

不同下垫面径流系数与雨强及历时关系的实验研究

武晟¹ 汪志荣² 张建丰¹ 解建仓¹ 汪雅梅¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2. 天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 天津 300191)

摘要 城市下垫面类型的多样化,使得径流系数在时空上的变化越来越复杂。采用自制模拟降雨系统,对 SBS、不透水地砖、水泥地面、透水砖和草地等典型下垫面进行了实验研究。结果表明:弱透水性的下垫面径流系数容易达到较高的稳定值,透水砖的下渗能力接近草地。双曲线模型能够较准确地描述径流系数与单影响因素之间的关系,并得到了具有一定物理意义的降雨历时(或雨强)与各下垫面径流系数的最优拟合公式,且除透水砖外其相关系数达 92%~97%,可见降雨历时对径流系数的影响较大。相同降雨条件下,3种弱透水性下垫面按径流系数由大到小依次为:不透水砖、SBS、水泥路面。降雨量较小时,下垫面的表面洼蓄及附着水层的比例不能忽略,此时径流系数不能反映渗透能力。透水砖和草地的下渗能力很强,适当增加其面积可提高城市雨水下渗能力。本研究可为城市雨水利用研究的后续工作提供参考。

关键词 雨水利用;径流系数;降雨强度;下垫面

中图分类号 P 333

文章编号 1007-4333(2006)05-0055-05

文献标识码 A

Experimental study on relationship among runoff coefficients of different underlying surfaces, rainfall intensity and duration

Wu Sheng¹, Wang Zhirong², Zhang Jianfeng¹, Xie Jiancang¹, Wang Yamei¹

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin Institute of Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract The change of runoff coefficient in the time and space has become more and more complicated because of the diversification of the underlying surface of a city. The experiments for 5 typical underlying surfaces were carried out, that is, SBS, waterproof brick, cement road surface, permeable brick and grassplot by the artificial rainfall simulation system. The results show that the runoff coefficient is easier to reach a steady value for a poor infiltrate surface. The permeability of a permeable brick is close to a grassplot. Hyperbolic models had a higher precision to describe the relationship between runoff coefficient and single influence factor. The optimized simulation formulae of rainfall duration and runoff coefficient with certain physical significance were obtained. The rainfall duration has a significant effect on runoff coefficient and its correlation coefficient is as high as 92% - 97% except for a permeable brick. Under the same condition of rainfall, the order of runoff coefficient of three poor infiltrate surfaces is waterproof brick, SBS and cement road surface in sequence. The proportion of low-lying detention and coherence water layer couldn't be neglected with a small rainfall and the permeability couldn't be reflected by runoff coefficient. The infiltration capacity of underlying surface in a city will be improved with the increase of the proportion of permeable brick and grassplot expanded.

Key words rainwater utilization; runoff coefficient; rainfall intensity; underlying surface

城市硬化地面的不断增加导致城市地表径流量激增,在产生诸多危害的同时,也使人们发现了这些淡水资源的利用价值,城市径流不再一泻了之。地

表径流研究中,径流系数是分析城市降雨产流量的重要参数之一,在城市这种下垫面人为复杂化的地区,径流系数的时空变化也变得复杂起来。早在

收稿日期: 2006-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271022;50279041); 陕西省水资源与环境重点实验室基金项目

作者简介: 武晟,博士研究生,主要从事城市雨水利用、洪水灾害评估的研究, E-mail: wshmonkey@yahoo.com.cn

1983年,美国“国家城市径流计划(NURP)”研究表明^[1],随着流域内不透水面积百分比的增加,观测的径流系数也在增大,导致其在研究领域的空间分布上不再单一化。丹佛的城市排水及防洪署经过12年的研究发现^[2],径流系数随着降雨量的增加而增大;Schaake等的研究表明,径流系数还随暴雨重现期的延长而增大^[3]。可见,降雨量的时空分布也对径流系数产生了影响^[4]。

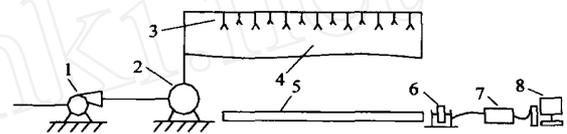
近年来不少学者对城区径流系数的变化进行了研究,叶镇^[5]等根据区域内不同下垫面面积加权法得到综合径流系数,较好地解决了城市发展过程中下垫面变化引起的径流计算准确性问题;岑国平^[6]等从汇水下垫面到汇水口存在不同路径的角度,提出间接不透水区和直接不透水区的划分,并将其影响纳入径流系数的计算。但是,这些计算方法的改进并没有改变降雨量决定下垫面径流系数值的实质。Ackerman^[7]等在对加利福尼亚南部大区域暴雨径流水质、流量的研究中,从整个区域的历史降雨量、产流量资料入手确定径流系数,实际上得到的是一种综合径流系数。Cristina^[8]等在对公路产流的研究中,尽管考虑了雨型的影响,但径流系数仍由降雨量均值确定。这些研究没有考虑到在降雨总量一定的条件下,降雨强度、历时等因素对径流系数也产生影响的问题,因此通过实验分析建立前后者之间的函数关系是十分必要的。笔者通过模拟降雨实验对此进行了研究。

1 实验设备与方法

为了真实模拟自然降雨环境,根据国家施工技术规范,在西安理工大学露天实验场铺设了5种典型下垫面:SBS(屋面防水材料)、不透水地砖(人行道铺设材料)、水泥地面、透水砖(中心为方形空,透水与不透水面积比1:9)和草地。设计安装了露天人工模拟降雨系统^[9],采用喷淋式喷头模拟降雨,降雨强度0.1~3.0 mm/min,雨强调节梯度0.1 mm/min。降雨装置见图1,各下垫面均为1 m×10 m、南高北低的长方形,坡度为0.5%。

图1中的加压系统以最不利工况点在最不利供水条件下能够正常作为标准,选用IRG50-160I型单级单吸管道离心泵。喷洒系统使用3种喷头,分别是:美国雨鸟公司生产的SP30-340微型喷头(旋转式)和西安理工大学研制的小型 and 中型喷头(静止式)。实验得到每种喷头的喷洒特性(图2)后,根据

实验场地大小、几何形状、管道布置、实验雨强和雨强均匀度等要求,设计了8组喷头组合,可提供0.1~3.0 mm/min,步长0.1 mm/min的雨强,实测单组和多组喷头的雨强均匀度>85%,满足实验要求。图3示出单组喷头在设计要求雨强0.1 mm/min的条件下实测喷洒特性值。相同雨强、历时等条件下的降雨平均雨强实测值并不稳定,最大偏差达到19%,主要是供水管道压力摆动、喷头喷撒均匀度低等原因造成的。为消除这一影响,对每场降雨强度采取了实测措施。



1. 加压水泵;2. 稳压管;3. 喷头组;4. 风障;5. 下垫面;
6. 翻斗流量计;7. 数据采集仪;8. 计算机

图1 模拟降雨装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a rainfall simulation system

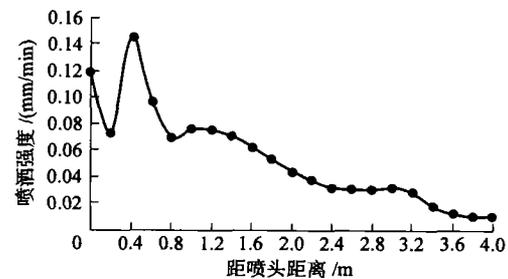


图2 微型喷头的喷洒特性

Fig. 2 Sprinkling characteristic of subminiature sprinkler

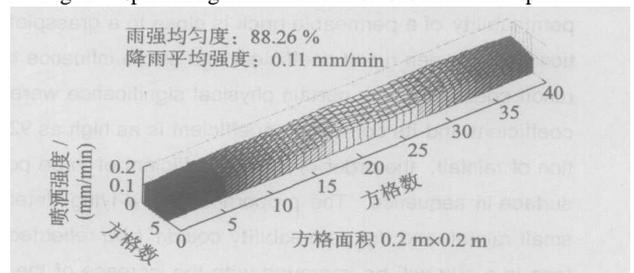


图3 单组喷头喷洒特性示意图

Fig. 3 Sprinkling characteristic of single team sprinklers

为控制降雨强度,在测控系统中设计了3套翻斗流量计,实验发现流量与翻斗翻转的时间之间有着很好的函数关系。静水流量500 mL 铸铁翻斗的流量-时间拟合曲线(图4)相关系数>0.99,计算与实测值误差<0.01;因此针对3套翻斗流量计建立了流量-时间拟合公式,据此进行每一场降雨的径流总量计算。例如,做降雨历时对水泥路面径流系数

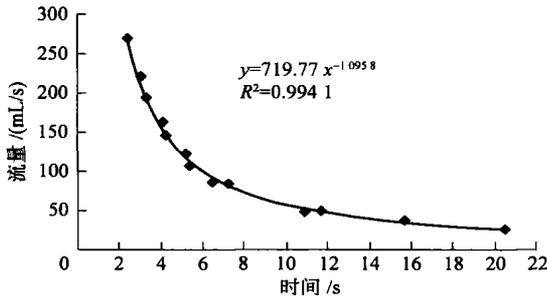


图 4 500 mL 铸铁翻斗流量-时间关系图
Fig. 4 Relationship of runoff and duration of 500 mL cast iron tipping bucket

的影响实验时,根据水泥路面下渗滤较低的特点,设计雨强 0.26 mm/min,选取不同历时进行径流量的实测(表 1),采用量杯实测每场降雨的平均强度,并根据降雨历时得到总降雨量,最后计算得到径流系数值。

表 1 水泥路面降雨历时与径流系数的关系

Table 1 Relationship of rainfall duration and runoff coefficient of cement road surface

降雨历时/ min	平均降雨强 度/(mm/min)	降雨量/ L	产流量/ L	径流 系数
5	0.23	11 655	5 148	0.44
10	0.29	28 762	24 619	0.86
10	0.27	26 965	21 730	0.81
10	0.28	28 290	21 806	0.77
15	0.26	38 689	31 551	0.82
20	0.21	41 956	36 254	0.86
42	0.26	109 250	96 986	0.89
90	0.21	190 999	182 417	0.96
123	0.26	315 824	299 949	0.95

2 实验原理

受地形、雨型等因素影响,各地区暴雨强度计算公式不同,雨强 q 与地方特征参数有关^[10]:

$$q = \frac{167 A_1 (1 + c \lg T)}{(t + b)^n} \quad (1)$$

式中: q 为降雨强度, L/(s·hm²); T 为重现期, a; t 为降雨历时, min; A_1 、 c 、 b 、 n 为地方参数,各地区的具体取值可在给排水设计手册中查到。从式(1)可以看出,在一个给定地区, q 只与 t 的变化有关,所以总降雨量可表示为

$$Q_s = \int_0^H 3\,600 \frac{q}{10\,000} A dt \quad (2)$$

式中: Q_s 为次降雨总量, L; H 为降雨总历时, min; A 为下垫面面积, hm²。则径流系数

$$= Q / Q_s \quad (3)$$

式中: Q 为次降雨径流总量, L。

为突出单因素对径流系数的影响,实验中对其他影响因素进行了严格控制,例如分析雨强对径流系数的影响时,次降雨采用均匀雨强,以消除雨型的影响;有植被的下垫面将土壤前期含水量控制在一定范围内;根据下垫面的下渗特点选取降雨历时等。实验采用的公式最终形式为

$$= Q / (qtA) \quad (4)$$

3 实验结果分析

影响径流系数变化的因素很多,如降雨强度、降雨历时、土壤前期含水量等,考虑到降雨强度和降雨历时是影响产汇流的 2 个主要因素^[9],因此分别对这 2 个因素与径流系数的关系进行分析,建立各种下垫面的最优拟合公式。

3.1 降雨历时与径流系数关系的最优拟合

在均匀雨强条件下,选择不同的次降雨历时,对各种下垫面的降雨历时-径流系数关系进行定量分析。根据汇水历时决定最短次降雨历时,当径流系数趋于水平直线时,认为已稳定出流,不再做更长历时的实验。为减小测量时间的人为误差,各种下垫面雨强的选取以汇流时间易于测量为准。

水泥路面的降雨历时与径流系数的实测点分布见图 5。可以看出,降雨历时越长径流系数越大,说明地表径流量占总降雨量的比例随时间的延长而增大。降雨历时约 80 min 时,径流系数趋近于常数,此时基本达到了稳渗状态。根据测点分布趋势可以看出,降雨历时与径流系数呈非线性关系,采用 Excel 中的拟合关系式虽然也能达到较高的相关性,但是拟合方法仅仅是为了使关系曲线更趋近于所有的实验测点,公式本身无物理意义,因此,本文采用数学模型对其关系加以描述。

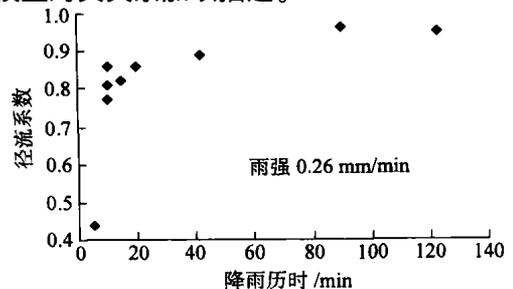


图 5 水泥路面实测点分布

Fig. 5 Measured data distribution of cement road surface

降雨初期,雨水下渗及填注,到某一初始时刻 t_0 形成地表径流,汇流口开始收集雨水,此时径流系数从 0 开始增大;当入渗稳定后,单位时间内产流量与降雨量比值 n 保持恒定,径流系数无限逼近 n 。根据以上分析,降雨历时 t 与径流系数的关系曲线应符合以下条件:

1) 从 0 到产流初始时刻 t_0 , 径流系数为 0, 随后开始增大;

2) 时间无限延长, 径流系数无穷接近于某一稳定值 $n (n < 1)$, 实验测得。

将多个函数类型与图 5 的数据点分布形状进行比较, 选择双曲线和倒指数曲线进行拟合。边界条件为:

$$\begin{cases} = n & t \\ = 0 & t \in (0, t_0) \end{cases}$$

用均方差比较 2 种线型的拟合精度, 双曲线的最优拟合曲线为 $1/ = 1 + (3.705 / (t - 2))$, 相关系数 0.94; 倒指数的最优拟合曲线为 $= e^{-2.346 / (t - 2)}$, 相关系数 0.90。可以看出, 双曲线拟合效果较好, 因此被选做拟和函数。在雨强 0.26 mm/min 的条件下, 水泥路面的降雨历时与径流系数的关系为

$$1/ = 1 + \frac{3.705}{t - 2} \quad (5)$$

同理对各下垫面降雨历时与径流系数的实验结果进行分析, 得到最优拟合方程(表 2), 相关系数除透水砖外均超过 0.92, 说明降雨历时对径流系数具有较大影响。由拟合公式可以看出, 相同降雨条件下, 3 种弱透水性下垫面的径流系数由大到小依次为: 不

表 2 降雨历时与径流系数的最优拟合方程

Table 2 Optimum fitting equation between rainfall duration and runoff coefficient

下垫面类型	降雨强度/ (mm/min)	最优拟合方程	相关系数
水泥路面	0.26	$1/ = 1 + (3.71 / (t - 2))$	0.96
水泥路面	1.03	$1/ = 1 + (1.9 / (t - 0.53))$	0.94
不透水砖	0.26	$1/ = 1 + (1.82 / (t - 2.6))$	0.95
不透水砖	0.97	$1/ = 1 + (0.59 / (t - 0.93))$	0.96
SBS	0.27	$1/ = 1 + (2.5 / (t - 1.97))$	0.97
SBS	0.52	$1/ = 1 + (1.06 / (t - 0.92))$	0.92
SBS	0.99	$1/ = 1 + (1.54 / (t - 0.53))$	0.94
透水砖	2.03	$1/ = 2.53 + (282.3 / (t - 1.92))$	0.66
草地(覆盖率 100%)	1.32	$1/ = 1.49 + (76.1 / (t - 2.15))$	0.95

透水砖、SBS、水泥路面。从透水砖和草地的降雨历时与径流系数最优拟合公式常数项取值和降雨强度可以看出, 即使在较大降雨强度下, 稳定产流后二者的稳渗率仍较高, 说明其下渗能力很强, 适当提高这 2 种下垫面的比例, 可明显增强城市雨水下渗能力。

透水砖地面拟合公式相关性较差, 主要原因是多场降雨后其局部发生下陷, 改变了下垫面的实验条件, 但仍能够反映其下渗能力的变化趋势。覆盖率 100% 的草地, 在严格控制土壤前期含水量的条件下, 相关性达到了 95%, 但实验测量数据偏少(表 3)也是其相关性较高的原因, 因此还需做进一步的实验加以验证。

表 3 草地降雨历时与径流系数的关系

Table 3 Relationship of rainfall duration and runoff coefficient of grasplot

降雨历时/ min	降雨强度/ (mm/min)	降雨量/ L	产流量/ L	径流系数
30.3	1.52	459	108	0.24
60.3	1.31	791	294	0.37
134.4	1.19	1596	741	0.46
92.5	1.28	1184	509	0.43

注: 草地覆盖率 100%。

3.2 雨强与径流系数关系的最优拟合

强透水性的草地和透水地面需要长降雨历时、大雨强的实验条件, 并且实验周期较长。由于时间关系, 本研究仅做了弱透水性下垫面的雨强影响实验。弱透水地面在地表产生径流不久, 下渗滤就基本达到稳定, 考虑到汇流最远距离仅 10 m, 为尽量使实验数据变化趋势明显, 降雨历时选择了 10 min。

实验发现, 3 种弱透水性下垫面的稳渗率可近似为 0, 产流前的雨水主要用来满足下垫面的持水量、注蓄和蒸发; 因此降雨强度很小时, 10 min 的降雨没有产生地表径流, 雨强增大到一定值时, 在 10 min 末出现地表径流, 此后随着每场降雨的雨强不断增大, 径流系数也逐渐增大。所以拟合方程依然要满足以下 2 个边界条件:

$$\begin{cases} = 1 & p \\ = 0 & p \in (0, p_0) \end{cases}$$

式中: p_0 为降雨 10 min 时下垫面产生径流的最小雨强。最优方程的标准是相关系数最大, 结果见表 4, 最小 0.95 的相关系数说明雨强对径流系数同样具有较大的影响。实验最小雨强条件下, 3 种下垫

面在 10 min 内仍能产流,因此实际临界产流最小雨强由最优拟合公式推算得到。各下垫面按产生地表径流的最小雨强由大到小顺序为:SBS、水泥路面、不透水砖。与降雨历时-径流系数关系实验分析结果不同的是,SBS 的透水性高于水泥路面,这是由于短历时、小雨强条件下总降雨量不大,在 SBS 下垫面油性材料表面附着相对较厚的不流动水层占总降雨量的比例不能忽略,此时径流系数的大小不能表明下渗能力的强弱,还需考虑其他因素的影响程度。

表 4 降雨强度与径流系数关系最优拟合方程

Table 4 Optimum fitting equation between rainfall intensity and runoff coefficient

下垫面类型	最优拟合公式	相关系数
水泥路面	$1/p = 1 + (0.038 / (p - 0.060))$	0.96
不透水砖	$1/p = 1 + (0.036 / (p - 0.037))$	0.95
SBS	$1/p = 1 + (0.021 / (p - 0.200))$	0.98

注:降雨历时 10 min。

4 结 论

1) 弱透水性的 3 种下垫面下渗能力由强到弱依次为:水泥路面、SBS、不透水砖;

2) 降雨量较小时,下垫面的表面洼蓄及附着水层的比例不能忽略,径流系数不能反映渗透能力;

3) 透水砖具有与覆盖率 100% 的草地基本相同的下渗能力,城市一部分下垫面(如人行道、公园广

场)铺设透水砖,能够提高城市的降雨下渗量。

参 考 文 献

- [1] U. S. Environmental Protection Agency. Results of the nationwide urban runoff program[S/CD]. Washington: NTIS Access No. PB84 - 18552, 1983
- [2] Maidment D R. 水文学手册[M]. 张建云,李纪生,译. 北京:科学出版社,2002:1167
- [3] Schaake J C, Geyer J C, Knapp J W. Experimental examination of the rational method[J]. J Hydraul Div Am Soc Civ Eng, 1967,93(6):353 - 370
- [4] Maidment D R. 水文学手册[M]. 张建云,李纪生,译. 北京:科学出版社,2002:1167 - 1216
- [5] 叶镇,刘鑫华,胡大明,等. 区域综合径流系数的计算及其结果评价[J]. 中国市政工程,1994,4:43 - 45
- [6] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市暴雨径流计算模型的建立和检验[J]. 西安理工大学学报,1996,12(3):184 - 190
- [7] Ackerman D, Schiff K. Modeling storm water mass emissions to the southern california bight[J]. Journal of Environmental Engineering,2003(4):308 - 317
- [8] Cristina C M, Sansalone J J. Kinematic wave model of urban pavement rainfall-runoff subject to traffic loadings[J]. Journal of Environmental Engineering,2003(7):629 - 636
- [9] 武晟. 西安市降雨特性分析和城市下垫面产汇流特性实验研究[D]. 西安:西安理工大学,2004
- [10] 同济大学. 排水工程:上册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978