

城市小流域暴雨的体积径流系数推求与应用

王文亮¹, 苏成庆¹, 尹佳伟¹, 田晓霞¹, 郭纯园², 李俊奇¹

(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. 科罗拉多大学土木工程学院, 科罗拉多州 丹佛 80217)

摘要:为提高城市小流域降雨径流计算方法的一致性,基于城市小流域水文基础理论,分析了推理公式法与 SWMM 运动波法计算地表径流量的异同,提出了涉及土壤类型、设计降雨强度及不透水面积比的体积径流系数推求方法。以北京为应用实例,利用提出的方法推求体积径流系数,代入推理公式计算了北京暴雨径流峰值流量,并与 SWMM 的计算结果进行对比。结果表明:在降雨和水文损失时空分布均匀的假设下,推理公式法是运动波法的特例,体积径流系数与雨量径流系数概念一致,与流量径流系数在数值上相等;基于体积径流系数,利用推理公式计算得到的北京暴雨径流峰值流量与 SWMM 计算结果具有较高的一致性。

关键词:城市小流域;体积径流系数;推理公式法;SWMM;运动波法

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0028-06

Derivation and application of volume-based runoff coefficient for urban small catchment stormwater//WANG Wenliang¹, SU Chengqing¹, YIN Jiawei¹, TIAN Xiaoxia¹, GUO Chunyuan², LI Junqi¹ (1. *Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China*; 2. *Department of Civil Engineering, University of Colorado, Denver 80217, USA*)

Abstract: To improve the consistency of rainfall runoff calculation methods in urban small catchments, based on the hydrological basic theory of urban small catchments, the similarities and differences between the rational formula method and the SWMM motion wave method for calculating surface runoff were analyzed. A volume-based runoff coefficient calculation method involving soil type, design rainfall intensity, and impermeable area ratio was proposed. A case study was carried out in Beijing. The proposed method was used to calculate the volume-based runoff coefficient, which was taken into the rational formula to calculate the peak flow of rainstorm runoff, and compared with the calculation results of SWMM. The results indicate that under the assumption of uniform spatiotemporal distribution of rainfall and hydrological losses, the rational formula method is a special case of the motion wave method. The concept of volume-based runoff coefficient is consistent with that of rainfall runoff coefficient, and is numerically equal to that of flow runoff coefficient. Based on the volume-based runoff coefficient, the peak flow of rainstorm runoff in Beijing calculated by the rational formula has a high consistency with the SWMM calculation results.

Key words: urban small catchment; volume-based runoff coefficient; rational formula method; SWMM; kinematic wave method

城市小流域水文模拟过程中,推理公式法和暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)的运动波法是国内外普遍采用的地表径流计算方法^[1-4],确保两种方法径流计算结果的一致性 是科学设计城市排水基础设施的前提。径流系数是推理公式的重要参数之一,在我国有流量径流系数和雨量径流系数之分,取值与降雨强度、集水区形状、坡度、不透水面积比、土壤入渗性能等水文要素相关;美国^[5-19]、英国^[20]、德国^[21]的径流系数取值均

建立在“不同用地类型的不透水面积比”基础之上。美国、英国给出了不同土壤类型、设计降雨重现期和不透水面积比对应的体积径流系数,英国的径流系数取值还考虑了雨峰位置和集水区形状的影响。然而,我国径流系数的概念还不够清晰,取值依据不明确,未建立径流系数与降雨强度等水文要素之间的量化关系,极大地影响了推理公式法在应用过程中与 SWMM 等数值模型方法计算结果的一致性。

鉴于此,本文基于城市小流域水文基础理论,分

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200700);北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目(BPHR20220108)
作者简介:王文亮(1984—),男,副教授,博士,主要从事城市水文基础理论与技术研究。E-mail:wangwenliang@bucea.edu.cn

析推理公式法与 SWMM 运动波法的区别与联系,理清体积径流系数、流量径流系数与雨量径流系数的概念,考虑土壤入渗特征、设计降雨强度、不透水面积比等水文要素,提出体积径流系数的推求方法,并利用 SWMM 进行一致性检验,以期城市小流域水文模拟过程中径流系数的选取提供参考。

1 推理公式法与体积径流系数

1.1 推理公式法是 SWMM 运动波法的特例

SWMM 是水文过程模拟研究中普遍使用的开源模型^[22]。推理公式法与 SWMM 产汇流计算方法原理不同,计算条件相同时,提高推理公式法与 SWMM 法计算结果的一致性是其推广应用的关键问题^[23]。SWMM 运动波法计算地表漫流流量时,需将自然形状的实际集水区转换为虚拟的矩形集水区^[24-26],如图 1 所示。

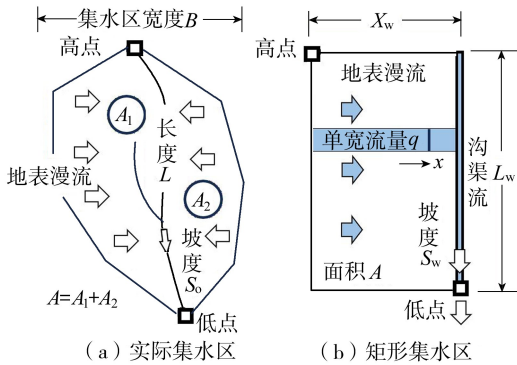


图 1 集水区转换示意图

Fig. 1 Diagram of watershed conversion

集水区转换的计算公式为

$$\begin{cases} \frac{L_w}{L} = (1.5 - Z) \left[\frac{2}{1 - 2K} \left(\frac{A}{L^2} \right)^2 - \frac{4K}{1 - 2K} \frac{A}{L^2} \right] \\ \frac{S_o}{S_w} = \frac{A}{LL_w} + \frac{L_w}{L} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $Z = \max(A_1, A_2) / A$

式中: L_w 为矩形集水区宽度; L 为实际集水区水路长度; Z 为面积偏态系数; A_1 、 A_2 为水路分割形成的两个子集水区的面积; A 为集水区总面积; K 为实际集水区形状因子 $\frac{A}{L^2}$ 的上限值, 本文取 $K=4$; S_o 为实际集水区坡度; S_w 为矩形集水区坡度。

运动波法的控制方程包括连续方程和动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = I_e \\ S_f = S_w \end{cases} \quad (2)$$

式中: y 为地表漫流水深; t 为时间; q 为地表漫流单宽流量; x 为地表漫流流程; I_e 为净雨强度; S_f 为磨

阻水力坡度。可采用均匀流谢才-曼宁公式计算运动波法的单宽流量, 计算公式见式(3); 将 q 对时间 t 求偏导数得到式(4), 可理解为: 在某流程处, 流量对时间的变化率等于流速乘以水深对时间的变化率, 故有式(5)成立; 将式(4)(5)代入式(2), 得到式(6), 即净雨强度可表示为径流系数与降雨强度之积。

$$q = \frac{1}{n} y^{\frac{5}{3}} S_w^{\frac{1}{2}} = \alpha y^{\beta} \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \alpha \beta y^{\beta-1} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (4)$$

$$u = \alpha \beta y^{\beta-1} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial t} = u I_e \\ I_e = \varphi I \end{cases} \quad (6)$$

式中: n 为粗糙系数; α 、 β 为系数; u 为地表漫流流速; I 为降雨强度; φ 为径流系数。根据函数关系 $q = q(x, t) = q[x(t), t] = q(t)$ 可得:

$$dq = u \varphi I dt \quad (7)$$

推理公式法的基本假设为: ①降雨强度时空分布均匀, 径流量与降水量呈线性关系, 设计降雨历时等于集水时间内产生的峰值流量; ②降雨损失时空分布均匀, 降雨前期平均土壤湿润条件下, 径流系数随土壤类型、不透水面积比和降雨强度变化; ③集水区无蓄水效应。在该假设下, 推理公式法计算得到的径流过程线呈梯形或三角形。当设计降雨历时等于集水时间时, 对式(7)进行积分得到式(8), 进而可得到集水区峰值流量的计算公式(式(9)), 即为推理公式。综上, 在降雨强度与降雨损失时空分布均匀的条件下, 推理公式法是运动波法的特例。

$$q_p = \int_0^{T_c} u \varphi I dt = u \varphi I T_c = \varphi I X_w \quad (8)$$

$$Q_p = \varphi I X_w L_w = \varphi I A \quad (9)$$

式中: q_p 为峰值单宽流量; T_c 为集水时间; Q_p 为集水区峰值流量; X_w 为矩形集水区长度。

1.2 体积径流系数、流量径流系数、雨量径流系数的关系

径流系数指一定汇水面积某一时间段内地面径流量与降水量的比值。部分规范标准称之为流量径流系数, 定义为形成峰值流量的历时(即集水时间)内产生的径流量与降水量之比, 并与雨量径流系数进行区分, 后者指一定时间内降雨产生的总径流量与总降水量之比^[1-3]。关于流量径流系数, GB50014—2021《室外排水设计标准》给出了屋面、不同材质铺装路面、公园和绿地的取值范围, 指出区域综合径流系数通过不同类型下垫面的径流系数加

权平均计算得到,并给出了建筑密集区、较密集区、稀疏区的综合径流系数取值范围;考虑降雨强度对径流系数的影响,规定了 20~30、30~50、50~100 a 内涝防治设计重现期对应的径流系数取值增幅范围^[2]。同时,GB50014—2021《室外排水设计标准》还给出了不同类型下垫面的雨量径流系数,对于同一种下垫面,雨量径流系数不大于流量径流系数。美国和英国的排水设计规范中,径流系数指径流体积(runoff volume)和降雨体积(rainfall volume)的比值,即体积径流系数,与我国雨量径流系数的概念一致。

由推理公式可得到流量径流系数的表达式(式(10)),表明当设计降雨历时大于或等于集水时间时,流量径流系数等于峰值流量与集水区面积上一定历时(等于集水时间)内平均雨强的比值。

$$\varphi_m = Q_p / (IA) \quad (10)$$

式中 φ_m 为流量径流系数。

当设计降雨历时大于或等于集水时间时,将径流过程线、降雨过程线分别与时间横坐标轴围成的面积相比,即总径流量与总降水量的比值称为体积径流系数,与雨量径流系数的概念一致,表达式为

$$\varphi_c = \int_0^{T_B} Q dt / \int_0^{T_d} I A dt = V_F / V_R \quad (11)$$

式中: φ_c 为体积径流系数; T_B 为径流总时长; T_d 为降雨总时长; V_F 为径流体积; V_R 为降雨体积。此时,推理公式法得到的径流过程线为梯形,通过推导,可得如式(12)所示的等式。可见,在满足推理公式基本假设的条件下,流量径流系数与体积径流系数等值。

$$\varphi_c = \left\{ \int_0^{T_c} \varphi_m I A (t/T_c) dt + \int_{T_c}^{T_d} \varphi_m I A dt + \int_{T_d}^{T_d+T_c} \varphi_m I A \cdot [1 - (t - T_d)/T_c] dt \right\} / (I A T_d) = \varphi_m \quad (12)$$

由流量径流系数与体积径流系数的定义可知,计算流量径流系数需已知集水时间,而计算体积径流系数则无需已知集水时间。既然理论上两者并无数值上的差别,故实践中,体积径流系数更具实用价值。

2 体积径流系数推求方法

将集水区分为不透水面和透水面分别进行径流计算,不透水面和透水面产生的径流分别排入管网系统称为并联模式,不透水面的径流流至透水面再排入管网系统称为串联模式^[27](图2)。根据 GB/T 51345—2018《海绵城市建设评价标准》《海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)》,海绵城市多采用串联模式,如将屋面、路面雨水接入

植草沟、绿化缓冲带,进而在一定程度上削减峰值流量和径流体积。根据式(11)分别推求并联模式和串联模式下的体积径流系数。

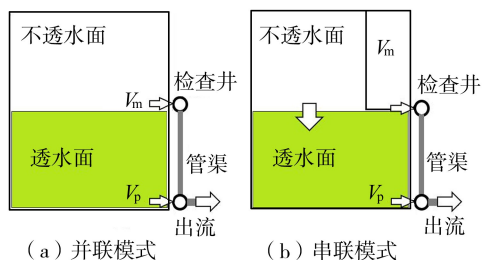


图2 并联模式和串联模式示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of parallel and series modes

a. 并联模式。并联模式下降雨体积和径流体积的计算公式为

$$V_R = PA \quad (13)$$

$$V_F = V_m + V_p \quad (14)$$

其中

$$V_m = (P - D_{vi}) I_a A$$

$$V_p = \begin{cases} (P - D_{vp} - F)(1 - I_a)A & V_p > 0 \\ 0 & V_p \leq 0 \end{cases}$$

式中: P 为降水量; V_m 、 V_p 分别为不透水面和透水面的径流体积; D_{vi} 、 D_{vp} 分别为不透水面和透水面的洼蓄量; I_a 为不透水面积占比; F 为累积入渗量。可以得到并联模式下体积径流系数的表达式为 $\varphi_c = m'[(1 - D_{vi}/P)I_a + m(1 - D_{vp}/P - F/P)(1 - I_a)]$ ($\varphi_c > 0$ 时 $m' = 1$, 否则 $m' = 0$; $V_p > 0$ 时 $m = 1$, 否则 $m = 0$)。

b. 串联模式。串联模式下,体积径流系数的计算需要首先确定截流比,即不透水面径流至透水面的比例。此时,不透水面和透水面径流体积的计算公式为

$$V_m = (1 - r)(P - D_{vi}) I_a A \quad (15)$$

$$V_p = m[r(P - D_{vi}) I_a A + (P - D_{vp} - F)(1 - I_a)A] \quad (16)$$

式中 r 为截流比, $r=0$ 表示完全不截流, $r=1$ 表示完全截流。可以得到串联模式下体积径流系数的表达式为 $\varphi_c = m'\{(1 - r)(1 - D_{vi}/P)I_a + m[r(1 - D_{vi}/P)I_a + (1 - D_{vp}/P - F/P)(1 - I_a)]\}$ 。不透水面上的径流流至透水面,延长了入渗过程,增加了雨水入渗量,故串联模式的体积径流系数小于并联模式。

3 实例应用

3.1 北京体积径流系数的推求

将提出的体积径流系数推求方法在北京进行实例应用,先确定当地设计降水量和降雨损失^[28]。采用积分形式的霍顿入渗公式计算累积入渗量,计算

公式为

$$F_t = f_c t + (f_0 - f_c)(1 - e^{-kt})/k \tag{17}$$

式中： F_t 为 t 时刻的累积入渗量； f_c 为稳定入渗率； f_0 为初始入渗率； k 为衰减系数。

我国现行规范标准尚无霍顿入渗和洼蓄损失相关参数推荐值，参考 Guo^[28] 的研究，按入渗能力由大到小将土壤分为 A、B、C、D 4 类，进而确定参数值，如表 1 所示。基于确定的参数值进行降雨损失计算，得到 A、B、C、D 4 类土壤的 2h 累积入渗量分别为 90.9、45.8、35.2、35.2 mm。

表 1 不同土壤类型的参数值

Table 1 Parameter values for different soil types					
土壤类型	$f_0/$ (mm/h)	$f_c/$ (mm/h)	$k/$ (1/h)	$D_{vp}/$ mm	$D_{vi}/$ mm
A	127.0	25.4	2.52	10.2	2.5
B	114.3	15.2	6.48	10.2	2.5
C、D	76.2	12.7	6.48	10.2	2.5

设计降水量和累积入渗量计算采用的降雨历时可取 1h 或 2h^[29]，而我国规范规定推理公式法适用的集水区面积上限为 2km²^[2]，由此计算得到的最大集水时间接近 1h；分别按降雨历时为 1h、2h 计算得到的体积径流系数差别很小，故本文降雨历时取 2h。根据北京暴雨强度公式^[29]，不同设计重现期的 2h 设计降水量的计算公式为

$$P_{2h} = \frac{1602t(1 + 1.037\lg T)}{167(t + 11.593)^{0.681}} \tag{18}$$

式中： P_{2h} 为 2h 设计降水量； T 为设计重现期。

考虑北京城区范围土壤以 C、D 类土壤为主，现计算 C、D 类土壤并联和串联模式下的体积径流系数，结果如图 3 所示。由图 3 可见，对于 0.5 年一遇的设计降雨，当不透水面积占比小于 60% 时，截流比越大，体积径流系数越小；当设计降雨强度大于 0.5 年一遇时，无论不透水面积占比大或小，并联和串联模式下的体积径流系数都近似相等，即雨强较大时，串联模式对径流量的削减效果可忽略。

3.2 体积径流系数一致性检验

采用 SWMM 对体积径流系数进行一致性检验。集水区实际坡度取北京城区范围地形坡度的平均值 6‰，集水区形状采用正方形，将其转换为矩形集水区，集水区面积取 2hm²，计算其宽度和坡度；霍顿入渗公式参数、透水面和不透水面的洼蓄量取值与体积径流系数计算公式中保持一致。2h 历时设计降雨雨型采用交替区块法得到^[30]，2 年一遇降雨雨型如图 4 所示。SWMM 计算累积入渗量时，将霍顿入渗公式计算得到的累积入渗量 F 与降水量 P 、地表积水量 W 之和进行比较，若 $F > P + W$ ，土壤实际入渗

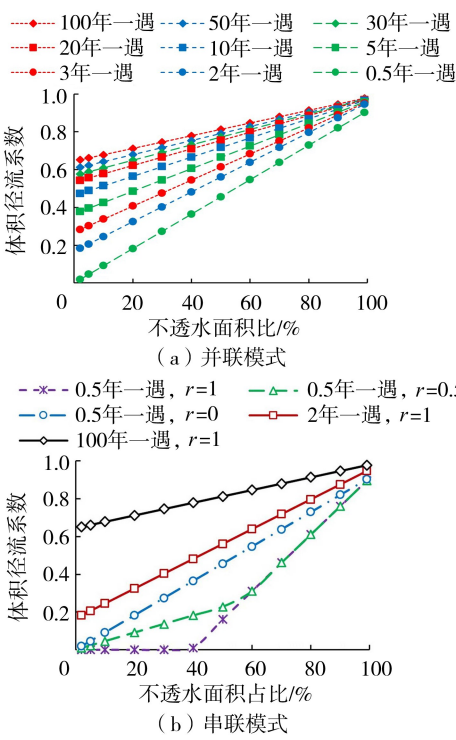


图 3 C、D 类土壤并联和串联模式下的体积径流系数
Fig. 3 Volume-based runoff coefficients for C and D soils in parallel and series modes

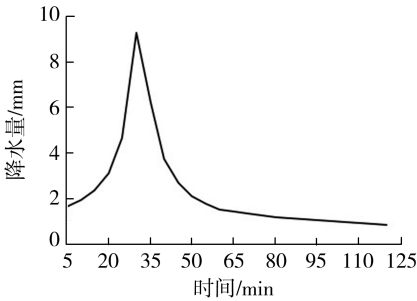


图 4 北京 2 年一遇设计降雨雨型
Fig. 4 Design rainfall pattern with 2-a return period in Beijing

量取降水量和地表积水量之和；若 $F < P + W$ ，土壤实际入渗量取霍顿入渗公式计算结果。

采用 SWMM 计算 2 年一遇、10 年一遇、100 年一遇 2h 设计降雨条件下，不同不透水面积占比对应的体积径流系数，与本文提出的推求方法计算结果进行比较，结果如图 5 所示。由图 5 可见，对于 2 年一遇设计降雨，提出的推求方法与 SWMM 计算得到的体积径流系数具有很高的-致性；对于其他较高重现期设计降雨，不透水面积占比大于或等于 40% 时，两种方法得到的体积径流系数具有较高的一致性。计算集水区透水面积上产生的降雨入渗损失时，按照时间可分为 3 个阶段：第一阶段是降雨过程中产生的入渗损失；第二阶段入渗损失产生于降雨停止后、径流深度大于洼蓄量时的退水过程，不

透水面积占比越小(透水面积越大),降雨强度越大,退水过程越长,这个阶段产生的降雨入渗损失越大;第三阶段的入渗损失产生于注蓄雨水的退水过程,入渗量即为注蓄量。对于第一阶段,两种方法均采用霍顿入渗公式计算入渗量,故该部分计算结果差异很小;对于第三阶段,两种方法均已考虑注蓄损失,且数值相等;对于第二阶段,提出的推求方法并没有考虑到。分析 100 年一遇设计降雨条件下 SWMM 的计算结果,不透水面积占比由 10% 增加至 90%,退水历时由 1 h 缩减至 20 min,这个过程产生的入渗损失由 13.7 mm 缩减至 4.3 mm,这正是当不透水面积小于 40% 时,两种方法计算的体积径流系数一致性不高的原因。实际上,城市区域不透水面积占比一般为 40%~90%,利用本文提出的方法推求体积径流系数具有较高的实用性。

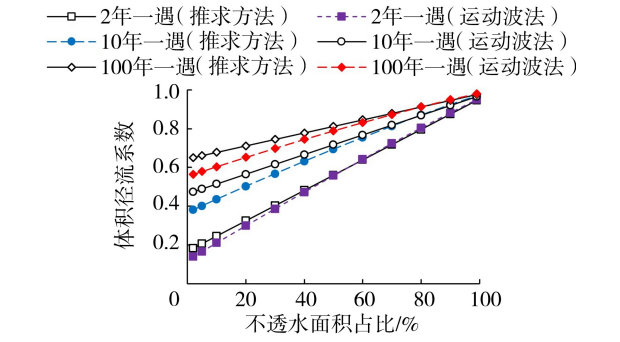


图 5 北京体积径流系数一致性检验结果

Fig. 5 Consistency test result for volume-based runoff coefficient in Beijing

3.3 峰值流量一致性检验

选取 6 种方案进行峰值流量的一致性检验,2 年一遇设计降雨、不透水面积占比分别为 70% 和 90%,10 年一遇设计降雨、不透水面积占比分别为 50% 和 80%,100 年一遇设计降雨、不透水面积占比分别为 40% 和 60%。同时,集水区面积分别取 0.4、2、4、12、20、28、36、44、52、61、81、121、200 hm²,可得到 78 组数据。基于这些数据,利用本文提出的方法推求体积径流系数,代入推理公式计算峰值流量。具体的推理公式见式(19),计算得到集水时间为 30~60 min。

$$Q_p = \varphi_c IA = \frac{\varphi_c A [1602(1 + 1.037lgT)]}{(t + 11.593)^{0.681}} \quad (19)$$

SWMM 采用的设计雨型和水文参数与前文一致,地表漫流和集中流路径为正方形对角线。将推理公式法与 SWMM 计算结果进行对比,如图 6 所示。由图 6 可见,78 组数据的平均偏差约为 12%,一致性较好。当集水区面积较大、峰值流量较大时,SWMM 计算的峰值流量大于推理公式法,数值点偏

离对角线较多。究其原因,推理公式法假设降雨和降雨损失时空分布均匀,集水区全部汇流时产生峰值流量,集水区面积越大,集水时间越长,平均设计降雨强度越小,且降雨强度较小的效应会超过集水区面积增大的效应,导致推理公式法低估峰值流量。因此,推理公式法适用于小流域径流计算,可通过实际降雨观测数据,确定适用的集水区面积阈值,进一步提高推理公式法准确性。Guo 等^[30-31]对美国丹佛的研究表明,集水区面积小于 150 英亩(约 60 hm²)时,推理公式法与单位线法计算峰值流量的偏差可控制在 10% 以内。

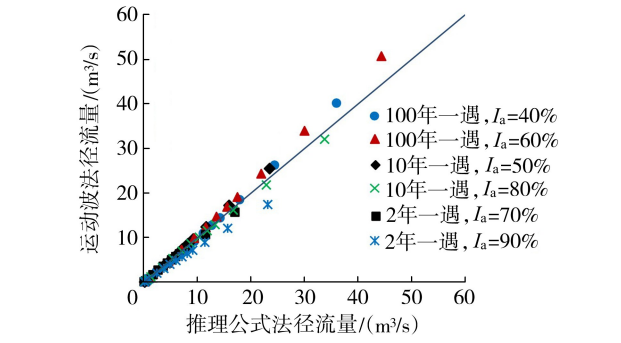


图 6 北京峰值流量一致性检验结果

Fig. 6 Consistency test result for peak flow in Beijing

4 结 论

- 基于城市小流域水文基础理论,分析了推理公式法与 SWMM 运动波法计算地表径流量的区别与联系,对流量径流系数、雨量径流系数、体积径流系数的概念进行介绍,提出了涉及土壤类型、设计降雨强度及不透水面积比的体积径流系数推求方法。
- 将提出的体积径流系数推求方法应用于北京市,利用 SWMM 进行一致性检验。结果表明,对于 2 年一遇设计降雨,提出的推求方法和 SWMM 计算得到的体积径流系数具有很高的 consistency;对于其他较高重现期设计降雨,不透水面积占比大于或等于 40% 时,两种方法得到的体积径流系数具有较高的一致性。
- 进一步将推求得到的体积径流系数代入推理公式计算峰值流量,与 SWMM 的计算结果进行对比,发现集水区面积不超过 200 hm² 时,两种方法的平均偏差约为 12%,一致性较高。

参考文献:

[1] 唐宁远,车伍,潘国庆. 城市雨洪控制利用的雨水径流系数分析[J]. 中国给水排水, 2009, 25(22): 4-8. (TANG Ningyuan, CHE Wu, PAN Guoqing. Runoff coefficient analysis for urban stormwater and flood control and utilization[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25

- (22);4-8. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50014—2021 室外排水设计标准[S]. 北京:中国计划出版社,2021.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50400—2016 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [4] GUO J C Y, WANG Wenliang, LI Junqi. Urban drainage and storage practices[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [5] Urban Drainage and Flood Control District. Urban storm drainage criteria manual volume 3, best management practice[R]. Denver: Urban Drainage and Flood Control District, 2010.
- [6] United States Department of Agriculture. Urban hydrology for small watersheds [R]. Washington: United States Department of Agriculture, 1986.
- [7] BROWN S A, SCHALL J D, MORRIS J L, et al. Urban drainage design manual [M]. 3rd ed. Fort Collins: Ayres Associates, 2009.
- [8] Mississippi Department of Environment Quality. Handbook for erosion control, sediment control and stormwater management on construction sites and urban areas volume 3 [R]. Jackson: Mississippi Department of Environment Quality, 2011.
- [9] RESPEC. Boulder Country storm drainage criteria manual [R]. Bulder: Boulder Country Transportation, 2016.
- [10] Minnesota Pollution Control Agency. Minnesota stormwater manual[EB/OL]. [2025-3-13]. https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Stormwater_runoff_coefficients/curve_numbers_for_different_land_uses.htm.
- [11] Maine Department of Environmental Protection. Maine stormwater management design manual [R]. Augusta: Maine Department of Environment Protection, 2016.
- [12] Oregon Department of Transportation. Hydraulics design manual[R]. Salem: Oregon Department of Transportation, 2014.
- [13] Wisconsin Department of Transportation. Facilities development manual[R]. Madison: Wisconsin Department of Transportation, 1997.
- [14] Department of Environment Protection. Country-wide act 167 stormwater management model ordinance [S]. Harrisburg: Department of Environment Protection, 2012.
- [15] Texas Department of Transportation. Hydraulic design manual [R]. Gatesville: Texas Department of Transportation, 2019.
- [16] North Carolina Environment Quality. NCDEQ stormwater design manual [R]. Raleigh: North Carolina Environment Quality, 2017.
- [17] Michigan Department of Transportation. Tetra Tech MPS. Drainage manual [R]. Lansing: Michigan Department of Transportation, 2006.
- [18] Virginia Department of Transportation. Drainage manual [R]. Richmond: Virginia Department of Transportation, 2002.
- [19] King Country Department of Natural Resources and Parks. Surface water design manual [R]. Taumarunui: King Country Department of Natural Resources and Parks, 2024.
- [20] BUTLER D, DAVIES J W. Urban drainage [M]. 2nd ed. London: Spon Press, 2004.
- [21] DWA. Planning, construction and operation of facilities for the percolation of precipitation water; DWA-A 138E [S]. Hennef: DWA German Association for Water, Wastewater and Waste, 2005.
- [22] 申笑萱, 张珂, 张兆安, 等. 水文多模型拆分组配与协同优化研究进展[J]. 水资源保护, 2025, 41 (4) : 189-196. (SHEN Xiaoxuan, ZHANG Ke, ZHANG Zhaoan, et al. Research progress on hydrological multi-model decomposition allocation and collaborative optimization [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4) : 189-196. (in Chinese))
- [23] 吴洪石, 石朋, 瞿思敏, 等. 水文相似性研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6) : 77-86. (WU Hongshi, SHI Peng, QU Simin, et al. Research progress on hydrologic similarity [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6) : 77-86. (in Chinese))
- [24] ROSSMAN L A. Storm water management model user ' s manual; version 5. 0 [R]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2010.
- [25] GUO J C Y, CHENG J C Y, WRIGHT L. Field test on conversion of natural watershed into kinematic wave rectangular plane [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17 (8) : 944-951.
- [26] GUO J C, URBONAS B. Conversion of natural watershed to kinematic wave cascading plane [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14 (8) : 839-846.
- [27] GUO J C Y, URBONAS B. Volume-based runoff coefficients for urban catchments [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 140 (2) : 04013013.
- [28] GUO J C Y. Urban flood mitigation and stormwater management [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [29] 北京市质量技术监督局, 北京市规划和国土资源管理委员会. 城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准: DB11/T 969—2016 [S]. 北京: 北京质量技术监督局, 2016.
- [30] GUO J C Y. Rational hydrograph method for small urban watersheds [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2001, 6 (4) : 352-356.
- [31] GUO J C Y, ASCE K M M. Modeling consistency for small and large watershed studies [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19 (8) : 04014009.

(收稿日期: 2025 - 03 - 14 编辑: 王芳)