

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.23.019

适用于南方城市排水防涝能力评估的暴雨雨型

许文斌¹, 李益飞¹, 李莎², 姜智怀³, 张玉浩¹, 尹小斌¹,
占龙飞³

(1. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司, 江西 南昌 330038; 2. 重庆纵横工程设计有限公司, 重庆 401120; 3. 江西省气候中心, 江西 南昌 330006)

摘要: 我国南方城市汛期持续时间长、排水受河湖水系顶托影响大,对长历时雨型和复合雨型进行研究是十分必要的,为此,以南昌市为例开展了相关研究。首先,采用泰森多边形创建法、自然断点分级法和雨量插值PRISM法将南昌市划分成4个暴雨分区。然后,采用聚类分析法对长历时降雨进行了研究,结果表明,南昌市长历时降雨有明显单类别的聚集特征,各分区单类聚集特征占比分别高达77.3%、74.0%、72.2%、74.2%,在24 h长历时暴雨雨型中,各分区均有雨峰在前、中部平缓、尾部爬高的特征。另外,基于客观需求,开展了复合雨型的相关研究,结果表明,南昌市各降雨分区复合雨型以单峰雨型为主,即使在极端短历时暴雨前出现过双峰或多峰,但出现场次极少,仅为1~2次。将各设计降雨重现期下的芝加哥雨型与聚类分析后截取的前22 h雨型进行重组,可以得到不同重现期下的22 h+2 h复合雨型。

关键词: 南方城市; 长历时雨型; 复合雨型; 暴雨分区; 聚类分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)23-0133-06

Rainstorm Pattern Suitable for Evaluation of Rainwater Drainage and Waterlogging Control Ability in Southern Cities

XU Wen-bin¹, LI Yi-fei¹, LI Sha², JIANG Zhi-huai³, ZHANG Yu-hao¹,
YIN Xiao-bin¹, ZHAN Long-fei³

(1. Nanchang Urban Planning & Design Institute, Nanchang 330038, China; 2. Chongqing Zongheng Engineering Design Co. Ltd., Chongqing 401120, China; 3. Jiangxi Climate Center, Nanchang 330006, China)

Abstract: The flood season of cities in Southern China lasts for a long time and the rainwater drainage is greatly affected by the backwater of river and lake system, making it is necessary to investigate the long-duration rainfall pattern and synthetic rainfall pattern. Therefore, a case study was carried out in Nanchang. Firstly, Nanchang City was divided into four rainstorm zones by Thiessen polygon analysis, natural breakpoint classification method and PRISM. Then, the long-duration rainfall was investigated by cluster analysis. The long-duration rainfall in Nanchang City demonstrated obvious single cluster characteristics, and the proportion of single cluster in each zone was as high as 77.3%, 74.0%, 72.2% and 74.2%, respectively. The 24-hour long-duration rainstorm pattern of each zone had the characteristic of rainfall peak in the front, gentle in the middle and rising at the tail. In addition, the related research of

基金项目: 2020年南昌市第二批科技计划项目(2020-NCGCZX-005)

synthetic rainfall pattern was carried out based on the objective needs. In Nanchang, the synthetic rainfall pattern in each rainstorm zone was mainly single-peak rainfall pattern. Even if there were double or multiple peaks before extremely short-duration rainstorm, the frequency of occurrence was only 1–2 times. The 22-hour+2-hour synthetic rainfall pattern with different return periods was obtained by recombining the Chicago rainfall pattern with the first 22-hour rainfall pattern intercepted from actual rainfall sequence after cluster analysis.

Key words: southern cities; long-duration rainfall pattern; synthetic rainfall pattern; rainstorm zone; cluster analysis

近些年来,随着城市化速度的加快,城市内涝灾害突发、频发和广发^[1],城市内涝已成为城市的主要自然灾害之一。作为内涝的主要因子,暴雨雨型的选择合理与否,对于城市排水防涝规划或方案的编制工作至关重要。目前在工程设计中主要有以下几种设计雨型:Keifer和Chu根据特定重现期的降雨强度-历时-频率曲线提出的芝加哥雨型;Huff根据雨峰发生位置差异提出的Huff雨型;Pilgrim和Cordery取各时段降雨量占总降雨量百分比的平均数而建立的P.C雨型;Yen和Chow提出的雨峰位置根据统计矩法确定的不对称三角形雨型以及美国水土保持局1986年提出的SCS雨型。目前的相关研究多为短历时雨型^[2-3],主要适用于市政雨水管道的设计和自由出流条件下雨水管网排水能力的评估。而对于我国大部分南方城市,水系发达,短历时雨型无法反映全天候的河道水位上升情况,故无法用于城市内涝防治能力的评估。现阶段,因降雨资料的缺乏,绝大部分地区在规划设计中所采用的长历时雨型基本都是通过同倍比放大或同频率分析法获得,并不具有典型性和代表性。因此,有必要对长历时降雨进行系统研究,确定适用于南方城市内涝防治能力评估的典型长历时雨型。此外,我国大部分南方城市汛期持续时间长,单纯的短历时降雨不能反映城市下垫面洼蓄、渗透能力的饱和过程,也无法反映河道水位上升过程而产生的水位顶托,为了更客观地评估雨水管网排水能力,避免超标设计带来的资源浪费,有必要寻求适用于南方城市管网排水能力评估的复合雨型。为此,笔者以南昌市为例,对最近30年的实际降雨观测数据进行分析,并确定该地区适用于城市内涝防治能力评估的典型长历时雨型和适用于管网排水能力评估的复合雨型,研究成果可直接应用于南昌市的相关规划

设计,也可为我国其他南方城市提供借鉴。

1 数据来源与预处理

本研究采用江西省8个国家级气象站和南昌市分布的22个区域自动气象站的降雨监测数据。各降雨历时计算所用到的分钟降雨资料时间为1990年—2020年,其中1990年—2003年的分钟降雨资料通过降水自记纸记录数字化得到,而2004年—2020年的分钟降雨资料为自动站分钟雨量数据。《江西省一般站自动观测和人工观测资料对比评估》报告中已表明,上述降雨数据对比差异在合理范围内,自动观测取代人工观测可行。

2 暴雨分区的划分及资料一致性分析

南昌市暴雨分区以年均雨量进行空间划分,以地理信息系统分析工具ArcGIS为平台进行操作,主要采用泰森多边形创建法^[4]、自然断点分级法^[5]及雨量插值PRISM法^[4]完成暴雨分区划分工作。主要步骤如下:①根据30个气象站的地理位置分布情况创建泰森多边形;②根据泰森多边形覆盖情况选择可利用的气象站开展1990年—2020年年均降雨量PRISM方法插值计算,计算出每个空间网格内的年均降雨量;③利用自然断点分级法对南昌市主城区进行分级,鉴于研究区域不大,划分为4级;④将插值雨量网格点数据转换为矢量数据方式,并对插值边界进行区域化处理,得到4个完整的暴雨分区;⑤将4个分区面矢量图采用面转换为点,获取4个暴雨分区中心点坐标位置,后续以各分区的中心点雨量代表该分区展开研究。具体划分结果见图1。

根据插值结果,对4个暴雨分区中心点年降水量序列资料进行MK检验,检验结果显示,4个暴雨分区UF和UB统计量均未在0.05置信区间外有交汇,由此说明,在1990年—2020年4个分区数据未出现明显突变点,能反映自然条件的降雨形成。

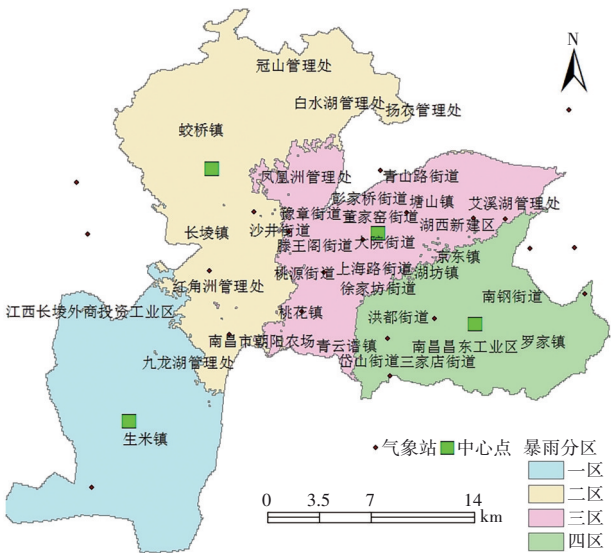


图1 南昌市暴雨分区划分结果及中心点分布

Fig.1 Division results of rainstorm zone and distribution of center points in Nanchang City

3 长历时雨型研究

3.1 长历时降雨场次划分和降雨资料的截取

参考《城市排水工程设计——暴雨强度公式编制技术指南》,按照同一场降雨中,同历时的降雨过程采样不能相互交叉的原则,且不遗漏每场降雨中的最大 24 h 降雨量,将长历时场次按照某时刻大于 0.01 mm 降雨作为开始时间、某时刻后连续 72 h 未发生大于 0.01 mm 降雨作为结束时间进行划分,然后按照强降雨筛选标准,挑选 24 h 降雨量≥50 mm 的降雨过程 5 min 数据进行长历时暴雨雨型分析。

3.2 研究方法

考虑不同场次暴雨之间既存在相似性又存在差异性的模糊关系特点,可采用聚类分析将各场次暴雨客观归纳为不同类型,再根据地区暴雨特征选择合理的雨型作为设计雨型^[6-7],步骤如下:

① 按照划分降雨场次的方法,计算不同降雨历时下的场雨雨量,选择长历时场雨中 24 h 雨量>50 mm 的场雨过程作为计算序列。

$$E_{ij} = \text{Max}_{i=t_0-(t_m-M)}^{i+M} \left(\sum_{n=i}^{i+M} T_{n,j} \right) \quad (1)$$

式中: i 为滑动时刻,取值为 $t_0 \sim (t_m - M)$,其中, t_0 为场次降雨起始时刻, t_m 为场次降雨结束时刻, M 为滑动时长,本研究取 1 440 min; n 为降雨时刻,取值为 $i \sim (i+M)$; $E_{i,j}$ 为第 j 场降雨第 $i \sim (i+M)$ 时刻的最大场雨量; $T_{n,j}$ 为第 j 场降雨第 n 时刻的雨量。

② 通过最大场雨量 $E_{i,j}$ 的分钟雨量 $T_{n,j}$ 除以总雨量 $E_{i,j}$ 得到无量纲雨量,再以 5 min 的间隔计算累积降雨时长 m 在 5、10、15、 \cdots 、1 440 min 的无量纲累积雨量序列 $R_{m,j}$ 。

$$R_{m,j} = \sum_{n=1}^m T_{n,j} / E_{i,j} \quad (2)$$

③ 将序列 $R_{m,j}$ 作为聚类样本进行计算,将累积降雨时长以 5 min 的间隔均分为 r 等份作为聚类指标,将 j 个样本客观分为 p 类(本研究取 $p=5$)。

④ 以 p 个样本作为初始聚类点计算两样本间的重心距离,按照最近距离准则将全部 j 个样本归纳到 p 个初始聚类点中。

$$D_{p,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^r \left(\frac{R_{kj} - R_{kp}}{X_k} \right)^2} \quad (3)$$

式中: $D_{p,j}$ 为第 j 个样本和第 p 个样本之间的重心距离; X_k 为第 j 个样本与第 p 个样本的标准差; k 为聚类指标, $k=1,2,\cdots,r$; R_{kj} 为第 j 个样本的第 k 个指标; R_{kp} 为第 p 个样本(聚类中心)的第 k 个指标。

⑤ 重新计算归类好的 p 类各变量的均值作为新的聚类点。

重复步骤④、⑤直到新的归类与前一步归类的变化小于某阈值为止。

3.3 数据分析

将各分区降雨基于聚类法分为 5 类,选取出现场次最多的类为该降雨历时的雨型,每类雨型场次数和无量纲雨量见表 1(降雨历时为 24 h)。可知,长历时雨型聚类结果特征明显,有明显单类别的聚集特征。其中,一区主要为第 1 类雨型,二区主要为第 1 类雨型,三区主要为第 4 类雨型,四区主要为第 3 类雨型,各区单类聚集特征占比分别高达 77.3%、74.0%、72.2%、74.2%,表明南昌的雨型特征明显。

表 1 聚类法中每类雨型出现场次数

Tab.1 Frequency of each rainfall pattern by clustering method

| 雨型类别 | 场次数 | | | |
|-------|-----|----|----|----|
| | 一区 | 二区 | 三区 | 四区 |
| 第 1 类 | 126 | 74 | 8 | 5 |
| 第 2 类 | 13 | 9 | 5 | 4 |
| 第 3 类 | 11 | 10 | 2 | 72 |
| 第 4 类 | 7 | 5 | 70 | 9 |
| 第 5 类 | 6 | 2 | 12 | 7 |

各分区聚类结果见图2。可知,各分区的聚类结果基本有前期降雨、中期降雨、后期降雨和均匀降雨等。从无量纲雨量来看,最大无量纲雨量接近1,这说明某些降雨过程在很短的时间内几乎下了整个历时的雨量,如一区第5类和二区第4类。

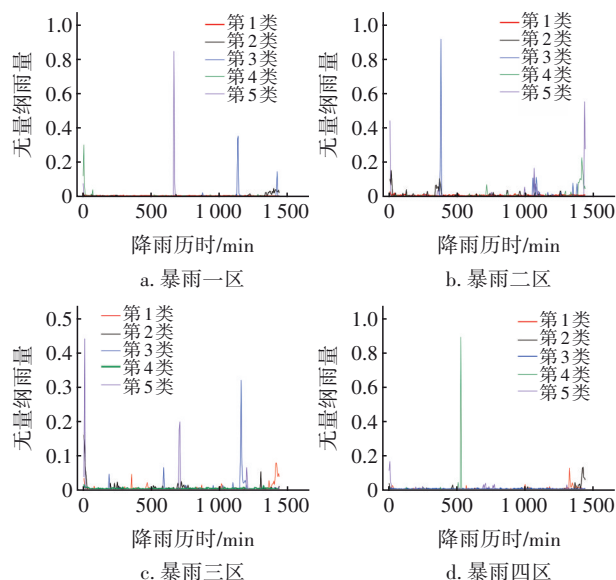


图2 各暴雨分区24 h聚类分析结果

Fig.2 Results of cluster analysis on 24-hour rainstorm for each rainstorm area

各暴雨分区的高频雨型如图3所示。可以看出,在24 h长历时暴雨雨型中,各分区均有雨峰在前、中部平缓、尾部爬高的特征。

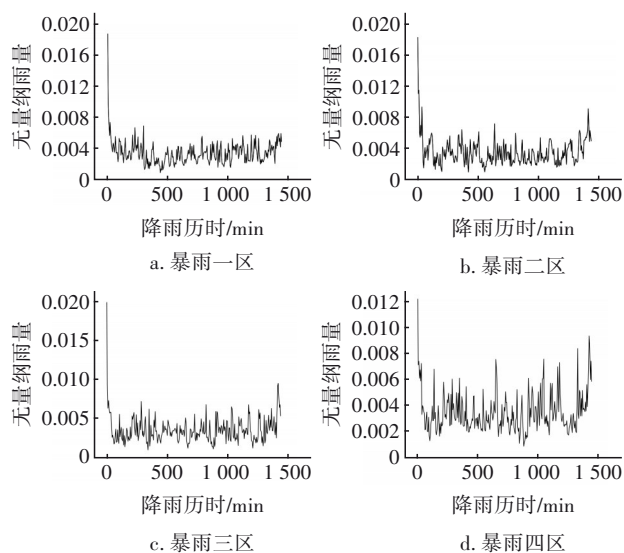


图3 各暴雨分区的高频雨型

Fig.3 High-frequency rainfall pattern of each rainstorm area

将各分区不同重现期下的24 h降雨量回代至

上述各区高频无量纲雨型,即可得到每个分区各重现期下的24 h长历时降雨雨型,如图4所示。各分区不同重现期下24 h历时降雨量如表2所示。

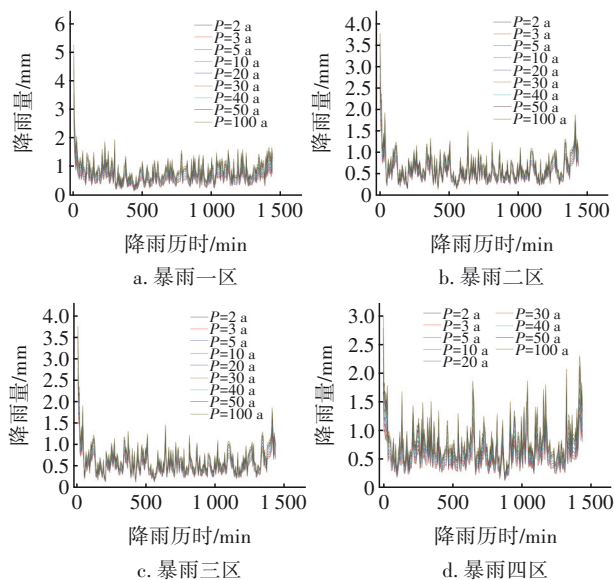


图4 各暴雨分区不同重现期下24 h长历时雨型

Fig.4 24-hour rainfall pattern under different return periods in each rainstorm area

表2 各暴雨分区不同重现期下24 h降雨量

Tab.2 24-hour rainfall under different return periods in each rainstorm area mm

| 暴雨分区 | 不同重现期对应的降雨量 | | | | | | | | |
|------|-------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | P=2 a | P=3 a | P=5 a | P=10 a | P=20 a | P=30 a | P=40 a | P=50 a | P=100 a |
| 一区 | 156.0 | 172.1 | 190.0 | 212.5 | 234.1 | 246.6 | 255.3 | 262.1 | 283.1 |
| 二区 | 135.1 | 144.2 | 154.3 | 166.9 | 179.1 | 186.1 | 191.0 | 194.9 | 206.6 |
| 三区 | 136.3 | 149.9 | 164.9 | 183.9 | 202.0 | 212.5 | 219.8 | 225.5 | 243.2 |
| 四区 | 135.7 | 149.6 | 165.0 | 184.3 | 202.9 | 213.6 | 221.1 | 227.0 | 245.0 |

4 复合雨型研究

如前所述,复合雨型需能反映城市下垫面洼蓄、渗透能力的饱和过程及河道水位上升过程,同时其主要用途在于客观评估雨水管网的排水能力,而不至于过度设计。基于此,确定复合雨型的思路如下:寻找历史上最强30场2 h降雨,并截取此30场极端短历时降雨及其之前共22 h的实际降雨,再利用聚类分析法找出出现次数最多的雨型类别,最后结合各暴雨分区的芝加哥雨型,将1、2、3、5、10年等不同重现期的芝加哥雨型与聚类分析后截取的前22 h雨型进行重组,从而得到各分区不同重现期下的22 h+2 h复合雨型。很显然,前22 h是对30场极端短历时降雨之前的实际降雨序列经聚类分析

后出现频次最多的降雨序列,因此可以充分、客观地体现短历时强降雨来临之前的降雨状况。

根据上述思路,需先进行短历时降雨场次划分和降雨资料的截取。

4.1 短历时降雨场次划分和降雨资料的截取

参考《城市排水工程设计——暴雨强度公式编制技术指南》,按照同一场降雨中,同历时的降雨过程采样不能相互交叉的原则,且不遗漏每场降雨中的最大 1 h 降雨量,将短历时降雨场次按某时刻大于 0.01 mm 降雨作为开始时间、某时刻后连续 3 h 未发生大于 0.01 mm 降雨作为结束时间进行划分,然后按照强降雨筛选标准,挑选 1 h 降雨量 ≥ 20 mm 的降雨过程 5 min 数据,再在这些降雨场次中挑选最强 30 场 2 h 降雨及其前 22 h 降雨过程进行分析。

4.2 研究方法

聚类分析法原理同 3.2 节。

4.3 数据分析

对 2 h 降雨量排名前 30 位的场雨及其前 22 h 的雨型聚类分析结果进行汇总,如表 3 所示。

表 3 2 h 雨峰及峰前 22 h 雨型聚类分析场次数

| 雨型类别 | 场次数 | | | |
|-------|-----|----|----|----|
| | 一区 | 二区 | 三区 | 四区 |
| 第 1 类 | 5 | 5 | 16 | 12 |
| 第 2 类 | 12 | 13 | 11 | 7 |
| 第 3 类 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 第 4 类 | 11 | 9 | 1 | 2 |
| 第 5 类 | 1 | 1 | 1 | 8 |

从表 3 可以看出,一区出现次数最多的为第 2 类,该雨型的特点为前期降雨微量,1 025 min 时雨量开始逐渐增大,1 350 min 后降雨量激增[见图 5(a)];一区第 3 类雨型虽然在整场降雨存在多峰,但该类降雨仅出现 1 次。二区出现次数最多的为第 2 类,该雨型的特点为前期降雨微量,1 205 min 时雨量开始逐渐增大,1 320 min 后降雨量激增[见图 5(b)];二区第 3 类和第 5 类雨型虽然在整场降雨存在多峰,但该类降雨分别仅出现 2 次和 1 次。三区出现次数最多的为第 1 类,该雨型的特点为前期降雨微量,1 350 min 后降雨量激增[见图 5(c)];三区第 3 类和第 5 类雨型虽然在整场降雨存在多峰,但该类降雨均只出现 1 次。四区出现次数最多的为第

1 类,该雨型的特点为前期降雨微量,1 350 min 后降雨量激增[见图 5(d)];四区第 3 类雨型虽然在整场降雨存在多峰,但该类降雨仅出现 1 次。由上述分析可以看出,南昌市各暴雨分区以单峰雨型为主,即使各分区在极端短历时暴雨前出现过双峰或多峰,但出现场次极少,仅为 1~2 次。将以上各区高频雨型截取前 22 h 降雨序列,再与各设计暴雨重现期下的芝加哥雨型重组,便得到各区对应不同重现期的 22 h+2 h 复合雨型,如图 6 所示。

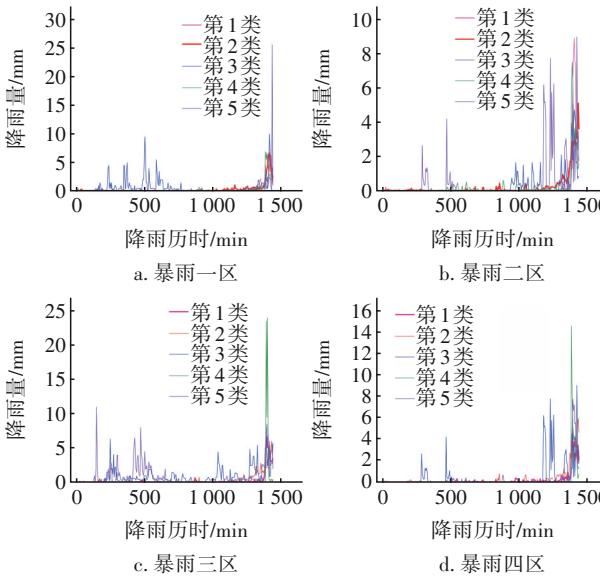


图 5 各暴雨分区 2 h 雨峰及峰前 22 h 降雨聚类分析结果
Fig.5 Results of cluster analysis on 2-hour peak and 22-hour rainfall before peak for each rainstorm area

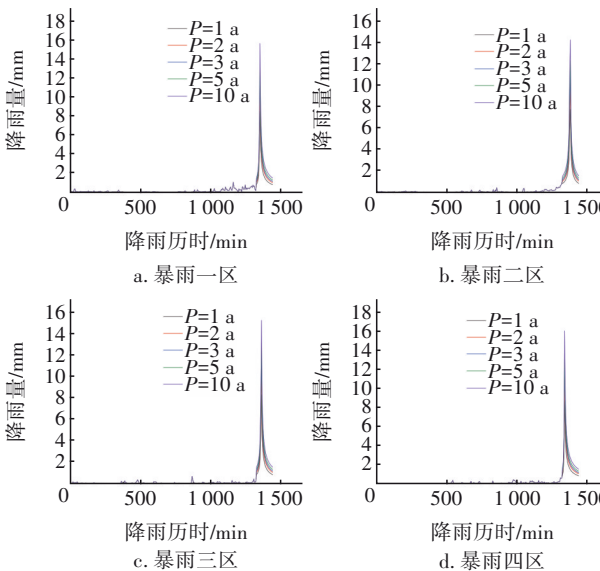


图 6 各暴雨分区不同重现期下的复合雨型
Fig.6 Synthetic rainfall pattern under different return periods in each rainstorm area

5 结论

① 采用泰森多边形创建法、自然断点分级法及雨量插值 PRISM 法完成了南昌市暴雨分区的划分工作,共划分为4个暴雨分区,并对划分后各中心点的年降雨资料进行了MK检验,检验结果表明数据可靠,能反映自然条件的降雨形成。

② 提出了长历时降雨场次划分和截取方法,以该实际长历时降雨序列为样本,采用聚类法对长历时降雨进行了分析。结果表明,南昌市长历时降雨有明显单类别的聚集特征。其中,一区24 h降水历时雨型主要为第1类雨型,二区主要为第1类雨型,三区主要为第4类雨型,四区主要为第3类雨型,各区单类聚集特征占比分别高达77.3%、74.0%、72.2%、74.2%。从各区高频雨型可以看出,24 h长历时暴雨雨型中,各分区均有雨峰在前、中部平缓、尾部爬高的特征。

③ 基于用于客观评估雨水管网排水能力的复合雨型需能反映城市下垫面洼蓄、渗透能力的饱和过程及河道水位上升过程的要求,确定了复合雨型的构造思路,并开展了相关研究。结果表明,南昌市各暴雨分区复合雨型以单峰雨型为主,即使在极端短历时暴雨前出现过双峰或多峰,但出现场次极少,仅1~2次。将各设计暴雨重现期下的芝加哥雨型与聚类分析后截取的前22 h雨型进行重组,可得到各分区不同重现期下的22 h+2 h复合雨型。

参考文献:

- [1] 唐明,许文斌,尧俊辉,等. 基于城市内涝数值模拟的设计暴雨雨型研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5): 97-105.
TANG Ming, XU Wenbin, YAO Junhui, *et al.* Design rainstorm patterns based on numerical simulation of urban flooding[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5): 97-105 (in Chinese).
- [2] 朱勇年. 设计暴雨雨型的选用——以杭州市为例[J]. 中国给水排水, 2016, 32(1): 94-96.
ZHU Yongnian. Selection of design rainfall pattern: case of Hangzhou [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 94-96 (in Chinese).
- [3] 王光明,廖玉芳,曾向红,等. 湖南短历时暴雨雨型分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1): 86-90.
WANG Guangming, LIAO Yufang, ZENG Xianghong, *et al.* The analysis of the short-duration rainstorm pattern over Hunan Province [J]. Torrential Rain and Disaster, 2017, 36(1): 86-90 (in Chinese).
- [4] 朱求安,张万昌,赵登忠. 基于PRISM和泰森多边形地形要素日降水量空间插值研究[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 233-238.
ZHU Qiu'an, ZHANG Wanchang, ZHAO Dengzhong. Topography-based spatial daily precipitation interpolation by means of PRISM and Thiessen polygon analysis [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 233-238 (in Chinese).
- [5] 付敏,李晓宁. 基于断点分类和方向差异的等高线分级补断方法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2013, 50(4): 737-742.
FU Min, LI Xiaoning. Iteration approach for contour lines reconstruction based on breakpoint classification and orientation difference [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2013, 50(4): 737-742 (in Chinese).
- [6] 杨星,朱大栋,李朝方,等. 按风险率模型分析的设计雨型[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 542-548.
YANG Xing, ZHU Dadong, LI Chaofang, *et al.* Establishment of design hyetographs based on risk probability models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 542-548 (in Chinese).
- [7] 朱亚平,刘健文,白洁. 云分类中逐个修改聚类和模糊聚类分类性能的对比研究[J]. 气象, 2007, 33(2): 15-21.
ZHU Yaping, LIU Jianwen, BAI Jie. A comparative study on stepwise cluster and fuzzy cluster in cloud classification techniques [J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(2): 15-21 (in Chinese).

作者简介:许文斌(1987-),男,江西乐平人,硕士,高级工程师,主要研究方向为城市排水系统理论与技术。

E-mail:993210512@qq.com

收稿日期:2022-03-25

修回日期:2022-07-12

(编辑:刘贵春)