v ——径流总量控制率, %

R_n ——径流场次控制率, %

N_{to} ——累计溢流场次数

N ——总场次数

⑥ 最佳水质控制容积的确定。对径流总量控制率曲线横坐标标准化后,获取斜率为1时的曲线“拐点”,该点对应的设施规模雨水收集的经济效率最优。

2.3 设施规模计算

设施规模同样采用容积法计算。为快速找寻不

同场地条件下的最佳容积,在随后的研究中发现,设施规模 $P_o(WQC_v)$ 与多年平均 6 h 降雨量 P_6 的比值与径流系数 C 存在线性关系,即:

$$\frac{P_o}{P_6} = a \times C + b \quad (9)$$

通过对统计结果的归纳总结可以确定不同排空时间下的经验系数 a 、 b 值,而径流系数是场地硬化面积比例 I 的函数,在得知场地硬化面积比例 I 后就能快速估计出 WQC_v 值。例如,针对丹佛市的 WQC_v 计算公式为式(10),其中 α 为不同排空时间对应的经验系数。

$$WQC_v = \alpha(0.91 \times I^3 - 1.19 \times I^2 + 0.78 \times I) \quad (10)$$

3 PERCENTILE 函数统计法

3.1 出发点

2007 年美国国会颁布了《能源独立与安全法案》(EISA),第 438 条款要求凡是涉及联邦机构的新建改建项目,且面积超过 5 000 平方英尺(1 平方英尺 = 0.09 m²),均需达到降雨径流规划管控的要求。基于此条款,美国环境保护署(USEPA)在 2009 年下发了《联邦工程项目实施 EISA 438 条文的雨水径流控制技术导则》,以 95% 年降雨场次控制率作为径流雨水规划管控目标的两种可选方案之一。其出发点在于年 95% 降雨场次对应的降雨总量最能代表自然条件下应入渗的雨水总量,通过控制这些高频率的中小降雨,或暴雨的初期部分,可以大大缓解其对接纳水体的水文、水质状况带来的负面影响^[2]。

3.2 统计过程

降雨场次控制率及其对应设计降雨量的分析与指南统计法一致:将 24 h(24:00—24:00)降雨量数据按照雨量从小到大的顺序排列在 Excel 表格中,每个数据作为一场降雨的降雨量,依次编号。另起一列依次计算序列 24 h 降雨量数值对应的降雨场次控制率,即降雨事件序号/总降雨数,序列 24 h 降雨量数值即降雨场次控制率对应的设计降雨量。基于此方法,实际应用中,《438 技术导则》推荐采用 Excel 中的 PERCENTILE 函数,通过对序列 24 h 降雨量数值的后台分析直接得出给定降雨场次控制率所对应的设计降雨量值。与指南统计法相比,该方法为逆向计算过程,但计算结果基本一致。具体步骤如下:

① 从美国国家海洋和大气局(NOAA)获得连续 24 h 降雨数据(至少 30 年),在 Excel 表格中将降雨数据排于一列。

② 去除降雨量为 0.1 英寸(2.54 mm)以下的降雨事件以及降雪事件。

③ 采用 PERCENTILE 函数计算 95% 降雨场次控制率所对应的设计降雨量。

3.3 设施规模计算

《438 技术导则》介绍了多种预测场地需控制的径流体积的方法^[6],包括直接推算法、合理化公式法、美国全国科学研究委员会(NRCS)的 TR-55 模型以及美国环境保护署的雨水管理模型(SWMM)。其中,重点介绍并推荐使用直接推算法,该方法能够模拟基本的水文过程,对径流的预测过程与 SWMM 相似,但更为简便易算,不足之处是对霍顿公式的直接应用会导致渗透量过大。

设施规模计算时将径流系数概化到洼地蓄水和渗透损失中。不同用地性质产生的径流量由下式确定:

$$R = R_f - S - L \quad (11)$$

式中 R ——径流量

R_f ——降雨量

S ——洼地储存量

L ——入渗损失量

场地被简单划分为三种类型:屋面、铺装和透水地表,按照式(11)分别计算各下垫面径流量后依据场地面积进行加权平均,得出场地内总设计径流深度,具体见下式:

$$H_{\text{场地}} = (R_{\text{屋面}}A_{\text{屋面}} + R_{\text{铺装}}A_{\text{铺装}} + R_{\text{透水地表}}A_{\text{透水地表}}) / A_{\text{场地}} \quad (12)$$

式中 $H_{\text{场地}}$ ——场地内总设计径流深度,mm

$A_{\text{场地}}$ ——场地内开发项目占地总面积,m²

$A_{\text{屋面}}$ 、 $A_{\text{铺装}}$ 、 $A_{\text{透水地表}}$ ——分别为屋面、铺装、透水地表下垫面面积,m²

$R_{\text{屋面}}$ 、 $R_{\text{铺装}}$ 、 $R_{\text{透水地表}}$ ——分别为屋面、铺装、透水地表下垫面 95% 降雨场次对应的径流深度,mm

4 统计方法对比分析

对上述三种统计方法特点进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 不同统计方法特点的比较

Tab. 1 Comparison of characteristics of different statistical methods

统计法	降雨数据类型	出发点	复杂程度	输出结果	特点说明
指南统计法	24 h 降雨量数据 (20:00—20:00)	维持区域良性水文 循环	较易	雨量控制率	未考虑降雨间隔与设施排空时间关系,与真实的径流控制场景吻合度低
PONDRISK 统计法	小时降雨数据	以径流污染控制为 目标	复杂	雨量控制率 场次控制率	需要进行场雨划分,考虑降雨间隔与设施排空时间关系,与真实的径流控制场景吻合度高
PERCENTILE 函数统计法	24 h 降雨量数据 (24:00—24:00)	维持区域良性水文 循环	易	场次控制率	未考虑降雨间隔与设施排空时间关系,与真实的径流控制场景吻合度低

5 案例研究

为进一步对比上述统计方法的差异,以北京市为例,选取 30 年(1976 年—2005 年)24 h 降雨量数据(20:00—20:00),采用上述三种方法进行设计降雨量的统计分析。其中,指南统计法与 PERCEN-

TILE 函数统计法扣除小于或等于 2 mm 的降雨量以及降雪量,PONDRISK 统计法采用 24 h 降雨间隔划分降雨场次,设施排空时间分别取 24 h 和 48 h,初期损失取 2 mm,径流系数取 0.7,三种方法的统计结果如表 2 所示。

表 2 不同统计方法统计结果对比

Tab. 2 Comparison of statistical results of different statistical methods

总量(场次)控制率/%			50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	
设计降雨量/ mm	指南统计法		总量	11.1	13.1	15.3	17.8	20.8	24.2	28.6	34.6	43.0	57.6
			场次	8.7	10.1	11.8	14.1	16.9	20.4	24.8	29.0	36.6	51.0
	PONDRISK 统计法	排空时间 24 h	总量	4.8	5.5	6.3	7.3	8.4	9.7	11.5	13.8	17.1	21.3
			场次	3.7	4.4	5.3	6.2	7.3	8.3	9.6	11.7	14.7	19.4
		排空时间 48 h	总量	6.8	7.8	9.0	10.3	11.8	13.7	16.2	19.5	24.4	32.7
			场次	4.7	5.7	6.7	8.2	9.5	11.3	13.2	15.3	19.2	27.4
	PERCENTILE 函数统计法		场次	8.7	10.0	11.7	14.1	16.8	20.5	24.5	28.9	36.3	50.8

5.1 指南统计法与PONDRISK 统计法

由表 2 可知,PONDRISK 统计法的结果明显低于指南统计法,究其原因,一方面 PONDRISK 统计法的统计结果为设施容积(不包括排空的径流量)对应的总量/场次控制率,而指南统计法为设计降雨量(包括排空的径流量)。此外,PONDRISK 统计法采用场降雨数据,指南统计法采用 20:00—20:00 的 24 h 降雨数据,降雨数据类型不一致不能将二者进行直接比较。

为了在同一层面比较两种方法的差异,做如下处理:

① 将 1976 年—2005 年 30 年降雨数据以 24 h 降雨间隔划分降雨场次,两种统计法均采用此降雨数据进行统计。

② PONDRISK 统计法转换为“设施容积 + 排空径流量”与总量/场次控制率的关系。

③ 将指南统计法中的设计降雨量转化为径流量。

经重新统计分析,二者的统计结果基本相同,具体如表 3 所示。

表 3 指南统计法与 PONDRISK 统计法结果对比

Tab. 3 Comparison of statistical results between Guide statistical method and PONDRISK statistical method

径流总量控制率/%	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
指南统计法结果/mm	11.6	13.6	15.9	18.6	21.7	25.8	30.7	37.2	47.2	68.0
PONDRISK 统计法结果/mm	12.0	14.0	16.4	19.1	22.4	26.5	31.5	37.9	48.5	69.3

5.2 指南统计法与PERCENTILE 函数统计法

指南统计法与 PERCENTILE 函数统计法本质上没有区别,都是对 24 h 降雨数据进行统计分析,虽然计算工具不同,但实质上方法一致。从统计结果(见图 2)来看,95% 的 24 h 降雨场次控制率对应的设计降雨量明显高于 85% 雨水年径流总量控制率对应的设计降雨量。以 85% 雨水年径流总量控制率对应设计降雨量($H_{85\% \text{ 雨量}}$)与 95% 的 24 h 降雨场次控制率对应设计降雨量($H_{95\% \text{ 场次}}$)的比值作为参考,统计我国 186 座城市的“ $H_{85\% \text{ 雨量}}/H_{95\% \text{ 场次}}$ ”值,其范围在 0.56 ~ 0.92 之间,约 90% 的城市比值小

于0.75。也就是说,若采用美国95%降雨场次控制率作为设计标准,我国雨水源头减排设施的设计规模将是现行标准的1.3倍,甚至更多。

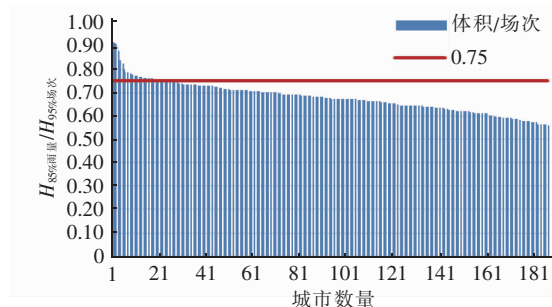


图2 我国186座城市“体积/场次”比值

Fig.2 Volume/event ratio of 186 cities in China

6 结论与建议

① 指南统计法以维持区域自然水文循环为出发点,统计结果与PONDRIK统计法基本持平,控制要求低于PERCENTILE函数统计法。不足之处在于,指南统计法采用20:00—20:00的24 h降雨量数据,未考虑排空时间与降雨间隔关系,将造成理论控制目标与实际控制效果之间存在差异。

② PONDRIK统计法以径流污染控制为出发点,统计过程涉及降雨场次划分和设施排空时间的选择,理论控制率和实际控制效果吻合度更高。需要注意的是,PONDRIK统计法的统计结果不包括排空的径流量,导致统计结果偏小,这易使人错误地认为只需很小的设计降雨量就可以达到径流总量控制目标。

③ 美国《能源独立与安全法案》第438条款提出的目的在于“维持及恢复开发前的水文状态”,与我国的出发点一致。但我国186座城市的统计结果表明,“ $H_{85\% \text{雨量}}/H_{95\% \text{场次}}$ ”比值在0.56~0.92之间,美国的实际控制标准比我国高。

综上,三种方法的根本出发点虽然不同,但实际工程中,追求“水量”与“水质”协同控制的目标是一致的,这也符合绿色雨水设施的多功能特性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Guo J C Y, Urbonas B. Maximized detention volume de-

termined by runoff capture ratio[J]. J Water Resour Plann Manage, 1996, 122(1): 33–39.

- [3] 闫攀,车伍,赵杨,等. 绿色雨水基础设施构建城市良性水文循环[J]. 风景园林, 2013, (2): 32–37.
Yan Pan, Che Wu, Zhao Yang, et al. Establish a healthy hydrological cycle in urban area by green stormwater infrastructure[J]. Landscape Architecture, 2013, (2): 32–37 (in Chinese).
- [4] Urban Watersheds Research Institute. User's Manual: Water Quality Capture Optimization and Statistics Model (WQ-COSM) V2.0[M]. USA: Urban Watersheds Research Institute, 2012.
- [5] 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 total rainfall runoff volume capture target [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(10): 61–69 (in Chinese).
- [6] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. 水资源保护, 2017, (2): 6–12.
Li Junqi, Li Xiaojing, Wang Wenliang, et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance [J]. Water Resources Protection, 2017, (2): 6–12 (in Chinese).



作者简介:李俊奇(1967—),男,山西稷山人,博士,教授,院长,长期从事城市雨水控制利用理论与技术、水环境生态技术、环境与资源政策等研究。

E-mail: lijunqi@bucea.edu.cn

收稿日期:2017-12-14