

# 基于暴雨雨型的设计径流量研究及应用

杜 遂<sup>1</sup>, 彭 涛<sup>2</sup>

(1. 武汉市规划研究院, 湖北 武汉 430014; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警  
湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205)

**摘 要:** 为简化排水模型在城市排水防涝规划中的应用, 利用武汉短历时暴雨雨型, 采用三角概化法推导出雨型径流量计算公式。通过武汉雨型径流量设计程序在 9 个排水区的应用, 在相同重现期标准下与武汉暴雨强度公式进行对比, 同频率雨型设计径流量的平均绝对值相对误差为 1.29%, 最大误差 < 5%。采用相关因子拟合公式计算排水区节点雨水汇流时间, 可建立雨型径流量节点管控简化模型, 无需排水管网建模, 可实现城市排水防涝规划水位管控, 也可进行雨水溢流污染控制调节池容量的计算。

**关键词:** 暴雨雨型; 三角概化法; 产流量; 滞留量; 雨型设计径流量; 节点管控简化模型

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2020)05-0109-07

## Study on Design Runoff Volume Based on Rainstorm Pattern and Its Application

DU Sui<sup>1</sup>, PENG Tao<sup>2</sup>

(1. Wuhan Planning & Design Institute, Wuhan 430014, China; 2. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** In order to simplify the application of drainage models in urban drainage and waterlogging prevention planning, the rainstorm pattern runoff calculating formula was deduced by the triangle generalization method based on short-duration rainstorm pattern in Wuhan City. Through the application of Wuhan rainstorm pattern runoff design program in nine drainage areas, the relative error of the average absolute value of rainstorm pattern design runoff was 1.29% and the maximum error was less than 5%, compared with Wuhan rainstorm intensity formula under the same return period standard. The simplified model of node control of rainstorm pattern runoff could be established by calculating the rainwater confluence time in drainage area with the correlation factor fitting formula. Without the need of drainage network modeling, water level control of urban drainage and waterlogging prevention planning could be realized, and the capacity of the combined sewer overflow (CSO) pollution control regulating tank could be calculated.

**Key words:** rainstorm pattern; triangle generalization method; runoff volume; retention volume; rainstorm pattern design runoff; simplified model of node control

近 10 年来国内许多城市按照《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)要求, 应用 SWMM、InfoWorks CS 和 MIKE 等多种排水模型进行城市排

水系统设计与管理。排水模型通过水力和水质等数学模块设计、GIS 应用、设计编程形成了科学化的排水设计与管理系统, 在雨水流量设计、洪灾空间管

控、排水管网优化控制、污染负荷计算等方面应用广泛。在城市排水防涝规划设计方面,通过排水管网建模和确定设计暴雨强度雨型,即可利用模型进行评估和设计。应用排水模型进行防涝设计的重要职能是把控防涝水位变化过程,实现城市竖向安全控制。但模型在城市雨水防涝规划设计应用中存在排水管网建模工作量大的问题,特别是大汇流区域管线复杂,还存在雨污管网混流问题。为了克服城市大区域排水管网建模的障碍,笔者重点研究了如何由暴雨雨型和排水区雨水汇流时间推导沿程降雨径流量,以期简化模型为城市排水防涝和雨水溢流污染控制工程规划设计服务。

## 1 研究方法

### 1.1 武汉暴雨雨型简介

建立城市暴雨雨型是掌握降雨汇流流量、水位

全过程变化和模型应用的基础条件。本研究所用雨型为武汉市3 h短历时暴雨雨型。该雨型的降雨数据来源于武汉气象台汉口吴家山降雨站2000年—2018年历年最大24 h降雨量沿程5 min降雨样本,并依据武汉市暴雨强度公式[2000年修订的暴雨强度公式如式(1)所示]在不同降雨时段各重现期 $P$ 下的降雨量(如表1所示),分别采用同频率雨型<sup>[1]</sup>和雨峰等值 $P \& C$ 雨型<sup>[2]</sup>(在降雨量无级序平均法的基础上,各雨峰与暴雨强度公式等值)确定两种类型的武汉市暴雨雨型,如图1所示(以3年一遇重现期为例)。

$$q = \frac{885(1 + 1.58 \lg P)}{(t + 6.37)^{0.604}} \quad (1)$$

式中: $q$ 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ;  $P$ 为降雨重现期,年; $t$ 为降雨历时,min。

表1 武汉市暴雨强度公式部分重现期的降雨量

Tab. 1 Rainfall of partial return periods in rainstorm intensity formula of Wuhan City

mm

降雨时间/min	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
$P = 3$ 年	10.72	17.21	21.98	25.81	31.88	38.82	44.34	53.09	60.10	66.06	71.29
$P = 10$ 年	15.78	25.32	32.33	37.97	46.90	57.10	65.22	78.10	88.41	97.17	104.88

注: 武汉城市排水规划标准一般采用3年一遇重现期标准。

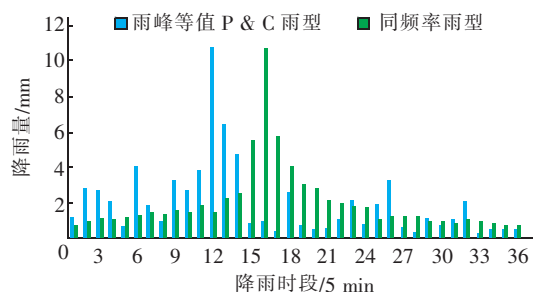


图1 武汉市3 h短历时暴雨雨型对比

Fig. 1 Comparison of 3 h short-duration rainstorm patterns in Wuhan City

### 1.2 雨型设计径流量研究

#### 1.2.1 雨型产流量与径流量的相关性

基本概念:由设计雨型确定的不同降雨时段的降雨量根据综合径流系数可分解为下渗量和径流量(本研究中称为产流量),而产流量又可分解为到达排水出口的径流量和未到达排水出口的滞留量。

根据设计暴雨雨型确定不同降雨时段排水区出口的径流量是本文的研究目标。因汇流时间影响,产流量与径流量存在较大差距,各峰值水量的差距随汇流时间的延长而放大,因而不能直接用降雨时段的产流量代替出口径流量,需通过汇流时间的差

异性计算出口径流量。

#### 1.2.2 三角概化法原理

根据降雨汇流特征,排水区出口径流量的变化是由零(降雨开始瞬间)到最大值(排水区达到全汇流)再到趋于零(降雨强度衰减、降雨结束后)的变化过程,其中在排水区全汇流时间之前的径流量曲线围合面积即径流量可用三角形近似表达(见图2)。因而设计雨型各降雨时段的产流量可依据排水区汇流时间,参照水文水利工程相关计算原理由三角概化法求解出口径流量<sup>[3]</sup>。

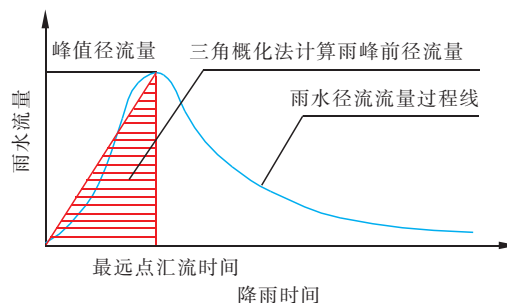


图2 雨峰前三角概化径流量

Fig. 2 Runoff volume in triangle generalization before rainfall peak

### 1.2.3 三角概化法图形分析与径流量求解

图形分析:以排水区最远点汇流时间发生在雨型第 3 个降雨时段为例,三角概化法求解径流量的过程如图 3 所示。各降雨时段的产流量用相应降雨强度所围合的面积来表达。为便于计算,按照各降雨时段的单位时间产流量进行差值分层,形成蓝、红、绿分层产流量,各降雨时段分层产流量面积之和为本段产流量。各分层产流量可以形成等汇流时间分层径流量变化过程(由三角形到矩形),进而形成各分层产流量在各降雨时段的分层滞留量。图 3 中完整三角形 ABC 的面积表达了蓝色层产流量的滞留量由起点 AB 段最大值至终点 C 零值的变化过程,由降雨时段所分割的面积为蓝色层各降雨时段的分层滞留量。

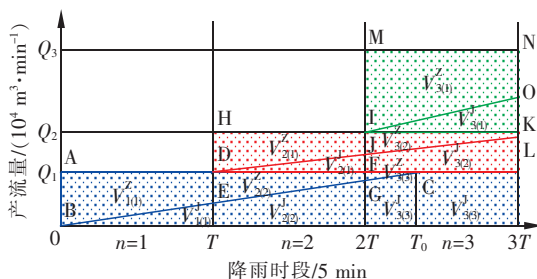


图 3 径流量与滞留量的空间分析

Fig. 3 Spatial analysis of runoff volume and retention volume

图 3 中的符号含义如下: $n$  为 3 h 雨型 5 min 降雨时段序列, $n=1,2,3,\dots,36$ ;  $T$  为雨型单位降雨时段, $T=5$  min;  $T_0$  为排水区最远点雨水汇流到计算节点的时间,min;  $V_{n(i)}^j$  为第  $n$  降雨时段第  $i$  分层产流量的分层径流量, $10^4$  m<sup>3</sup>;  $V_{n(i)}^z$  为第  $n$  降雨时段第  $i$  分层产流量的分层滞留量, $10^4$  m<sup>3</sup>;  $i=1,2,3,\dots,m$  (当  $n < m$  时, $i=n$ ; 当  $n > m$  时, $i=m$ );  $m$  为  $T_0$  汇流时间所在的降雨时段序列(按 5 min 划分), $m=1,2,3,4,\dots$  (如  $T_0=42$  min, 汇流时间介于 40~45 min 区间段内,则  $m=9$ ; 在图 3 中  $m=3$ )。

分层产流量增减影响:图 3 中各分层产流量均按增值表达,如果是减值(如雨峰过后),在推导公式中计算出的滞留量则为负值,导致出口径流量因负值而增加,反映了降雨停止时出口径流量仍在出流的客观现象。

滞留量求解过程:

根据图 3,产流量、径流量和滞留量三者的关系可以表达为:

$$\sum_{i=1}^m V_{n(i)}^j = V_n^C - \sum_{i=1}^m V_{n(i)}^z \quad (2)$$

式中: $\sum_{i=1}^m V_{n(i)}^j$  为第  $n$  降雨时段的累计径流量,是设计雨型径流量的求解值; $\sum_{i=1}^m V_{n(i)}^z$  为第  $n$  降雨时段的累计滞留量,是核心研究内容; $V_n^C$  为第  $n$  降雨时段的产流量,也是图 3 分层产流量之和,计算方法如式(3)所示。

$$V_n^C = \varphi \cdot F \cdot H_n \cdot T = Q_n \cdot T \quad (3)$$

式中: $\varphi$  为雨水汇流综合径流系数; $F$  为排水区汇流面积, hm<sup>2</sup>;  $H_n$  为第  $n$  降雨时段的平均降雨强度, mm/min;  $Q_n$  为第  $n$  降雨时段单位时间的产流量,  $Q_n = \varphi \cdot F \cdot H_n, 10^4$  m<sup>3</sup>/min。

图 3 中各降雨时段分层滞留量围合面积利用三角形相似性原理求解。各降雨时段的累计滞留量表表达式如下:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^1 V_{1(i)}^z &= V_{1(1)}^z = S_{ADEB} = \frac{T}{2} (DE + AB) = \\ &= \frac{T}{2} \left( \frac{T_0 - T}{T_0} Q_1 + Q_1 \right) = \frac{Q_1 \cdot T}{2} \left( \frac{T_0 - T}{T_0} + 1 \right) = \\ &= \frac{V_1^C}{2} \left( \frac{T_0 - T}{T_0} + 1 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^2 V_{2(i)}^z &= V_{2(1)}^z + V_{2(2)}^z = S_{HJUD} + S_{DFGE} = \frac{T}{2} (IJ + \\ &+ HD) + \frac{T}{2} (FG + DE) = \frac{T}{2} \left[ \frac{T_0 - T}{T_0} (Q_2 - \right. \\ &+ Q_1) + (Q_2 - Q_1) \left. \right] + \frac{T}{2} \left( \frac{T_0 - 2T}{T_0} Q_1 + \right. \\ &+ \left. \frac{T_0 - T}{T_0} Q_1 \right) = \frac{V_2^C - V_1^C}{2} \left( \frac{T_0 - T}{T_0} + 1 \right) + \\ &+ \frac{V_1^C (2T_0 - 3T)}{2T_0} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 V_{3(i)}^z &= V_{3(1)}^z + V_{3(2)}^z + V_{3(3)}^z = S_{MNOI} + \\ &+ S_{IKLJ} + S_{FCG} = \frac{T}{2} (NO + MI) + \frac{T}{2} (KL + IJ) + \\ &+ \frac{T_0 - 2T}{2} FG = \frac{T}{2} \left[ \frac{T_0 - T}{T_0} (Q_3 - Q_2) + \right. \\ &+ (Q_3 - Q_2) \left. \right] + \frac{T}{2} \left[ \frac{T_0 - 2T}{T_0} (Q_2 - Q_1) + \right. \\ &+ \left. \frac{T_0 - T}{T_0} (Q_2 - Q_1) \right] + \frac{T_0 - 2T}{2} \cdot \frac{T_0 - 2T}{T_0} \cdot \\ &+ \frac{Q_1 \cdot T}{T} = \frac{V_3^C - V_2^C}{2} \left( \frac{T_0 - T}{T_0} + 1 \right) + \\ &+ \frac{(V_2^C - V_1^C) (2T_0 - 3T)}{2T_0} + \frac{V_1^C (T_0 - 2T)^2}{2T \cdot T_0} \end{aligned} \quad (6)$$

### 1.2.4 滞留量公式归纳

根据以上滞留量的求解过程,分别表达  $m$  为不同值时各降雨时段的累计滞留量,从而用归纳法确定  $\sum_{i=1}^m V_{n(i)}^Z$  的通用表达式。 $m$  值逐步递增时,各降雨时段累计滞留量表达式呈数列特征,因而不同降雨时段累计滞留量的通用表达式如下:

当  $m=1$  时:

$$\sum_{i=1}^m V_{n(i)}^Z = (V_n^C - V_{n-1}^C) \frac{T_0}{2T} \quad (7)$$

当  $m>1$  时:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m V_{n(i)}^Z &= \frac{V_n^C - V_{n-1}^C}{2} \left( \frac{T_0 - T}{T_0} + 1 \right) + \\ &\frac{(V_{n-1}^C - V_{n-2}^C)(2T_0 - 3T)}{2T_0} + \\ &\frac{(V_{n-2}^C - V_{n-3}^C)(2T_0 - 5T)}{2T_0} + \cdots + \\ &\frac{(V_{n-m+2}^C - V_{n-m+1}^C)[2T_0 - (2m-3)T]}{2T_0} + \\ &\frac{(V_{n-m+1}^C - V_{n-m}^C)[T_0 - (m-1)T]^2}{2T \cdot T_0} \end{aligned} \quad (8)$$

上式中,若产流量  $V_{n-k}^C$  的序号  $n-k \leq 0$  ( $k$  代表任意自然数),则  $V_{n-k}^C = 0$ 。

### 1.2.5 武汉市雨型设计径流量实例计算

在完成雨型径流量研究后,利用 EXCEL 表格建立雨型径流量基本设计程序进行实例计算。武汉平湖门地区雨水汇流面积为  $64 \text{ hm}^2$ ,排水口最远点的汇流时间  $T_0 = 10.6 \text{ min}$ ,介于  $m=3$  降雨时段内。采用图 1 中 3 年重现期同频率雨型形成雨型径流量

设计程序(见表 2)。以下以最大径流降雨时段  $n=17$  为例表达各水量计算过程。

由式(3)计算  $V_{17}^C$ 、 $V_{16}^C$ 、 $V_{15}^C$ 、 $V_{14}^C$  产流量,  $V_{17}^C$  计算式如下:

$$\begin{aligned} V_{17}^C &= \varphi \cdot F \cdot H_n \cdot T = 0.7 \times 64 \times 5.746 \div \\ &1\,000 = 0.257\,4 (10^4 \text{ m}^3) \end{aligned} \quad (9)$$

由式(8)计算  $\sum_{i=1}^3 V_{17(i)}^Z$  累计滞留量:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 V_{17(i)}^Z &= \frac{V_{17}^C - V_{16}^C}{2} \left( \frac{T_0 - T}{T_0} + 1 \right) + \\ &\frac{(V_{16}^C - V_{15}^C)(2T_0 - 3T)}{2T_0} + \\ &\frac{(V_{15}^C - V_{14}^C)(T_0 - 2T)^2}{2T \cdot T_0} = \frac{0.257\,4 - 0.480\,3}{2} \times \\ &\left( \frac{10.6 - 5}{10.6} + 1 \right) + \\ &\frac{(0.480\,3 - 0.247\,0)(2 \times 10.6 - 3 \times 5)}{2 \times 10.6} + \\ &\frac{(0.247\,0 - 0.113\,2)(10.6 - 2 \times 5)^2}{2 \times 5 \times 10.6} = \\ &-0.170\,3 + 0.068\,2 + 0.000\,5 = -0.101\,6 \\ &(10^4 \text{ m}^3) \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(2),累计径流量为:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 V_{17(i)}^J &= V_{17}^C - \sum_{i=1}^3 V_{17(i)}^Z = 0.257\,4 - \\ &(-0.101\,6) = 0.359\,0 (10^4 \text{ m}^3) \end{aligned} \quad (11)$$

因此第 17 降雨时段的设计径流量为:

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{i=1}^3 V_{17(i)}^J}{T} &= \frac{0.359\,0 \times 10\,000}{5 \times 60} = 11.966\,7 \\ &(\text{m}^3/\text{s}) \end{aligned} \quad (12)$$

表 2 武汉市平湖门地区雨型设计径流量计算(3 年重现期)

Tab. 2 Calculation of rainstorm pattern design runoff volume in Pinghumen of Wuhan City (3-year return period)

降雨时段/5 min	降雨量( $H_n \cdot T$ )/mm	产流量 $V_n^C$ / $10^4 \text{ m}^3$	滞留量 $V_{n(1)}^Z$ / $10^4 \text{ m}^3$	滞留量 $V_{n(2)}^Z$ / $10^4 \text{ m}^3$	滞留量 $V_{n(3)}^Z$ / $10^4 \text{ m}^3$	径流量 $\sum V_{n(i)}^J$ / $10^4 \text{ m}^3$	产流量 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	径流量 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	0.716	0.032	0.024	0.000	0.000	0.008	1.068	0.252
2	0.935	0.042	0.008	0.009	0.000	0.025	1.396	0.833
3	1.122	0.050	0.006	0.003	0.000	0.041	1.676	1.363
4	1.083	0.049	-0.001	0.002	0.000	0.047	1.617	1.579
5	1.174	0.053	0.003	-0.001	0.000	0.050	1.752	1.665
6	1.259	0.056	0.003	0.001	0.000	0.052	1.881	1.743
7	1.454	0.065	0.007	0.001	0.000	0.057	2.171	1.911
8	1.369	0.061	-0.003	0.003	0.000	0.062	2.045	2.056
9	1.600	0.072	0.008	-0.001	0.000	0.065	2.389	2.162
10	1.440	0.065	-0.005	0.003	0.000	0.067	2.151	2.232
11	1.818	0.081	0.013	-0.002	0.000	0.071	2.715	2.352
12	1.464	0.066	-0.012	0.005	0.000	0.073	2.186	2.426

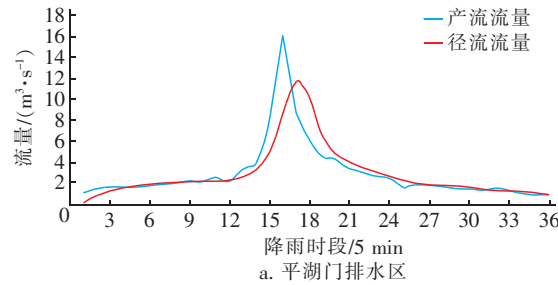
续表 2 (Continued)

降雨时段/5 min	降雨量( $H_n \cdot T$ )/mm	产流量 $V_n^c$ / $10^4 \text{ m}^3$	滞留量 $V_{n(1)}^z$ / $10^4 \text{ m}^3$	滞留量 $V_{n(2)}^z$ / $10^4 \text{ m}^3$	滞留量 $V_{n(3)}^z$ / $10^4 \text{ m}^3$	径流量 $\Sigma V_{n(i)}^d$ / $10^4 \text{ m}^3$	产流流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	径流流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
13	2.247	0.101	0.027	-0.005	0.000	0.078	3.356	2.615
14	2.527	0.113	0.010	0.010	0.000	0.093	3.774	3.114
15	5.514	0.247	0.102	0.004	0.000	0.141	8.234	4.699
16	10.720	0.480	0.178	0.039	0.000	0.263	16.009	8.762
17	5.746	0.257	-0.170	0.068	0.000	0.359	8.581	11.967
18	4.057	0.182	-0.058	-0.065	0.001	0.304	6.058	10.132
19	3.021	0.135	-0.035	-0.022	-0.001	0.194	4.511	6.456
20	2.823	0.126	-0.007	-0.014	0.000	0.147	4.215	4.902
21	2.166	0.097	-0.022	-0.003	0.000	0.122	3.235	4.075
22	2.030	0.091	-0.005	-0.009	0.000	0.104	3.031	3.474
23	1.777	0.080	-0.009	-0.002	0.000	0.090	2.654	3.005
24	1.713	0.077	-0.002	-0.003	0.000	0.082	2.559	2.742
25	1.059	0.047	-0.022	-0.001	0.000	0.071	1.581	2.357
26	1.202	0.054	0.005	-0.009	0.000	0.058	1.794	1.918
27	1.219	0.055	0.001	0.002	0.000	0.052	1.820	1.741
28	1.210	0.054	0.000	0.000	0.000	0.054	1.807	1.809
29	0.979	0.044	-0.008	0.000	0.000	0.052	1.461	1.729
30	0.947	0.042	-0.001	-0.003	0.000	0.047	1.414	1.551
31	0.823	0.037	-0.004	0.000	0.000	0.042	1.228	1.385
32	1.044	0.047	0.008	-0.002	0.000	0.041	1.559	1.361
33	0.896	0.040	-0.005	0.003	0.000	0.042	1.338	1.411
34	0.765	0.034	-0.004	-0.002	0.000	0.041	1.142	1.355
35	0.686	0.031	-0.003	-0.002	0.000	0.035	1.025	1.172
36	0.688	0.031	0.000	-0.001	0.000	0.032	1.027	1.060

2 结果与讨论

2.1 雨型设计径流量与雨水汇流时间的相关性

图 4 为同频率雨型径流量设计程序表达的产流



流量与径流流量的变化曲线,反映出峰值径流流量随汇流时间延长而衰减的特征,与暴雨强度公式计算的降雨强度随降雨时段延长而衰减的特征一致。

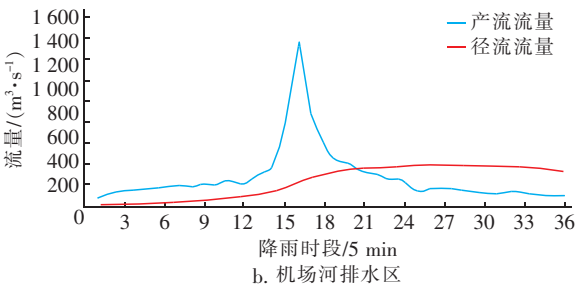


图 4 雨型径流量随雨水汇流时间的变化

Fig. 4 Change of rainstorm pattern runoff volume with rainwater convergence time

2.2 雨型设计径流量的检验与分析

以武汉市 9 个排水区为例,采用图 1 中的两类雨型,用雨型径流量设计程序与武汉市暴雨强度公式进行设计径流量对比,如表 3 所示。可以看出,两者的设计径流量误差较小,其中同频率雨型设计径

流量的平均绝对值相对误差为 1.29%,最大相对误差为 -4.77%,最小相对误差为 0.27%;P & C 雨型的平均绝对值相对误差为 3.43%,最大相对误差为 -8.44%,最小相对误差为 -1.22%。此外,同一排水区采用不同设计标准的误差基本相同。



表3 雨型与暴雨强度公式在设计径流量方面的对比

Tab. 3 Comparison of design runoff volume between rainstorm pattern and rainstorm intensity formula

项 目	汇流面积/hm <sup>2</sup>	汇流时间/min	重现期/年	设计径流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )			相对误差/%	
				同频率雨型	P & C 雨型	暴雨强度公式	前雨型	后雨型
平湖门	64	10.6	3	11.97	11.51	12.57	-4.77	-8.43
			10	17.61	16.93	18.49	-4.76	-8.44
汉口沿河	40	16.1	3	6.49	6.47	6.63	-2.09	-2.38
			10	9.55	9.52	9.75	-2.10	-2.38
天津路	161	26.5	3	20.95	20.37	21.23	-1.33	-4.08
			10	30.82	29.96	31.24	-1.34	-4.08
黄埔片	241	32.8	3	28.38	27.55	28.57	-0.67	-3.57
			10	41.74	40.56	42.03	-0.68	-3.49
什湖东	522	55.0	3	47.03	45.39	47.18	-0.33	-3.80
			10	69.17	66.77	69.41	-0.34	-3.80
谌家矶	628	86.0	3	44.46	43.80	44.34	0.27	-1.22
			10	65.41	64.44	65.23	0.27	-1.22
黄孝河	1 984	94.2	3	133.77	131.31	133.10	0.50	-1.35
铁路桥			10	196.78	193.16	195.80	0.50	-1.35
机场河黄家大湾闸	5 487	105.3	3	346.89	333.80	345.47	0.41	-3.38
			10	510.29	491.04	508.21	0.41	-3.38
黄孝河后湖大道	2 943	140.5	3	158.77	160.24	157.04	1.11	2.04
			10	233.59	235.72	231.01	1.12	2.04

雨型的误差分析:两类雨型的雨峰虽均与暴雨强度公式等值,但同频率雨型的雨量分布相对集中,而P & C雨型则相对分散,雨型相对集中的设计径流量较大,但P & C雨型分布更符合降雨特征。

各排水区雨水管渠汇流时间采用武汉市拟合公式<sup>[4]</sup>:

$$T' = t_1 + 0.005 \left( \frac{L}{i^{0.375}} \right)^{0.8324} \quad (13)$$

式中: $T'$ 为排水区出口上游雨水管渠峰值流量汇流时间,min; $t_1$ 为地面集水时间,min; $L$ 为排水区最远点到出口的管渠长度,m; $i$ 为管渠长度 $L$ 的平均管渠坡降。

雨型径流量推导公式的合理性分析:雨型设计径流量的理论方法与暴雨强度公式不同,且两者计算的设计径流量误差较小,表明雨型径流量推导公式成立。论其原理,在雨型设计程序引入产流量与径流量差别计算后,在排水区汇流时间延长的情况下,随着累计滞留量增加,导致峰值径流流量相对峰值产流量的衰减度扩大,而暴雨强度公式的降雨强度(即产流流量降雨强度)为雨峰降雨时段的平均降雨强度,随雨峰降雨时段的延长而变小,因此两者的设计原理虽然不同,但结论导向一致。

## 2.3 雨型径流量的应用前景

### 2.3.1 应用价值

利用雨型径流量推导公式可把握设计雨型下产流流量和径流流量全过程变化,在设定节点排水能力小于峰值径流流量时,可获得累计溢流量变化过程,其中的峰值累计溢流量既可用作调蓄池容量计算,也可结合湖泊调蓄自然地地形转化为水位变化过程线。

### 2.3.2 简化模型应用

基于上述应用价值可建立雨型径流量节点管控简化模型(无管网建模)。节点管控简化模型是假定排水区节点前上游排水管渠均达到设计标准下排水顺畅理想状态,进而由相关因子拟合公式确定节点雨水汇流时间,从而确定管控节点的泵站、管渠设施需求能力、防涝水位安全控制以及雨水溢流污染控制调节池容量,实现节点管控规划目标。对节点上游排水管渠的假定符合城市规划提出的排水系统需要通过改建达到设计标准的目标要求,在系统改造完毕后符合假定条件。

简化模型可分为5 min降雨时段3 h短历时雨型和1 h降雨时段24 h长历时雨型(雨型径流量推导公式同样适用于小时降雨时段)。短历时雨型适

用于城市溢流污染控制设计,长历时雨型适用于城市排水防涝规划。

与现行排水应用工具的比较:雨型径流量节点管控简化模型无法采用暴雨强度公式实现规划管控目标。与国内常用模型比较,InfoWorks CS 等模型虽然功能强大,但需要在排水管网建模的基础上实现,因而简化模型具有实施性强的独特优势。综合判断,InfoWorks CS 等常用模型在城市现有排水管网系统能力综合评估和运行管控方面优势明显,而节点管控简化模型适用于规划设计应用,在规模计算和防涝水位控制方面应用便捷。

### 2.3.3 代替暴雨强度公式的可行性

短历时简化模型在与自然地形相结合后功能将更强大,在设计窗口给定汇流范围线、设计重现期、综合径流系数和节点位置后,模型可利用 GIS 分析计算节点雨水汇流时间,并利用设计程序计算上述相关目标值,并自动表达流量和水位过程线图。该简化模型较暴雨强度公式传统水力计算的操作会更简便,并由于简化模型多功能化而有替代暴雨强度公式的可行性。

对于尚未建立或需要修正暴雨强度公式的地区,可完成各降雨时段理论累计频率计算和短历时设计雨型,通过短历时简化模型代替暴雨强度公式。

## 3 结论

① 通过武汉市雨型径流量设计程序在9个排水区的应用,结合暴雨强度公式在相同重现期标准下进行设计径流量对比检验,其中同频率雨型设计径流量的平均绝对值相对误差为1.29%,最大误差在5%以内,揭示了用雨型设计径流量代替暴雨强度公式的新途径。

② 采用相关因子拟合公式计算排水区节点雨水汇流时间,可建立雨型径流量节点管控简化模型,从而确定排水系统控制节点的泵站、管渠设施需求能力、防涝水位安全控制以及雨水溢流污染控制调节池容量,实现节点管控规划目标。简化模型可解决暴雨强度公式无法实现排水全过程控制的问题,也较国内常用模型具有可操作性、无需排水管网建模的优势。

## 参考文献:

- [1] 俞露,荆燕燕,许拯民. 辅助排水防涝规划编制的设计降雨雨型研究[J]. 中国给水排水,2015,31(19): 144-145.  
Yu Lu, Jing Yanyan, Xu Zhengmin. Study on design rainfall pattern supporting urban drainage and waterlogging prevention planning[J]. China Water & Wastewater,2015,31(19):144-145(in Chinese).
- [2] 欧淑芳,叶兴成,王飞,等. P & C 雨型在城市排水计算中的适用性分析[J]. 水电能源科学,2018,36(2): 32-35.  
Ou Shufang, Ye Xingcheng, Wang Fei, et al. Applicability of Pilgrim & Cordery rainstorm pattern in urban drainage calculation[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(2):32-35(in Chinese).
- [3] 葛维亚. 水利工程实用水文水利计算[M]. 北京:水利出版社,1980.  
Ge Weiya. Practical Hydrology and Water Conservancy Calculation of Water Conservancy Project[M]. Beijing: China Water & Power Press,1980(in Chinese).
- [4] 杜遂. 雨水管设计流量的简化计算与应用[J]. 给水排水,1991,17(5):20-24.  
Du Sui. Simplified calculation and application of rainwater pipe design flow[J]. Water & Wastewater Engineering,1991,17(5):20-24(in Chinese).



作者简介:杜遂(1962—),男,湖北武汉人,大学本科,高级工程师,长期从事市政工程规划和暴雨防灾城市系统设计研究工作。

E-mail:3058402389@qq.com

收稿日期:2019-08-22