

城市设计暴雨雨型研究^{*}

岑国平

沈 晋 范荣生

(空军工程学院 西安 710038)

(西安理工大学 西安 710048)

摘 要 采用模糊模式识别方法对我国四个雨量站的雨型进行分类和统计, 获得了短历时暴雨雨型的分布特性; 经过模拟分析和比较, 找出了一种较好地满足城市排水设计要求的设计雨型。

关键词 城市 设计暴雨 雨型 模式识别

分类号 TV122.1

1 前 言

设计暴雨包括它的平均雨强和时空变化。平均雨强以往研究较多, 而对时空变化的研究较少。暴雨的时空变化可用雨型表示, 根据试验研究, 它对小流域的洪峰流量和流量过程有很大影响^[1], 在汇流历时内平均雨强相同的条件下, 雨峰在中部或后部的三角形雨型比均匀雨型的洪峰大 30% 以上。

在小流域洪水计算的推理公式中, 常把雨强作均匀概化, 即采用均匀雨型, 这与绝大多数实际降雨是不符的。早在 40 年代, 前苏联的包高马佐娃等人就对乌克兰等地的降雨资料进行统计分析, 划分了七种雨型, 发现强度大致均匀的雨型很少^[2]。1957 年 Keifer 和 Chu 根据强度- 历时- 频率关系得到一种不均匀的设计雨型, 也称芝加哥雨型。以后 Huff, Pilgrim 和 Cordery, Yen 和 Chow 等都提出过各自的设计暴雨雨型^[3]。在国内, 邓培德等曾采用 Keifer 和 Chu 雨型进行调蓄池容积计算, 王敏等根据北京市的雨量资料提出过北京市的设计暴雨雨型^[4]。各种雨型之间差异较大, 目前还没有一种公认的雨型作为设计的依据。本文对我国四个雨量站的短历时暴雨资料进行统计, 对国内外目前常用的几种设计暴雨雨型进行比较和分析, 从而找出一种合适的雨型作为设计暴雨雨型。

2 短历时暴雨雨型的统计分析

天然降雨过程千变万化, 根据对大量降雨过程的分析, 可归纳成七种模式, 如图 1。其中 I、II、III 类为单峰雨型, 雨峰分别在前、后和中部, IV 类为大致均匀的雨型, V、VI、VII 为双峰雨型。

雨型与所研究的降雨历时有很大关系。根据城市和机场等小区排水的特点, 本文研究的降雨历时为 120 和 60min。雨型模式和历时确定后, 对每一场暴雨过程进行分析, 判断属于哪

^{*} 收稿日期: 1996-2-2; 修改稿日期: 1996-7-23。

一种模式。判断方法有目估法和模糊模式识别法两种，目估法是用计算机绘制每场降雨的过程直方图，目估判断属于哪种模式。此法原理简单，但由于降雨过程非常复杂，不易准确判断，会出现人为误差。模糊模式识别法是用时段雨量占总雨量的比例作为该场降雨的雨型指标，建立 7 种雨型的模式矩阵。再分别计算每场实际降雨与 7 种模式的贴近度，由择近原则，判断该场降雨属于哪种雨型。

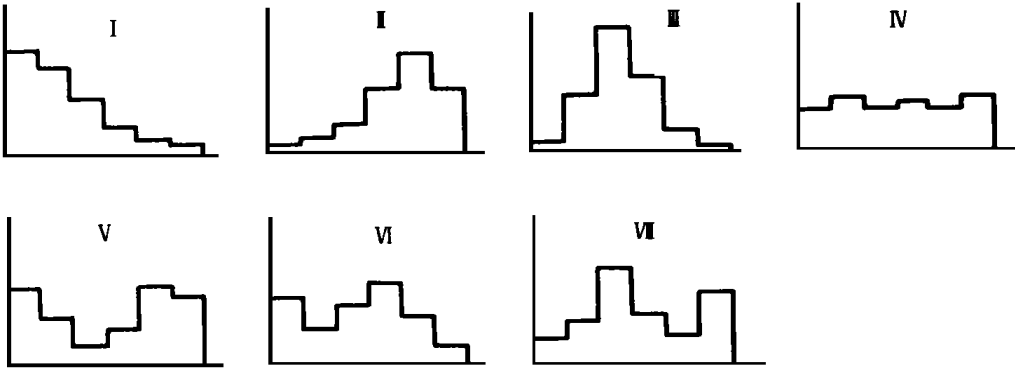


图 1 7 种雨型模式示意图

Fig. 1. Seven modes of time distribution of rainfall

将一场降雨划分为 m 个相等的时段，每个时段的雨量占总雨量的比例为：

$$x_i = \Delta H_i / H_z \quad (i = 1, 2, \cdots, m)$$

式中 ΔH_i 为各时段雨量； H_z 为总雨量。把这组 x_i 作为该场降雨的雨型指标，并用向量表示： $X = (x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 。

同样，7 种模式雨型也用这种指标表示：

$$V_k = (u_{k1}, u_{k2}, \cdots, u_{km}) \quad (k = 1, 2, \cdots, 7) \tag{3}$$

这里 u_{ki} 与 x_i 的意义相同，7 种模式也可写成矩阵形式。模式确定后，可计算出每场降雨与 7 种模式的贴近度：

$$\sigma_k = 1 - \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (u_{ki} - x_i)^2} \quad (k = 1, 2, \cdots, 7) \tag{4}$$

由择近原则，若第 k 个贴近度 σ_k 最大，该场降雨就属于第 k 种雨型。划分工作由计算机自动完成，避免了目估法存在的人为判断误差。经试用，大部分降雨的划分效果较好。本文在划分时把两种方法相结合，使划分结果尽量合理。

采用上述雨型划分方法，对上海黄渡和洋泾、北京卢沟桥、西安马渡王四个雨量站的短历时暴雨资料进行雨型划分和分析。四站都为自记雨量资料，年数为 8~29a，共计 75a，282 场暴雨。其中 120min 的雨型划分结果如表 1。

从上述划分结果，得出以下规律

- (1) 雨强大致均匀的降雨（第IV类）所占比例较小。目前推理公式中假定雨强均匀，与绝大部分降雨不符。
- (2) 单峰雨型占多数，而双峰或多峰雨型较少。由于单峰降雨雨量集中，易引起较大洪

水，对城市、机场等小区排水的影响较大，因此应重点考虑单峰雨型。

(3) 在单峰降雨中，雨峰在前部和中部的占绝大多数，而雨峰在后部的很少。

(4) 当历时减小时，均匀雨型有所增加，而双峰雨型有所减少，雨峰在后的降雨也略有增加。

表 1 120 min 雨型划分结果

Table 1. Classified results of time patterns of rainfall with duration 120 min

站 名	I		II		III		IV		V		VI		VII		总计
	<i>n</i>	<i>p</i> (%)	<i>n</i>	<i>p</i> (%)	<i>n</i>	<i>p</i> (%)	<i>n</i>	<i>p</i> (%)	<i>n</i>	<i>p</i> (%)	<i>n</i>	<i>p</i> (%)	<i>n</i>	<i>p</i> (%)	
黄 渡	21	31.3	6	9.0	16	23.9	11	16.4	5	7.5	4	6.0	4	6.0	67
洋 径	6	18.8	1	3.1	16	50.0	3	9.4	2	6.2	3	9.4	1	3.1	32
卢沟桥	10	26.3	1	2.6	12	31.6	3	7.9	6	15.8	4	10.5	2	5.3	38
马渡王	25	26.9	7	7.5	17	18.3	19	20.4	17	18.3	5	5.4	3	3.2	93
平 均	25.8		5.6		31.0		13.5		11.9		7.8		4.4		

注：1. 表中 *n* 为各类雨型的场数，*p* 为占总场数的百分比。

2. 有 52 场暴雨的总历时小于 90 min，只参加 60 min 雨型的分析，而没有参加 120 min 雨型的分析。

对单峰雨型，雨峰位置是一个重要指标。各站多场降雨的平均雨峰相对位置 *r* 值比较一致，都在 0.35~0.45，其中 *T* = 120 min 时，*r* 在 0.353~0.406，平均为 0.373，*T* = 60 min 时，*r* 在 0.404~0.443，平均为 0.425。国内外大量资料表明，大部分地区的 *r* 值都在 0.3~0.5，因此当缺乏当地雨量资料时，可取 0.4 左右的近似值。

3 设计暴雨雨型的比较

3.1 设计雨型

城市排水设计中应用最广、最简单的雨型是均匀雨型，但此雨型的计算结果常偏小。不均匀雨型中最简单的是三角形雨型。Yen 和 Chow (颜本琦和周文德) 提出一种不对称三角形雨型，如图 2。雨峰位置是根据三角形的无因次一阶矩与当地暴雨过程的平均无因次一阶矩相等的条件来确定。

由于均匀雨型和三角形雨型只考虑了历时为 *T* 的降雨核心部分，而没有考虑雨头和雨尾部分，因此径流量计算将明显偏小。为此，Sifalda 及 Desbordes 分别在矩形和三角形核心的基础上，增加了前后两个部分^[5]。

1957 年 Keifer 和 Chu 根据雨强- 历时关系提出了另一种雨型，也称芝加哥雨型。该雨型中任何历时内的雨量等于设计雨量。若暴雨公式为 $a = S_p / (t + b)^n$ ，则雨强过程为：

峰前

$$i = \frac{S_p}{(t/r + b)^n} \left[1 - \frac{nt_1}{t_1 + rb} \right]$$

(5)

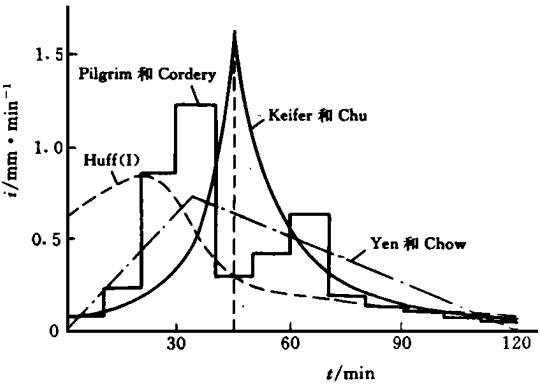


图 2 几种常用的设计雨型

Fig. 2. Several common design storm patterns

峰后
$$i = \frac{S_p}{(t/(1-r) + b)^n} [1 - \frac{nt^2}{t_2 + (1-r)b}] \tag{6}$$

式中 a 为历时 t 内的平均雨强; i 为瞬时雨强; t_1 为峰前历时; t_2 为峰后历时; r 为雨峰相对位置; S_p 、 b 、 n 为暴雨公式的参数。

Pilgrim 和 Cordery 也提出了一种雨型, 该雨型把雨峰时段放在出现可能性最大的位置上, 而雨峰时段在总雨量中的比例取各场降雨雨峰所占比例的平均值。其它各时段的位置和比例也用同样方法确定。这种雨型与实际降雨过程较为相似。

Huff 在研究美国伊里诺斯州的暴雨后, 把降雨按雨峰出现位置划分成 4 类, 并得到各类雨型的平均无量纲累积过程。在 ILLUDAS 模型中采用了第 I 类作为设计雨型。此外, 英国环境研究委员会、美国土壤保持局等都提出过各自的雨型。

3.2 雨型比较

利用雨量资料推求设计洪水有两种方法。一是频率分析法, 根据多年雨量资料, 经降雨径流模型转换成多年流量过程, 再作频率分析得到设计洪峰流量或一定历时的洪水总量。二是设计暴雨方法, 先对雨量资料作频率分析, 得到一定历时的设计雨量, 再确定一种设计雨型, 得到设计暴雨过程, 并由降雨径流模型转换成设计流量过程。

两种方法中, 雨量资料、降雨径流模型及频率分析方法是相同的, 所不同的是, 设计暴雨法需确定设计雨型, 若设计雨型不合适, 会引起较大的误差。频率分析法的精度比设计暴雨法高, 但需模拟大量的降雨径流过程, 工作量很大, 一般不可能在设计中应用, 但在研究设计暴雨时, 可作为比较设计暴雨雨型优劣的依据。本文利用这一思想, 对几种设计雨型进行比较和评价。

3.2.1 洪峰流量计算的设计雨型比较

城市、机场的排水设计中, 关键是设计洪峰流量的计算。不同雨型得出的洪峰流量可能有较大差异。笔者曾用上海黄渡站雨量资料, 对 Pilgrim 和 Cordery, Huff, Yen 和 Chow, Keifer 和 Chu4 种雨型作了比较。采用美国 ILLUDAS 模型, 模拟了黄渡 24a 共 91 场暴雨的径流过程, 经频率分析得到重现期 1、2、5、10a 的设计洪峰流量。同时, 经雨强- 历时- 频率关系分析, 得到 4 种重现期下历时为 30、60、90、120min 的设计雨量, 并确定 4 种设计雨型, 由 ILLUDAS 模型得出各自的设计洪峰流量, 计算与频率分析法的误差, 结果如表 2。

表 2 4 种设计雨型的洪峰流量与频率分析法的误差

Table 2. Errors between peak discharge four time patterns and that of frequency analysis method

雨 型	Huff	Pilgrim 和 Cordery	Yen 和 Chow	Keifer 和 Chu
系统偏差 (%)	- 12.9	3.1	- 23.0	0.2
平均误差 (%)	15.0	8.9	28.8	7.7

结果表明, 各种设计雨型所得的洪峰流量差异较大, 其中 Huff 法及 Yen 和 Chou 法的洪峰受历时影响非常显著, 若历时选取不当, 会造成较大误差。而 Pilgrim 和 Cordery 法及 Keifer 和 Chu 法受历时影响较小, 特别是 Keifer 和 Chu 法, 雨峰部分与历时无关。当历时增大或减小时, 只增加或去掉雨头雨尾部分, 因此计算的洪峰流量相当稳定, 与频率分析法的误差最小。

在城市雨水道设计时, 需从上而下确定各段管道的直径。所以汇流时间从上而下逐渐增

大, 用 Huff 法或 Yen 和 Chu 法确定设计雨型时, 降雨历时也要不断变化, 才能减小误差。因此每段管道的流量计算, 都需要重新确定雨强过程, 从最上游管段开始重复模拟径流过程, 工作量很大。而 Keifer 和 Chu 法的洪峰因不受历时影响, 一次确定的降雨过程在各段管道计算时都能适用, 流量计算时只需模拟一次就可得各段管道的设计流量, 非常方便。Keifer 和 Chu 法的雨强过程容易确定, 我国各地都有暴雨公式, 雨峰相对位置 r 值统计也较方便, 且各地的变化不大, 一般在 0.4 左右, 在缺乏当地资料时可用 0.4 的近似值。Pilgrim 和 Cordery 法的雨型更接近实际降雨过程, 但对当地降雨过程资料的依赖性很强, 必须有较多的资料, 使用比 Keifer 和 Chu 法麻烦。因此宜采用 Keifer 和 Chu 法。

3.2.2 调蓄池容积计算的设计雨型比较

雨洪调蓄池可以削减洪峰流量, 减小下游管渠的工程造价及洪灾损失。适合调蓄池容积计算的设计雨型与洪峰流量计算的设计雨型不一定相同, 因此作了专门研究^[6]。

雨洪调蓄池容积计算中, 常用的有均匀雨型和 Keirfer 和 Chu 雨型。均匀雨型的降雨历时等于汇流历时或大于汇流历时 τ , Keifer 和 Chu 雨型 r 等于 0 (开始最大) 或 0.5 (对称)。四种雨型如图 3 所示。雨量资料有黄渡站 24a 共 91 场暴雨及马渡王站 29a 共 106 场暴雨。比较的方法与前面相似, 分别用频率分析法和设计暴雨法计算调蓄池的容积。

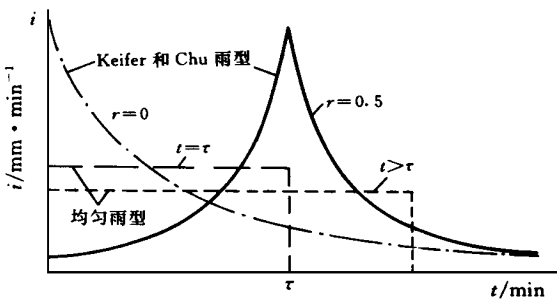


图3 调蓄池容积计算的4种雨型

Fig.3. Four time patterns of rainfall for calculating the volume of detention ponding

降雨径流计算的方法是等流时线法, 并假定共时径流面积线性增长, 产流计算用径流系数法, 流域面积 0.4km², 径流系数为 0.6, 汇流时间为 40min。调蓄池下游分别采用六种限制流量, 设计重现期为 1、2、5a。4 种雨型计算的容积与频率分析法的平均误差如表 3。

表3 4种雨型计算的容积与频率分析法的平均误差

Table 3. Mean errors between volume detention ponding of four time patterns and that of frequency analysis method

雨 型	均匀 ($t = \tau$)	均匀 ($t > \tau$)	KC ($r = 0$)	KC ($r = 0.5$)
黄渡站	23.0%	18.0%	11.0%	14.5%
马渡王站	27.0%	19.8%	11.3%	14.0%

计算结果表明, 两种均匀雨型得到的调蓄池容积偏小很多, 特别是 $t = \tau$ 时, 平均偏小 25% 左右, $t > \tau$ 时, 也偏小近 20%, 所以均匀雨型不宜在设计中应用。Keifer 和 Chu 雨型的误差较小, 但当 $r = 0$ 时, 结果大多偏小, 而 $r = 0.5$ 时大多偏大, 因此 r 宜在 0 与 0.5 之间, 从本例的结果看, $r = 0.1$ 最好, 但与一般地区 $r = 0.4$ 左右的情况不符。当采用 $r = 0.4$ 左右的值时, 个别情况会偏大较多, 这发生在下游限制流量与洪峰流量之比大于 0.6 时。实际应用中心此比值多数在 0.6 以下, 所以 Keifer 和 Chu 雨型一般能达到精度要求。

4 结 论

设计暴雨是雨水道系统设计的基础,除了一定历时内的平均雨强外,时程分布形式,即雨型也是一个重要的因素。实测资料和试验研究都表明,雨型对洪峰流量和流量过程线都有较大影响。本文根据四个雨量站 282 场短历时暴雨资料,用模糊模式识别方法对暴雨的雨型进行了划分和统计。结果表明,短历时降雨中单峰雨型是主要的,雨峰多数在前部和中部,而后部较少,均匀雨型也较少,各站的雨峰相对位置在 0.35~0.45 之间,这与国内外大量资料统计是基本一致的。

目前确定设计雨型的方法很多,除均匀雨型外,其余多为单峰雨型,雨峰多偏前,这与本文分析的结果是一致的,但各种方法获得的雨型差别较大,由这些雨型计算出的洪峰流量和调蓄池容积相差也很大。本文经过大量模拟和比较,认为 Keifer 和 Chu 雨型效果较好,一般能满足精度要求,且比较容易确定雨强过程,在国内外均有广泛应用,建议采用此雨型作为设计雨型。

Keifer 和 Chu 雨型的缺点是雨峰处过于尖瘦,特别是暴雨公式中 b 值较小时,尤为明显。为此可用一定时段 (5~10min) 的柱状过程代替,可以克服这一缺点。

参 考 文 献

- 1 吴彰春,岑国平等. 坡面汇流的试验研究. 水利学报. 1995, (7): 84~89
- 2 M. B. 莫洛可夫等著. 雨水道与合流水道. 北京: 建筑工程出版社, 1956, 17~19
- 3 D F Kibler, Urban Stormwater Hydrology. American Geophysical Union's Water Resources Monograph 7, 1982, 48~60
- 4 王敏,谭向诚. 北京城市暴雨和雨型的研究, 水文. 1994, (3): 1~6
- 5 V Arnell, P. Harremoes et al. Review of rainfall data application for design and analysis. Rainfall as the Basis for Urban Runoff Design and Analysis, Water Science and Technology, 1984, 16 (8/9): 1~45
- 6 岑国平. 城市雨洪调蓄池计算的设计雨型比较. 西北水资源与水工程. 1993, (2): 30~35

Research on Rainfall Pattern of Urban Design Storm

Cen Guoping

(The Air Force Institute of Engineering, Xian 710038)

Shen Jin and Fan Rongsheng

(Xian University of Technology, Xian 710048)

Abstract: The impacts of rainfall pattern of short duration storm on urban runoff are obvious. In this paper the data of four raingauge stations are classified and counted by the fuzzy mode recognition method. The distributive character of rainfall pattern of short duration storm is given. A design storm pattern satisfied for the urban drainage design is obtained by simulation and comparison.

Key words: urban; design storm; rainfall pattern; mode recognition.