

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.008

适用于初雨截流的降雨-径流定量表达方法与设计雨型

陈燕¹, 黄瑾¹, 蔡丽婧²

(1. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125; 2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 雨型研究是现代城市暴雨管理的基础,不同的雨型其径流计算结果不同,对初期雨水调蓄设施的设计和运行有较大影响。以上海市中心城区某合流制排水系统长系列降雨实测数据为基础,筛选了具有代表性的降雨过程作为设计雨型样本,提出了适用于上海市初期雨水截流的降雨-径流定量表达方法和短历时设计雨型,有助于确定调蓄设施的入流量和调蓄容积,对截流调蓄设施的设计和调控运行具有重要的参考价值。

关键词: 初期雨水; 降雨事件; 设计雨型; 定量表达方法; 溢流污染

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0049-05

Quantitative Expression Method of Rainfall-Runoff and Design Rain Pattern for Initial Rainwater Interception

CHEN Yan¹, HUANG Jin¹, CAI Li-jing²

(1. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: The study of rain patterns is the basis of modern urban storm management. Different rain patterns have different runoff calculation results, which have a great impact on the design and operation of initial rainwater storage facilities. Based on extensive rainfall data measured in a combined drainage system in Shanghai downtown area, a representative rainfall process was selected as the design rain pattern sample. A quantitative expression method of rainfall-runoff and a short-duration design rain pattern suitable for initial rainwater interception in Shanghai were proposed. These methods are helpful to determine the inflow and regulation volume of rainwater storage facilities, and provide important reference values for the design, regulation, and operation of such facilities.

Key words: initial rainwater; rainfall event; design rain pattern; quantitative expression method; overflow pollution

1 研究背景

雨型是降雨在时间尺度上的分配过程,暴雨强度公式表达了平均强度与最强时段的规律,不同的雨型会导致降雨径流的计算结果产生明显差异,对

径流曲线与调蓄计算均有重要影响,使得雨水调蓄设施表现出不同的处理效率。

在降雨过程中,具有初期雨水效应的那部分降雨称为“初期雨水”,是城市水体主要面源污染之

一。由于初期雨水在降落过程中混有空气中大量的工业废气、汽车尾气排放的颗粒物,同时又冲刷覆盖各种污染物的路面、屋面,致使初期雨水的污染物含量高于其他时段。随着城市化进程的加快,挟带大量污染物的初期雨水排放到城市河流湖泊等受纳水体中,将使河流湖泊的生态系统受到破坏,不仅危害水中的各种生物,而且也会对人类的健康产生很大的影响,因此初期雨水收集处理对于城市河流湖泊水体污染防治具有重要意义。

借助大数据计算分析长系列降雨特性,推求适用于初期雨水截流的定量表达方法和设计雨型,以期确定调蓄设施的入流量和调蓄容积提供参考。

2 降雨情况

2.1 降雨事件划分

在实际雨水调蓄设施工程应用中,雨型主要作为计算机数学模型的输入条件,结合管网系统进行雨水径流过程计算。基于暴雨强度公式的径流量计算方法,在一定程度上均化了暴雨峰值强度的变化过程,降低了最不利设计工况的程度,无法获得准确的过程线,在工程应用中的安全性和适用性都相对较弱。而现有各种方法推求的设计雨型均对应最大降雨时段,对初期降雨特征的研究不足导致相应的初期雨水截流规划设计工作存在诸多难点。

根据2002年—2019年上海市中心城区某合流制排水系统实测降雨资料及雨水泵站调度运行信息,基于计算机编程语言分析统计降雨事件,并进行降雨类型的模糊识别,分析不同初期雨水截流标准下的降雨特性,获取初期雨水的精准时程分配,推导适用于初期雨水截流的降雨-径流定量表达方法和设计雨型。

2.2 降雨类型的模糊识别

早在20世纪40年代,前苏联的包高马佐娃对乌克兰等地的降雨资料进行了统计分析,划分了7种雨型,具体见图1。其中,I~III型降雨的最大降雨量分别靠前、靠后以及分布在中部,IV型降雨强度基本均匀,V~VII型降雨分别存在两个降雨峰值。

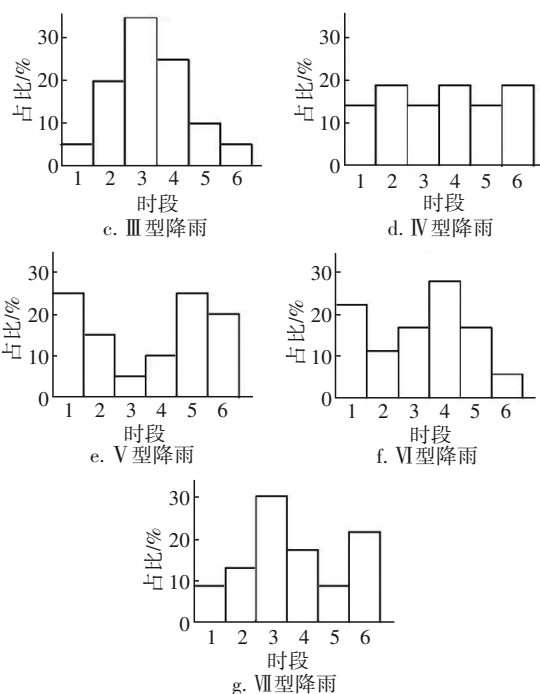
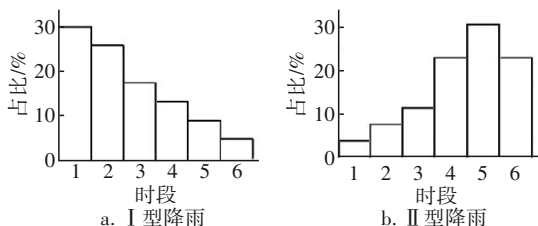


图1 7种雨型模式示意

Fig.1 Schematic diagram of seven rain patterns

根据降雨类型,将一场降雨历时划分为 m 个相等的时段,每个时段的雨量占总雨量的比例 x_i 为各时段雨量 ΔH_i 与总雨量 H_T 的比值,即: $x_i = \Delta H_i / H_T$, $i=1, 2, \dots, m$ 。

将这组 x_i 作为该场降雨的雨型指标,并用向量表示: $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ 。

同样,7种模式雨型也用这种指标表示: $V_k = [v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{km}]$, $k=1, 2, \dots, m$ 。

这里 v_{ki} 与 x_i 的意义相同,7种雨型模式也可写成矩阵形式,对应的判别矩阵为:

$$V_k = \begin{bmatrix} 7/23 & 6/23 & 4/23 & 3/23 & 2/23 & 1/23 \\ 1/26 & 2/26 & 3/26 & 6/26 & 8/26 & 6/26 \\ 1/20 & 4/20 & 7/20 & 5/20 & 2/20 & 1/20 \\ 3/21 & 4/21 & 3/21 & 4/21 & 3/21 & 4/21 \\ 5/20 & 3/20 & 1/20 & 2/20 & 5/20 & 4/20 \\ 4/18 & 2/18 & 3/18 & 5/18 & 3/18 & 1/18 \\ 2/23 & 3/23 & 7/23 & 4/23 & 2/23 & 5/23 \end{bmatrix}$$

矩阵确定后,实际降雨事件也对应划分为6个时段,求得每个时段雨量的比例后,可计算出每场降雨与7种模式的贴近度 σ_k ,即: $\sigma_k = 1 -$

$$\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (v_{ki} - x_i)^2}, k = 1, 2, \dots, 7。$$

基于2 h最小降雨间隔(IETD),将2002年—2019年长系列连续降雨实测资料划分为独立降雨

事件,采用Python语言调用近千万级的MySQL数据,共划分为2 202场独立降雨事件,按照上述方法,将降雨历时分为6个时段(即 $m=6$),根据择近原则(若第 k 个贴度 σ_k 最大,该场降雨就属于第 k 种雨型)将2 202场降雨事件相应的0~120 min初期雨水划分为7种雨型,统计结果见表1。

表1 长系列降雨类型统计结果

Tab.1 Statistics results of long series rainfall pattern

雨型	I型	II型	III型	IV型	V型	VI型	VII型
场次	1 068	175	137	169	304	243	106
比例/%	48.5	8.0	6.2	7.7	13.8	11.0	4.8

基于以上统计结果分析可知,该区域0~120 min降雨中单峰降雨占比较高,且单峰降雨中雨峰靠前的I型降雨占比较高,双峰降雨较少,雨峰居中的III型和均匀分布的IV型降雨最少。

3 设计雨型样本

《上海市污水处理系统及污泥处理处置规划(2017—2035年)》提出的控污标准如下:初期雨水截流标准为合流制11 mm、分流制5 mm。基于该标准,研究了降雨量与降雨历时的关系,并以初期雨水达到5 mm的降雨历时 T_5 (min)、初期雨水达到11 mm的降雨历时 T_{11} (min)作为主要指标进行累积频率统计。

在水文现象研究中,累积频率是等于及大于某水文要素值出现可能性的量度,也可以理解为等量或超量值累计频数 m 与总的试验次数 n 之比,常用符号 $p(x \geq x_i)$ 表示,即对长系列 n 个样本进行排序,若排序为 m ,则其累积频率 p 计算公式如下:

$$p = \frac{m}{n}, m=1,2,\dots,n \quad (1)$$

对于水文现象的样本系列,经验累积频率常按维泊尔(Weibull)公式计算,具体如下:

$$p = \frac{m}{n+1}, m=1,2,\dots,n \quad (2)$$

合理选择样本对于水文现象规律性的归纳分析关系重大,通常应注意以下几点要求:

① 一致性。样本中的个体应属同类,收集的条件也应相同。文中对同一个排水系统实测资料不同参数指标(T_5 、 T_{11})进行统计,样本的个体属于同类,收集条件相同。

② 代表性。要使样本代表性好,关键是增大

样本容量,即实测系列越长,其代表性越好,越能反映总体的特性。文中收集了2002年—2019年约18年数据,总体而言样本具有较好的代表性。

③ 可靠性。文中的雨量收集装置为翻斗式雨量计,该雨量计是一种水文、气象仪器,用以测量自然界的降雨量,同时将降雨量转换为数字信息量输出,资料来源可靠。

④ 独立性。独立性是指样本系列中各个体的实测结果不发生影响^[1]。研究样本中降雨量 ≥ 5 mm的降雨事件共767场,统计 T_5 的累积频率时 n 取767,降雨量 ≥ 11 mm的降雨事件共470场,统计 T_{11} 的累积频率时 n 取470,然后根据式(2)推导得到不同降雨量的降雨事件对应的 T_5 、 T_{11} 的累积频率 p_{T_5} 、 $p_{T_{11}}$,样本统计具有独立性。

该排水系统雨水泵站的运行记录显示,2002年—2019年共发生溢流209次,约占总降雨次数的10%,可认为该排水系统溢流污染场次控制率约为90%。发生溢流污染时,累积频率 p_{T_5} 为80%~90%的降雨次数最多,累积频率 $p_{T_{11}}$ 为70%~80%的降雨次数最多(见图2),即发生溢流事件时 T_5 、 T_{11} 两组样本的众值出现在累积频率 p 为80%附近。

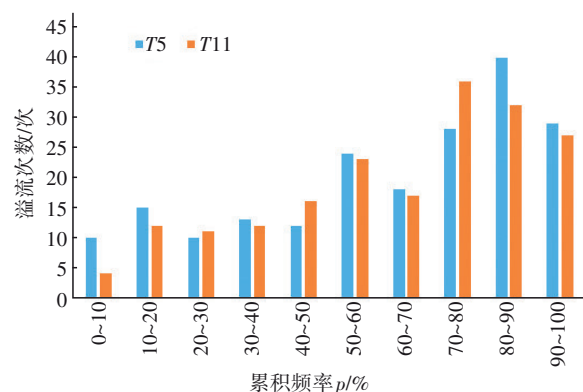


图2 溢流污染放江时的降雨事件累积频率分布特征
Fig.2 Distribution characteristics of cumulative frequency of rainfall events during overflow pollution discharge into the river

综合考虑,选择长系列降雨资料中 T_5 以及 T_{11} 累积频率最接近80%的实际降雨过程作为雨型研究样本,即在2 202场降雨事件中选择总降雨量超过11 mm且 T_5 和 T_{11} 的累积频率均接近80%的降雨事件。据此选择出两场典型降雨事件:2014年7月15日降雨事件(总降雨量75.1 mm, $p_{T_5}=77\%$, $p_{T_{11}}=82\%$),2015年4月5日降雨事件(总降雨量为34.5

mm, $p_{75}=77\%$, $p_{711}=80\%$), 相应0~120 min的降雨过程如图3、4所示。

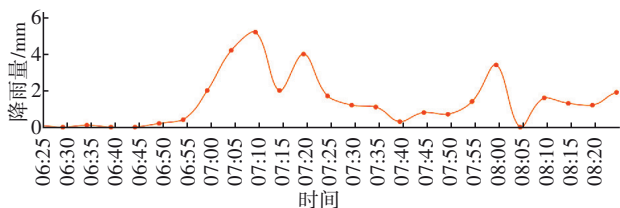


图3 2014年7月15日典型降雨事件0~120 min降雨过程

Fig.3 Typical rainfall process (0-120 min) on July 15, 2014

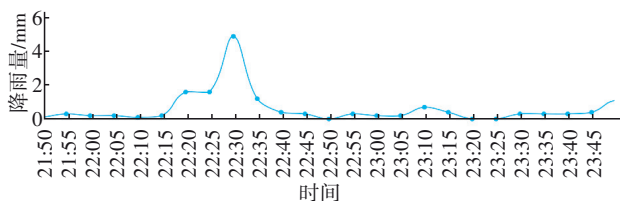


图4 2015年4月5日典型降雨事件0~120 min降雨过程

Fig.4 Typical rainfall process (0-120 min) on April 5, 2015

根据降雨类型分析,上海市短历时降雨以单峰型为主且雨峰靠前,综合对比后将图4所示的雨型作为该区域初期雨水截流的设计雨型样本(以下简称20150405样本)。

4 降雨-径流定量表达方法和设计雨型研究

4.1 芝加哥合成暴雨过程线^[2-3]

Keifer和Chu为了在芝加哥进行雨水管网系统研究,提出了合成雨量过程线。他们推荐用与均匀降雨相同平均强度的暴雨生成雨量过程线,并且在所选择的时间内造峰,造峰之前的湿度条件与产生的最大径流强度有关。雨量过程线的形状对任何暴雨历时的降雨均适用,只是平均强度不同。

降雨历时与平均暴雨强度的经验关系(对任何所选择的频率)如下:

$$i = \frac{a}{(b + t_d)^c} \quad (3)$$

式中: i 为降雨历时 t_d 的平均暴雨强度; a 、 b 、 c 均为常数。

降雨历时 t_d 的暴雨总降雨量(H)为:

$$H = i \cdot t_d = \frac{at_d}{(b + t_d)^c} \quad (4)$$

则 t 时刻的瞬时降雨强度为:

$$i = \frac{dH}{dt} = \frac{a[(1-c)t + b]}{(t + b)^{c+1}} \quad (5)$$

这是与降雨平均强度相同的瞬时雨量过程线,其雨峰出现在暴雨的开始阶段。为了贴近实际情况,重新修正雨量过程线使之在降雨开始后其历时的某一比例 r (雨峰位置系数)处形成雨峰。降雨历时为:

$$t = t_b + t_a \quad (6)$$

式中: t_b 为峰前降雨历时; t_a 为峰后降雨历时。

则有:

$$t = \frac{t_b}{r} = \frac{t_a}{1-r} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),则峰前瞬时降雨强度 $i(t_b)$ 、峰后瞬时降雨强度 $i(t_a)$ 分别为:

$$i(t_b) = \frac{a \left[\frac{(1-c)t_b}{r} + b \right]}{\left(\frac{t_b}{r} + b \right)^{c+1}} \quad (8)$$

$$i(t_a) = \frac{a \left[\frac{(1-c)t_a}{1-r} + b \right]}{\left(\frac{t_a}{1-r} + b \right)^{c+1}} \quad (9)$$

通过式(8)和式(9)就可以合成芝加哥雨量过程曲线。芝加哥雨量过程曲线和强度历时曲线一样,对任一降雨历时都有相同的平均降雨强度。芝加哥雨峰位置系数 r 由所考虑地区的前期湿度条件决定,在芝加哥应用的 r 值为0.375。

4.2 降雨-径流定量表达方法和设计雨型

考虑20150405样本与芝加哥雨型时程分配具有较好的相似度,故采用芝加哥雨量过程曲线的推导方法。因20150405样本的雨峰出现在第45分钟,故雨峰位置系数 $r=0.375$,从而确定峰前降雨历时 t_b 、峰后降雨历时 t_a ,结合《暴雨强度公式与设计雨型标准》(DB 31/T 1043—2017)中短历时暴雨设计雨型成果,通过试算调整参数 a 、 b 、 c ,使得峰前累计降雨量、峰后累计降雨量的计算结果与实测降雨过程的误差在2%以内,从而得到适用于初期雨水截流标准的降雨-径流关系的设计雨型,具体见表2。

根据推导,适用于初期雨水截流的降雨-径流之间的定量表达方法如下:

$$i(t_b) = 13.718(1 + 0.846 \log 7P) \left[\frac{(1 - 0.656)t_b}{1 - r} + 7.0 \right] / \left(\frac{t_b}{1 - r} + 7.0 \right)^{0.656 + 1} \quad (10)$$

$$i(t_a) = 13.718(1 + 0.846 \log 7P)$$

$$\left[\frac{(1 - 0.656)t_a}{r} + 7.0 \right] / \left(\frac{t_a}{r} + 7.0 \right)^{0.656 + 1}$$

(11)

$$Q = 0.01 \cdot i \cdot t \cdot \Psi \cdot F \cdot \beta \quad (12)$$

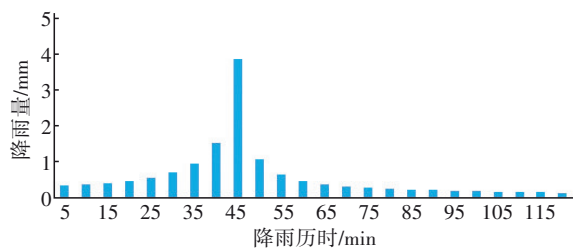
式中: P 为设计降雨重现期, a; Q 为初期雨水截流量, m^3 ; Ψ 为径流系数; F 为汇水面积, hm^2 ; β 为安全系数。

表2 20150405样本降雨过程与设计雨型

Tab.2 Rainfall process and design rain pattern for 20150405 sample

t/min	5	10	15	20	25	35	40	45	50	55	60
20150405样本 $i/(\text{mm} \cdot 5 \text{ min}^{-1})$	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1	1.6	1.6	4.9	1.2	0.4	0.3
设计雨型 $i/(\text{mm} \cdot 5 \text{ min}^{-1})$	0.345	0.381	0.427	0.489	0.577	0.961	1.521	3.858	1.092	0.661	0.489
t/min	65	70	75	80	85	95	100	105	110	115	120
20150405样本 $i/(\text{mm} \cdot 5 \text{ min}^{-1})$	0	0.3	0.2	0.2	0.7	0	0	0.3	0.3	0.3	0.4
设计雨型 $i/(\text{mm} \cdot 5 \text{ min}^{-1})$	0.395	0.335	0.293	0.262	0.238	0.203	0.190	0.179	0.169	0.161	0.153

初期雨水截流侧重于低重现期, 重现期 P 可由当地短历时暴雨强度公式反推。例如, 根据《暴雨强度公式与设计雨型标准》(DB 31/T 1043—2017)、通过上海市各重现期下历时 120 min 暴雨过程成果, 可推求出 20150405 样本的重现期约为 0.15 年 (见图 5)。

图5 适用于初期雨水截流的短历时设计雨型 ($P=0.15$)Fig.5 Short duration design rain pattern applicable to initial rainwater interception ($P=0.15$)

5 结论

初期雨水径流产生的过程与排水体制、降雨过程、地面排水系统径流特点以及受纳水体息息相关, 如何优化截流系统的调控运行, 目前尚无精准的理论计算方法, 这对调蓄设施的工程建设和运行造成较大影响。为保证雨水调蓄设施设计方案的合理性, 不仅需要通过理论方法计算确定其设计规模, 也需要采用设计降雨过程线对设计方案进行校核和优化。以上海市中心城区某合流制排水系统长系列降雨实测数据为基础, 选择总降雨量超过 11 mm 且 $T5$ (初期雨水达到 5 mm 的降雨历时) 和 $T11$ (初期雨水达到 11 mm 的降雨历时) 的长系列累积频率为 $(80 \pm 3)\%$ 的降雨事件, 筛选了具有代表性的降雨过程作为设计雨型样本, 结合降雨类型特征, 确定了综合雨峰位置系数 r 为 0.375 的设计雨型的降

雨-径流表达方法, 提出了适用于上海市初期雨水截流标准的短历时设计雨型, 为海绵城市蓄滞能力、调蓄设施的控污运行提供数据支撑, 对降雨径流过程及初期雨水调蓄设施调控运行的准确模拟也具有重要参考意义。

参考文献:

- [1] 叶镇国. 土木工程水文学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
YE Zhenguo. Civil Engineering Hydrology[M]. Beijing: China Communications Press, 2000(in Chinese).
- [2] 周玉文, 赵洪宾. 排水管网理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
ZHOU Yuwen, ZHAO Hongbin. Drainage Network Theory and Calculation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000(in Chinese).
- [3] 张彦晶, 陈燕, 张留臻. 基于初期雨水截流标准的某排水系统长系列降雨特性[J]. 中国市政工程, 2022 (2): 25-27, 105.
ZHANG Yanjing, CHEN Yan, ZHANG Liuli. Research on long series rainfall characteristics of a drainage system based on initial rainwater interception standard [J]. China Municipal Engineering, 2022 (2): 25-27, 105(in Chinese).

作者简介: 陈燕(1979—), 女, 江苏扬中人, 硕士, 高级工程师, 注册环保工程师、注册咨询工程师(投资), 主要研究方向为水文水资源、水环境治理、水生态修复、水土保持、河湖污染治理等。

E-mail: chenyanor@126.com

收稿日期: 2023-01-13

修回日期: 2023-04-04

(编辑: 丁彩娟)