

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.08.002

推理公式法与运动波法暴雨径流计算一致性探讨

王文亮¹, 田晓霞¹, 郭纯园², 李俊奇¹, 阮佳悦¹, 王兆钦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, 美国)

摘要: 推理公式法与暴雨洪水管理模型(SWMM)运动波法是国内外广泛采用的径流计算方法,对于城市小流域暴雨径流,如何确保两种方法计算结果的一致性,是亟待解决的问题。本研究首先给出基于暴雨强度公式的设计暴雨雨型推求方法,明确集水时间、径流系数、等效矩形集水区宽度和坡度的计算方式,进而提出采用推理公式计算径流过程线的方法。实测数据与特定形状集水区的计算验证结果表明,推理公式法和运动波法在径流过程线计算上具有较好的一致性,峰值流量的计算偏差小于10%。进一步分析表明,降雨条件、集水时间、降雨损失的一致性保障计算一致性的必要条件,而较小的集水区面积则是实现一致性的充分条件。

关键词: 推理公式法; 运动波法; 暴雨径流计算; 峰值流量; 径流过程线

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)08-0008-08

Consistency of Rational Method and Kinematic Wave Method for Storm Hydrograph Calculation

WANG Wenliang¹, TIAN Xiaoxia¹, GUO Chwenyuan², LI Junqi¹, RUAN Jiayue¹,
WANG Zhaoqin¹

(1. *Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China*; 2. *University of Colorado, The United States of America*)

Abstract: The rational method and the kinematic wave method (as implemented in SWMM) are widely used for runoff calculations worldwide. For stormwater runoff in small urban catchments, ensuring consistency between two methods remains a key challenge. This study first presents a method for deriving design storm hyetographs based on the rainfall intensity formula, and defines consistent approaches for estimating time of concentration, runoff coefficient, equivalent rectangular catchment width, and slope. A method for calculating runoff hydrographs using the rational method is then proposed. Validation using field data and the catchment of idealized shape shows good agreement between the rational method and the kinematic wave method, with peak flow deviations below 10%. Further analysis indicates that consistency in design rainfall, time of concentration, and rainfall loss is a necessary condition for ensuring computational consistency, while a small catchment area serves as a sufficient condition.

Keywords: rational method; kinematic wave method; storm hydrograph calculation; peak

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)

通信作者: 王文亮 E-mail: wangwenliang@bucea.edu.cn

flow; runoff hydrograph

推理公式法是计算小流域降雨径流峰值流量的通用方法,运动波法则是暴雨洪水管理模型(SWMM)采用的地表漫流计算方法。随着SWMM的广泛使用,如何提高二者径流计算结果的一致性,已成为亟待解决的关键问题。否则,排水防涝工程设施的规模设计将缺乏统一标准,不利于排水行业的标准化建设。

推理公式法最初主要用于峰值流量计算,目前已有研究进一步将其拓展至径流过程线的推求,并进行了实测验证和模型互检^[1]。此外,推理公式法适用于小流域径流计算,而《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)明确提出“小流域”的标准为面积 $\leq 2 \text{ km}^2$,超过该范围应采用模型进行计算。这表明在小流域尺度上,推理公式法与模型法具有同等的适用性。然而,作为两种原理完全不同的水文水力计算方法,如何确定关键水文参数的取值以提升计算结果的一致性,以及“小流域”的面积上限应控制在何种范围内才能使计算偏差处于可接受水平,均为急需回答的问题^[2-3]。

为此,本研究从水文水力基础理论出发,提出推理公式法与运动波法中关键水文参数的确定方法,并结合实测数据和特定形状集水区实例分析,对两种方法计算结果的一致性进行评估,可为我国建立标准化的水文计算方法提供参考。

1 基于暴雨强度公式的设计暴雨雨型

暴雨强度公式的一般形式为:

$$i = \frac{a}{(t+b)^n} \quad (1)$$

式中: i 为暴雨强度,mm/min; t 为历时,min; a 、 b 、 n 为地方参数。

任意历时 t 内的降雨量 p_t 为:

$$p_t = \frac{at}{(t+b)^n} \quad (2)$$

瞬时雨强 I_t 即为式(2)对时间 t 求导:

$$I_t = \frac{dp_t}{dt} = \frac{a[t(1-n)+b]}{(t+b)^{1+n}} \quad (3)$$

瞬时雨强过程线如图1所示。其中,雨峰系数为 r ,雨峰对应时刻为 t_p ,降雨总历时为 T_d ,总降雨量为 P , Δt 为时间步长。

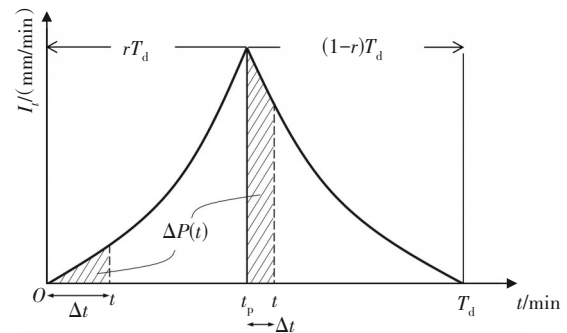


图1 瞬时雨强过程线

Fig.1 Instantaneous rainfall intensity hydrograph

将式(3)中的 t 分别用 $\frac{t_p-t}{r}$ 和 $\frac{t-t_p}{1-r}$ 代替,即可得到瞬时雨强形式的芝加哥雨型,具体为:

$$I_t = \begin{cases} \frac{a \left[\frac{t_p-t}{r} (1-n) + b \right]}{\left(\frac{t_p-t}{r} + b \right)^{1+n}} & 0 < t < t_p \\ \frac{a \left[\frac{t-t_p}{1-r} (1-n) + b \right]}{\left(\frac{t-t_p}{1-r} + b \right)^{1+n}} & t_p < t < T_d \end{cases} \quad (4)$$

以雨峰前的时段($0 < t < t_p$)为例,峰前某时段 Δt 的累计雨量为 $\Delta P(t)$,其计算公式为:

$$\Delta P(t) = rP - \int_t^{t_p} I_t dt \quad (5)$$

峰后某时段的累计雨量亦可推出,汇总可得到:

$$\Delta P(t) = \begin{cases} rP - \frac{a(t_p-t)}{\left(\frac{t_p-t}{r} + b \right)^n} & 0 < t < t_p \\ \frac{a(t-t_p)}{\left(\frac{t-t_p}{1-r} + b \right)^n} & t_p < t < T_d \end{cases} \quad (6)$$

采用式(6)可得到时段雨量形式的芝加哥雨型。

根据《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB11/T 969—2016)中的暴雨强度公式,可采用交替区块法进行雨型设计。首先基于暴雨强度公式推求“雨强-历时-频率($I-D-F$)”曲线,从而获得

不同历时(如 $T, 2T, 3T, \dots$)内的最大平均降雨强度($a, b, c, \dots$)。将各历时对应的平均降雨强度乘以相应历时,即可得到该历时内的最大平均降雨量($a \cdot T, b \cdot 2T, c \cdot 3T, \dots$)。随后,将后一历时的降雨量依次减去前一历时的降雨量,即可得到以 T 为时段

长度、降雨量依次递减的时段降雨序列。最后,将该序列中的最大时段降雨量置于雨峰位置,其他时段降雨量按前后交替方式排列,即可完成设计雨型的构建。

交替区块法雨型设计流程如图2所示。

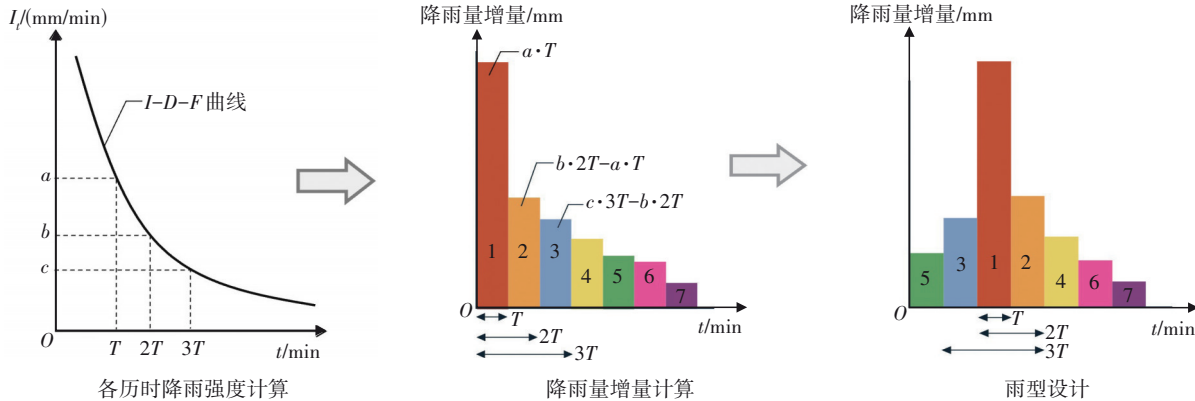


图2 交替区块法雨型设计流程

Fig.2 Flow chart of alternating block method for rainfall hydrograph design

2 推理公式法计算径流过程线

2.1 关键水文参数

径流峰值流量推理公式中的关键参数为径流系数 φ 和设计降雨历时 t (即集水时间 T_c),具体为:

$$Q_p = 0.167\varphi iA = 0.167\varphi A \frac{a}{(t+b)^n} \quad (7)$$

式中: Q_p 为径流峰值流量, m^3/s ; A 为汇水面积, hm^2 。

相关研究^[4-5]表明,在径流系数选取上可采用体积径流系数。基于推理公式法“设计降雨与径流损失时空分布均匀”的基本假设,体积径流系数在数值上等于流量径流系数。其推求方法为:

$$\varphi = (1 - D_{vi}/P)I_a + (1 - D_{vp}/P - F/P)(1 - I_a) \quad (8)$$

式中: P 为不同重现期2 h 历时设计降雨量, mm ; D_{vi} 、 D_{vp} 分别为不透水面和透水面的注蓄量, mm ; I_a 为不透水面积比,取0~1; F 为土壤2 h 入渗量,采用霍顿入渗模型计算, mm 。

集水时间 T_c 指径流从集水区上游最远点流至出水口所需时间,即集水区出水口产生峰值流量所对应的汇流时间。其计算公式可分为理论公式和经验公式,采用以下经验公式进行计算^[6]:

$$L = L_0 + L_c \quad (9)$$

$$T_c = T_0 + \frac{L_c}{60V_c} \quad (10)$$

$$T_0 = 18 - 15I_a \quad (11)$$

$$V_c = K_c \sqrt{S_a} \quad (12)$$

$$K_c = 0.305(24I_a + 12) \quad (13)$$

式中: L 为径流路径总长度, m ; L_0 为地表漫流长度,城市区域一般 $<91.4 m$; L_c 为地表集中流长度, m ; T_c 为集水时间, min ; T_0 为地表漫流时间,取3~18 min ; V_c 为地表集中流流速, m/s ; K_c 为输送系数,取3.66~10.98 m/s ; S_a 为地表集中流坡度。

2.2 径流过程线计算方法

推理公式法计算峰值流量的基本原理为:将集水时间作为设计降雨历时代入暴雨强度公式,求得该历时内的最大平均降雨强度。在该方法的基本假设下,降雨强度时空分布均匀,将所得雨强代入推理公式,即可计算得到全流域汇流条件下的峰值流量。

对于时间分布不均匀的设计降雨,可采用以下方法计算径流过程线:以集水时间为步长,在时间轴上滑动,计算移动平均降雨强度,将其依次作为不同时刻的设计降雨强度代入推理公式,从而获得对应时刻的设计流量,最终得到径流过程线。研究^[1]表明,该方法与SWMM等不同模型的计算结果具有较好的一致性。具体计算公式如下:

$$Q(T) = \begin{cases} CA \frac{1}{T_c} \sum_{t=0}^T \Delta P(t) & 0 \leq T \leq T_c \\ CA \frac{1}{T_c} \sum_{t=T}^{T-T_c} \Delta P(t) & T_c < T \leq T_d \\ \left(1 - \frac{T-T_d}{T_c}\right) Q(T_d) & T > T_d \end{cases} \quad (14)$$

式中: $Q(T)$ 为 T 时刻的径流量, m^3/s ; C 为径流系数; T 为时间, min 。

采用推理公式法计算径流过程线示意如图3所示。

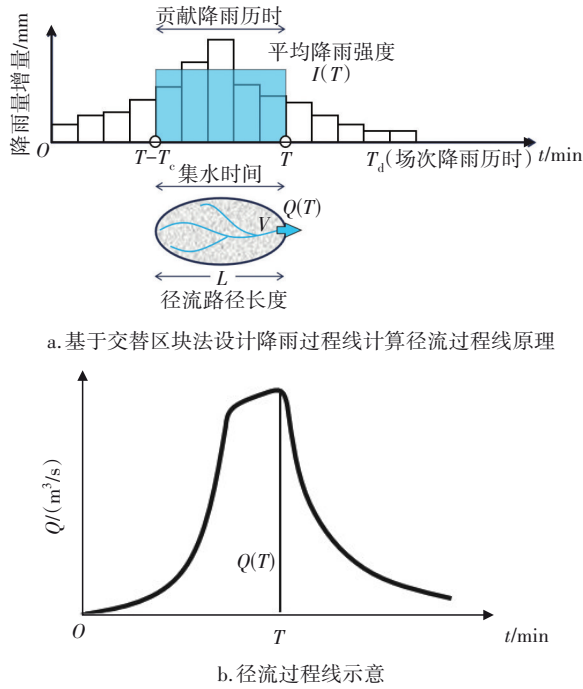


图3 采用推理公式法计算径流过程线示意

Fig.3 Schematic of runoff hydrograph calculation using rational method

3 运动波法计算径流过程线

3.1 关键水文参数

SWMM模型采用运动波法计算地表漫流流量,需将自然形状的实际集水区转换为等效的矩形集水区^[7],可采用以下公式进行转换^[8-9]:

$$L_w/L = (1.5 - Z) \left[\frac{2}{1 - 2K} \left(\frac{A}{L^2} \right)^2 - \frac{4K}{1 - 2K} \frac{A}{L^2} \right] \quad (15)$$

$$Z = A_m/A = \max(A_1, A_2)/A \quad (16)$$

$$S_o/S_w = A/(LL_w) + L_w/L \quad (17)$$

$$X_w = A/L_w \quad (18)$$

式中: L_w 为矩形集水区宽度, m ; Z 为面积偏态系数; A_1 、 A_2 分别为水路分割形成的两个子集水区的面积, hm^2 ; A_m 为水路两侧面积中的较大值, hm^2 ; K 为实际集水区形状因子 A/L^2 的上限值, 推荐取4; S_o 、 S_w 分别为实际集水区和矩形集水区坡度; X_w 为矩形集水区长度, m 。

实际集水区转换为矩形集水区示意如图4所示。图4(b)中前两个示意图为不透水面与透水面互流的串联结构, 第3个则为二者的并联结构。其中, 矩形集水区宽度 L_w 表示垂直于径流方向的有效汇水宽度; 矩形集水区长度 X_w 表示沿径流方向上的汇水距离^[7]; $X_w I_a$ 表示沿径流方向上不透水面所对应的等效长度, $X_w(1 - I_a)$ 则表示透水面所对应的等效长度。

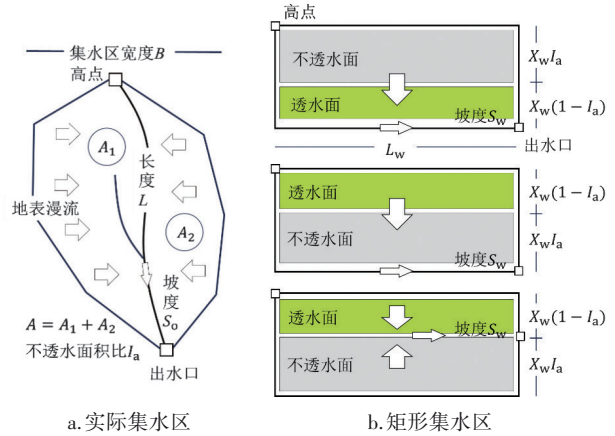


图4 实际集水区转换为矩形集水区示意

Fig.4 Schematic of converting the actual catchment into a rectangular catchment

通过上述计算得到的矩形集水区宽度 L_w 与坡度 S_w , 是SWMM模型中表征集水区属性的关键参数。由于二者对集水区径流流量的计算结果具有显著影响, 因此属于模型中的敏感参数。

3.2 径流过程线计算方法

SWMM将每个集水区概化为1个水库。在各时间步长内, 集水区径流深度的变化反映了水库调蓄容积的变化。根据质量守恒原理, 集水区调蓄量的变化值等于净流入水量(降雨量与入渗量、径流量的差值)。采用有限差分形式表达, 具体为:

$$\frac{\Delta V_{ol}}{\Delta t} = \frac{\Delta d X_w L_w}{\Delta t} = (i - f - q') X_w L_w \quad (19)$$

式中: ΔV_{ol} 为径流量变化量, mm^3 ; Δd 为径流水深变化量, mm ; f 为土壤入渗速率, mm/s ; q' 为单位面

积地表漫流流量, mm/s。

式(19)等号两边同时除以 L_w , 可得下式:

$$\frac{\Delta d X_w}{\Delta t} = (i - f) X_w - q' X_w = (i - f) X_w - q \quad (20)$$

式中: q 为单位宽度地表漫流流量(单宽流量), mm^2/s 。

在较小的时间步长内, 地表漫流可视为宽而浅的均匀流, 采用曼宁公式计算 q , 具体见下式:

$$q = \frac{1.49}{N} S_w^{1/2} (d - D)^{5/3} = \alpha (d - D)^{5/3} \quad (21)$$

式中: N 为表面粗糙系数; d 为积水深度, mm; D 为洼蓄水深, mm; α 为曼宁公式综合系数, $\text{mm}^{1/3}/\text{s}$ 。

联立式(20)和式(21), 可得下式:

$$\Delta d X_w = (i - f) X_w \Delta t - \alpha (d - D)^{5/3} \Delta t \quad (22)$$

求解式(22)即可得到不透水面($f = 0$)和透水面上的单宽流量。

采用SWMM计算集水区总流量时, 根据不透水面与透水面之间是否存在径流交叉互流, 可分为并联和串联两种计算模式[见图4(b)]。并联模式下, 不透水面和透水面的径流分别独立汇入排水口, 集水区总流量 Q_t 的计算见下式:

$$Q_t = [q_1(t) + q_2(t)] L_w \quad (23)$$

式中: $q_1(t)$ 、 $q_2(t)$ 分别为不透水面、透水面上的单宽流量, mm^2/s 。

串联模式下, 径流可在不透水面与透水面之间相互流动, 例如当径流由不透水面流向透水面时, 需将不透水面的径流量作为透水面的入流量进行计算。当集水区设置低影响开发(LID)设施时, 需先将LID设施所占面积从集水区总面积中扣除, 并将其径流体积净控制量(不含从LID设施底部流出的部分)从集水区总径流体积量中扣除, 再按照上述方法计算集水区总流量。

4 径流计算一致性实例分析

4.1 径流过程线计算一致性

为验证上述方法的可行性, 以北京建筑大学校园内一处面积为 971 m^2 的广场为例。该广场的雨水以地表漫流形式汇入下游植草沟, 最终流入滞涝池。广场的不透水面积比为1, 径流系数取 $0.96^{[5]}$, 平均坡度为 0.86% , 地表漫流最大长度为 42 m ; 植草沟坡度为 0.69% , 长度为 25 m 。广场上游最远点至植草沟出水口的平均坡度按长度加权平均计算

为 0.8% 。在广场安装气象站以自动监测降雨量, 同时在植草沟出水口末端安装三角堰, 通过自动水位计监测堰上水头, 进而计算过堰流量。

根据式(9)~(13)计算集水时间, 可得 $T_c = 4.5 \text{ min}$ 。根据式(15)~(18)将广场集水区转为矩形集水区, 集水区宽度 $L_w = 16.1 \text{ m}$, 坡度 $S_w = 0.702\%$, 并输入SWMM模型进行建模。以2025年7月28日和2025年8月12日两场降雨为例, 总降雨量分别为 119.6 、 39.2 mm , 最大 1 h 降雨量分别为 34.4 、 26.4 mm , 从最大 1 h 降雨量来看, 两场降雨均接近1年一遇水平。

SWMM模型模拟结果、推理公式法计算结果与实测径流过程线的对比如图5所示。可知, 三者一致性较好。

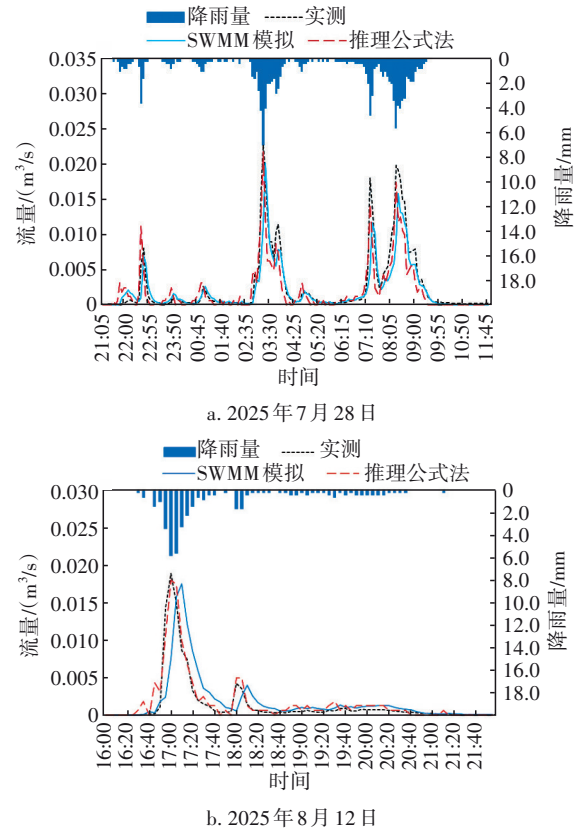


图5 径流过程线一致性比较

Fig.5 Consistency comparison of runoff hydrographs

4.2 径流峰值计算一致性

上述案例仅为个案, 为更全面地比较推理公式法与SWMM运动波法在径流计算上的一致性, 以正方形集水区为例(见图6), 集水区面积取 $0.4 \sim 200.0 \text{ hm}^2$, 设计暴雨重现期分别设定为2年一遇、10年一遇和100年一遇, 不透水面积比组合如下: 2

年一遇取 70% 和 90%, 10 年一遇取 50% 和 80%, 100 年一遇取 40% 和 60%, 从而分析不同条件下两种方法计算峰值流量的差异。

北京暴雨强度 I 的计算见下式:

$$I = 1\,602(1 + 1.037\lg P)/(t + 11.593)^{0.681} \tag{24}$$

式中: P 为设计重现期, a 。

基于式(24), 按交替区块法构建时间历时 2 h、步长 5 min 的设计暴雨, 雨峰位置位于第 25~30 min

(雨峰系数 $r=0.25$)。将该雨型输入 SWMM 模型进行模拟, 模型参数计算如表 1 所示。

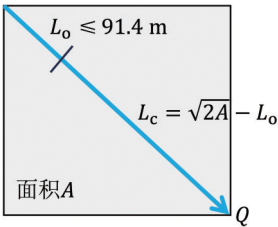


图6 正方形集水区示意

Fig.6 Schematic of square catchment

表 1 SWMM 模型参数

Tab.1 SWMM model parameters

集水区编号	A/hm^2	L/m	$S_a/\%$	$Z=A_m/A$	A/L^2	L_w/L	S_o/S_w	$S_w/\%$	L_w/m	X_w/m
1	0.4	90.0	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	96.4	42.0
2	2.0	201.1	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	215.6	93.9
3	4.1	284.5	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	304.9	132.7
4	12.2	492.7	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	528.1	229.9
5	20.3	636.1	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	681.7	296.8
6	28.4	752.6	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	806.6	351.2
7	36.5	853.4	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	914.6	398.2
8	44.6	943.4	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	1 011.2	440.2
9	52.7	1 025.6	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	1 099.2	478.6
10	60.8	1 101.7	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	1 180.8	514.1
11	81.0	1 272.1	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	1 363.4	593.6
12	121.5	1 558.0	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	1 669.9	727.0
13	202.5	2 011.4	0.6	0.5	0.5	1.07	1.54	0.39	2 155.8	938.6

按式(7)计算峰值流量, 其中集水时间依据式(9)~(13)确定。不同设计暴雨重现期以及不透水面积比对应的径流系数, 通过针对北京地区的研究成果进行取值, 计算结果经验证与 SWMM 模型具有较好的一致性^[7]。

以设计暴雨重现期 100 年一遇、不透水面积比 60% 的工况为例, 推理公式法与 SWMM 运动波法计算径流峰值流量的结果对比如表 2 所示。

汇总 100 年一遇(不透水面积比 60%)、10 年一遇(不透水面积比 50%)、2 年一遇(不透水面积比 70%)三种工况下, 推理公式法与 SWMM 运动波法的计算结果, 具体如图 7 所示。

实测研究结果进一步验证了采用推理公式计算径流过程线的可行性。针对正方形集水区的计算结果表明, 在不同设计暴雨重现期、不透水面积比及集水区面积条件下, 推理公式法和运动波法计算峰值流量的一致性总体较好, 仅少数结果偏差超过 15%, 总体偏差低于 10%。分析原因如下:

① 降雨条件一致。交替区块法雨型基于暴雨强度公式生成, 可确保在相同历时条件下, 雨型中的最大雨量与暴雨强度公式计算得到的雨量保持一致。

② 集水时间一致。计算集水时间所采用的经验公式基于大量实测数据建立, 并引入了与不透水面积比的关系。运动波法则通过构建以糙率、坡度、径流路径长度及雨强为变量的方程求解汇流时间, 其参数设置与经验公式基本吻合。

③ 降雨损失一致。采用体积径流系数计算峰值流量, 建立了以降雨量、不透水面积比、洼蓄量、入渗量与径流系数的关系, 与 SWMM 模型的产流计算方法一致。

此外, 运动波法的径流计算结果受集水区形状影响显著, 将实际集水区合理转化为矩形集水区的方法直接影响计算精度。本研究采用的转换公式基于理论分析得出, 并经过实测验证, 已被 SWMM 模型所采用^[7]。

表2 推理公式法与SWMM运动波法计算峰值流量结果对比

Tab.2 Comparison of peak flow calculations using rational method and SWMM kinematic wave method

集水区 编号	A/hm ²	C	I _a /%	L _d /m	L _c /m	S _a /%	T _c /min	峰值流量/(m ³ /s)		偏差/%
								推理公式法	SWMM	
1	0.4	0.85	0.60	90.0	0	0.60	11.41	0.20	0.24	-18
2	2.0	0.85	0.60	91.4	109.7	0.60	14.38	0.91	1.01	-10
3	4.1	0.85	0.60	91.4	193.0	0.60	16.61	1.72	1.85	-8
4	12.2	0.85	0.60	91.4	401.2	0.60	22.17	4.55	4.76	-4
5	20.3	0.85	0.60	91.4	544.6	0.60	26.01	7.05	7.33	-4
6	28.4	0.85	0.60	91.4	661.1	0.60	29.12	9.35	9.89	-6
7	36.5	0.85	0.60	91.4	761.9	0.60	31.82	11.51	12.34	-7
8	44.6	0.85	0.60	91.4	852.0	0.60	34.23	13.56	14.70	-8
9	52.7	0.85	0.60	91.4	934.2	0.60	36.42	15.52	16.97	-9
10	60.8	0.85	0.60	91.4	1 010.2	0.60	38.46	17.41	19.16	-10
11	81.0	0.85	0.60	91.4	1 180.7	0.60	43.02	21.88	24.39	-11
12	121.5	0.85	0.60	91.4	1 466.6	0.60	50.66	30.01	33.95	-12
13	202.5	0.85	0.60	91.4	1 919.9	0.60	62.78	44.31	50.67	-13

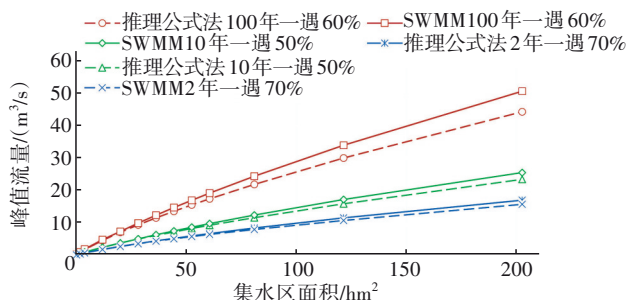


图7 三种工况的径流峰值流量计算结果对比

Fig.7 Comparison of runoff peak flow calculation results under three operating conditions

上述实例分析还发现,随着集水区面积增大,两种方法计算结果的偏差总体呈先减小再增大的趋势。这进一步印证了推理公式法仅适用于小流域径流计算,也验证了当集水区面积 $<2\text{ km}^2$ 时,推理公式法具有较好的适用性。但需特别注意,上述结论尚未经充分的实测数据验证,并不能说明 2 km^2 的适用边界就是合理的。如丹佛地区的研究表明,当流域面积 >150 英亩(约 60 hm^2)时,推理公式法计算结果显著偏小,当地设计规范规定其适用于面积不超过 90 英亩(约 35 hm^2)的集水区^[10]。

事实上,降雨条件、集水时间及降雨损失的一致性仅是两种方法计算结果相近的必要条件,只有当集水区面积较小(即小流域)时,才能实现计算结果的高度一致。推理公式法的核心假设在于降雨和损失时空分布均匀,且全流域汇流时形成峰值流量。当集水区面积较大时,以下因素会导致推理公

式法计算的径流峰值流量偏小:

① 雨型所表征的雨强随时间变化,且暴雨中心在集水区内的位置也是变化的。集水区面积越大,降雨的时空分布差异越显著。即使SWMM模型未考虑暴雨中心位置的影响,推理公式法所采用的平均雨强也容易低估某时段峰值雨强所产生的峰值流量。

② 集水面积越大,地形与地貌越复杂,集水区调蓄效应及汇流路径对产汇流的影响也越大。这会导致集水时间更长,而基于全流域汇流产生峰值流量的假设,采用较长的集水时间计算得到的平均雨强将显著减小,且雨强减小的效应会远远超过集水区面积增大的影响。实际上,对于面积较大的集水区,出水口处的峰值流量往往仅由部分区域贡献形成。

5 结论与建议

① 推理公式法可用于计算峰值流量和径流过程线,其与SWMM运动波法径流计算结果的一致性主要取决于降雨条件、集水时间和径流系数(降雨损失)3个水文要素。

a. 降雨条件:运动波法采用的设计降雨应基于暴雨强度公式,可采用芝加哥雨型或交替区块法进行雨型设计。b. 集水时间:集水时间包括地表漫流和集中流流行时间。地表漫流和集中流的路径长度,应与运动波法进行矩形集水区转换时采用的长度一致。在SWMM建模过程中,集水区宽度和坡度

参数的赋值应取矩形集水区的相应值。c. 径流系数:径流系数应根据设计暴雨重现期及不透水面积比计算确定,洼蓄量取值和入渗量计算应与SWMM模型一致。

② 对于广场等小型集水区,推理公式法、运动波法计算的径流过程线与实测曲线具有较好的一致性。针对特定形状、地形及土壤入渗特性的集水区,综合考虑集水区面积、不透水面积比及设计暴雨强度等因素进行计算分析,结果表明:当集水区面积 $<2\text{ km}^2$ 时,随着集水区面积增大,峰值流量偏差呈先减小后增大的趋势,但总体偏差低于10%,一致性较好。尽管如此,仍需结合区域降雨特征和实测数据进行进一步校核,以验证其适用性。

③ 为提高推理公式法和运动波法在径流计算中的一致性,可采用本研究提出的方法确定降雨条件、集水时间、径流系数、集水区宽度及坡度等关键水文参数。建议进一步通过实测数据进行校核,并与适用于大流域的径流计算方法(如单位线法)进行互检。

参考文献:

- [1] GUO J C Y. Rational hydrograph method for small urban watersheds [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2001, 6(4): 352-356.
- [2] GUO J C Y, MACKENZIE K. Modeling consistency for small and large watershed studies [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(8): 04014009.
- [3] 肖君健. 不同条件下两种方法计算雨水设计流量的比较[J]. 城市道桥与防洪, 2018(9): 158-161.
- XIAO J J. Comparison of mathematical model and reasoning formula under different design conditions [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(9): 158-161 (in Chinese).
- [4] GUO J C Y, URBONAS B. Volume-based runoff coefficients for urban catchments [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 140(2): 04013013.
- [5] 王文亮,苏成庆,尹佳伟,等. 城市小流域暴雨的体积径流系数推求与应用[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 28-33.
- WANG W L, SU C Q, YIN J W, et al. Derivation and application of volume-based runoff coefficient for urban small catchment stormwater [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 28-33 (in Chinese).
- [6] GUO J C Y, WANG W L, LI J Q. Urban Drainage and Storage Practices [M]. Florida: CRC Press, 2023: 74-76.
- [7] ROSSMAN L A. Stormwater Management Model User's Manual [M/OL]. (2022-02-01) [2025-09-20]. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
- [8] GUO J C Y, CHENG J, WRIGHT L. Field test on conversion of natural watershed into kinematic wave rectangular plane [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(8): 944-951.
- [9] GUO J C Y, URBONAS B. Conversion of natural watershed to kinematic wave cascading plane [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(8): 839-846.
- [10] GUO J C Y. Urban Flood Mitigation and Stormwater Management [M]. Florida: CRC Press, 2017: 129-130.

作者简介:王文亮(1984—),男,山东临沂人,工学博士,副教授,北京建筑大学海绵城市研究院副院长,主要研究方向为城市水文、内涝治理与合流制溢流控制。

E-mail:wangwenliang@bucea.edu.cn

收稿日期:2025-10-09

修回日期:2026-02-24

(编辑:沈靖怡)