

南京市近 25 年短历时暴雨雨型特性

孙周亮^{1,2,3}, 鲍振鑫^{1,2}, 舒章康^{1,2}, 刘冀⁴, 刘艳丽^{1,2}, 王国庆^{1,2}

(1.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;2.水利部应对气候变化研究中心,江苏 南京 210029;3.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;4.三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:采用南京市 7 个雨量观测站近 25 年的逐分钟雨量资料,提取了各站 30min、60min、90min、120min、150min、180min 历时的暴雨样本,统计了各站暴雨年发生次数变化并比较了空间差异性,采用模糊识别法识别了各暴雨样本的雨型,分析了各历时暴雨样本雨型组成结构,从雨峰数量和雨峰系数方面探究了雨峰的分布规律,并对比了城郊暴雨雨型特征差异性。结果表明,近 25 年来南京市暴雨发生次数呈增加趋势,暴雨时程分配更加集中;各历时暴雨中以雨型 I (单峰且雨峰在前部)、IV (暴雨过程均匀) 发生频率较大,雨型发生比例空间差异较小;各站暴雨中约有 38.6%~70.2% 为单峰暴雨,不同站点暴雨雨峰位置分布类似;城区暴雨发生频次更高,且未来时期持续性强降水发生几率较大,郊区暴雨雨峰出现时间比城区更早。

关键词:短历时暴雨;模糊识别法;雨型特征;雨峰系数

中图分类号:P339

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)05-0078-06

1 前言

随着城市化的发展,由于城市热岛效应一方面加剧了局部短历时强降雨^[1],另一方面加大了现有排涝系统的负荷,增加了雨洪灾害损失,从而降低了城市防洪排涝能力^[2],这使得城市内涝风险增加,城市的稳定发展受到侵扰^[3],城市极端降水事件发生频率越来越高,引起了城市规划设计人员和学者的关注^[4]。

南京是长江三角洲城市群的中心城市之一,城市化水平高、人口密集^[5],属亚热带湿润季风气候,夏季降雨集中,受梅雨和台风双重影响而内涝灾害多发^[6],近年来强降水现象频发^[7],一旦发生暴雨则常造成较大经济和环境损失,因此十分有必要对暴雨发生规律进行探究。

当前已有不少关于南京市暴雨的研究,如在雨量方面有暴雨量级和发生频次^[8]、城郊暴雨发生规律的时空差异性^[9]等关注点,在暴雨成因方面主要集中于天气系统的成因差异研究^[9]、梅末暴雨的影响机制^[9]、

水汽含量对梅汛期暴雨的影响^[10],在内涝灾害方面有灾害社会影响因素^[11]、暴雨灾害风险及防御对策^[12]、城市径流变化影响因素^[13]等方面的研究成果。

从现有研究成果来看,对南京市的暴雨研究多集中于雨量方面,在暴雨“结构”方面研究较少,所谓暴雨结构是指暴雨量的时间分配情况,即雨型。同雨量一样,雨型也是降雨的重要特征参数^[13]。从数值上看,雨型是雨量的时程分配,实则是暴雨结构特征,或强度变化,同样会影响灾害的发生,在郊区、山区等地表现为地质类灾害,如滑坡、山体崩塌等^[14-15],在城区则表现为内涝灾害,常直接影响内涝积水的范围、深度、持续时间等^[3,16]。雨型也是推求设计暴雨中必不可少的一个重要要素,直接关系到所建工程的安全。因此,分析雨型规律是掌握区域暴雨演变特征的基础一步,更是防灾减灾的必要手段。

为了摸清南京市暴雨雨型特征,本文基于南京市近 25 年的水利部门自动站雨量监测资料,提取了不同历时的暴雨样本,对比了暴雨发生次数变化的空间

收稿日期:2018-05-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0601501,2017YFC1502706);国家自然科学基金项目(51679145)

作者简介:孙周亮(1993-),男,湖北咸宁人,博士研究生,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:zlsun17@163.com

通讯作者:王国庆(1971-),男,山东成武人,博士,教授级高工,主要从事气候变化与水文研究。E-mail:gqwang@nhri.cn

差异性,并分析了各暴雨样本的雨型和雨峰特征,分析结果可为南京市城市规划建设提供科学依据,可帮助提高城市防洪防涝能力,减少灾害损失。

2 数据与方法

2.1 暴雨事件界定及选样

根据历史数据系列较长且连续、一致性和区域代表性的原则,选取了南京市城区的 7 个雨量站,分别为六合、葛塘、晓桥、南京、东山、天生桥闸和高淳站,站点分布见图 1,收集整理了以上站点 1992~2016 年近 25 年的逐分钟自动记录降雨资料。



图 1 雨量站点分布
Fig.1 The distribution of the rainfall stations

为了解南京市暴雨雨型特性,采用逐时段滑动统计法,分别提取 30、60、90、120、150、180min 暴雨过程样本,样本之间时间上不交叉、不跨年。暴雨事件的界定采用阈值法,参考王光明等^[17]的方法。选样方法如下:从年降雨系列挑出最大某历时暴雨并进行阈值判断,再从剩余系列中继续挑选该历时最大暴雨,直至不再达到阈值为止。根据上述暴雨样本选择方法,从各站观测资料中挑选出不同历时暴雨事件,并统计发生次数(见表 1)。

2.2 雨型模糊识别法

每一场暴雨过程都有特定的时程分配过程,不同的时段分配比例形成不同的模式特征。前苏联学者包高马佐娃基于降雨时程分配规律概括出 7 种雨型,如图 2 所示。

雨型模糊识别是将实际降雨过程与上述 7 种雨型时程分配过程比较,分别计算一次实际降雨和各雨型的贴近度,选贴近度最大者作为该实际降雨过程的雨

型,上述 7 种雨型的时程分配比例见表 2^[18]。

表 1 各站短历时暴雨样本统计(次)

Table1 The statistics of rainstorm samples from the stations in differernt durations

历时 /min	阈值 /mm	六 合	葛 塘	晓 桥	南 京	东 山	天生 桥闸	高 淳
30	10	121	155	173	166	148	144	163
60	15	86	101	118	114	109	101	113
90	18	143	164	136	141	156	129	149
120	20	139	159	130	136	156	125	150
150	22	131	141	120	126	141	123	146
180	25	114	127	106	107	131	110	139

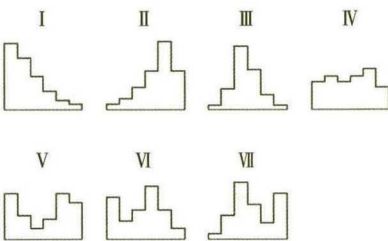


图 2 7 种暴雨雨型示意图
Fig.2 The seven rainstorm patterns

表 2 雨型时程分配比例

Table2 The proportion of temporal distribution of different rainstorm patterns

雨型	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
I	0.36	0.28	0.18	0.1	0.05	0.03
II	0.03	0.06	0.12	0.21	0.37	0.21
III	0.03	0.14	0.43	0.27	0.1	0.03
IV	0.15	0.18	0.15	0.18	0.22	0.12
V	0.25	0.13	0.06	0.11	0.25	0.2
VI	0.23	0.1	0.16	0.29	0.16	0.06
VII	0.03	0.13	0.31	0.19	0.09	0.25

2.3 雨峰特征指标

雨峰特征是雨型的一个重要特征,主要包含雨峰数量和雨峰位置两个指标,反映了暴雨过程中的雨量集中时刻。考虑到短历时暴雨过程历时较短,其中极少出现多峰现象,因此本研究中不考虑多峰情形。雨峰位置系数(简称雨峰系数)具体计算方法参考戴有学等的方法^[19]。

3 结果与讨论

3.1 暴雨发生次数变化

根据表 1 暴雨样本,分析暴雨事件发生次数变化(见图 3),各历时暴雨发生次数年平均增加速率

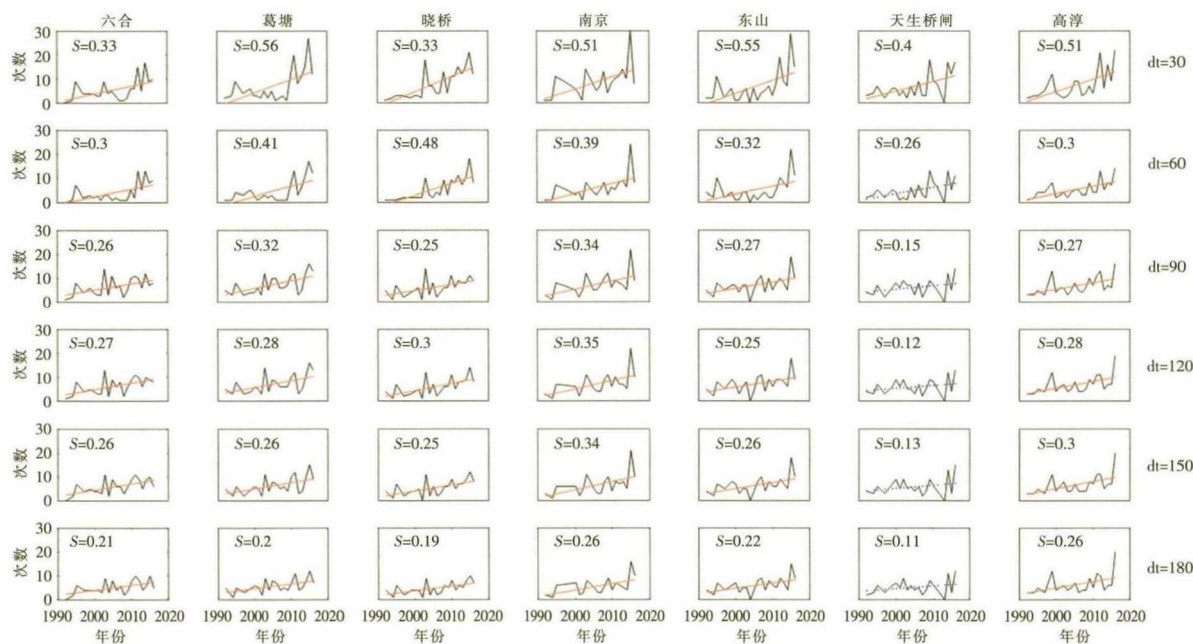


图3 各年暴雨发生次数变化趋势(1992–2016)

Fig.3 The change trend of the annual rainstorm occurrence (1992–2016)

(记为 S)均呈不同程度的增加趋势,平均增加速率为 2~6 次/10a,尤以 2009 年以来增加幅度明显。采用 MK 趋势检验法对暴雨发生次数趋势进行检验,结果表明除天生桥闸站以外各站各历时暴雨发生次数均呈显著增加趋势(实线部分),天生桥闸站仅 30min 历时暴雨发生次数为显著增加。

为了分析暴雨发生次数的空间分布特征,对各站按不同历时下 S 值作从大到小排序,结果如表 3 所示。其中六合、天生桥闸两站的 S 值在各历时下均较小,表明这两站的各历时暴雨发生次数增加幅度最小。南京、葛塘、晓桥、东山四站的 S 值在各历时下均

较高,以上结果表明南京、葛塘、晓桥、东山四站各历时暴雨发生次数增加幅度均较大,在相对更短历时的 30、60min 历时下最为频繁,即暴雨时程分配上更加集中。高淳站各历时暴雨发生次数增加幅度均也较大,在相对较长历时的 150、180min 历时下最为频繁,即相对于南京、葛塘、晓桥、东山四站暴雨过程较为均匀。

雨型组成结构统计结果见图 4。其中多以雨型 I、II、III、IV 为主,其累积发生次数比例约为 70%;V、VI、VII 三种雨型发生次数所占比例均较小,累积发生次数比例约为 30%。在雨型 I、II、III、IV 中,总体占比最大的是雨型 I,且雨型 I 的占比随历时增长而存在增长趋势,而雨型 IV 则存在相反的趋势,即占比随历时增加而减小;雨型 II、III 在各历时暴雨中占比相对较小,总体上较为稳定。

记各历时暴雨中所占比例最大雨型为主要发生雨型(见表 4),各历时暴雨中雨型 I 或雨型 IV 占比最多。30min 暴雨中主要发生雨型中除高淳站外均为雨型 IV,从图 4 可知高淳站雨型 I 和雨型 IV 的占比较为接近,这说明各站 30min 暴雨均匀特征较为明显。在 60、90、120、150、180min 暴雨中,除六合站以外,其他站点的主要雨型均为雨型 I (东山村 90min 暴雨的雨型 I、IV 占比并列最高),这说明以上历时的暴雨存在雨峰出现较早的特征。

表3 不同历时S值站点顺序

Table3 The order of S values with different duration for all stations

历时/min	S 值大小顺序
30	晓桥>葛塘>东山>南京/高淳>天生桥闸>六合
60	晓桥>葛塘>南京>东山>高淳/六合>天生桥闸
90	南京>葛塘>东山/高淳>六合>晓桥>天生桥闸
120	南京>晓桥>葛塘/高淳>六合>东山>天生桥闸
150	南京>高淳>葛塘/东山/六合>晓桥>天生桥闸
180	南京/高淳>东山>六合>葛塘>晓桥>天生桥闸

注: S :暴雨事件发生次数年平均增加速率

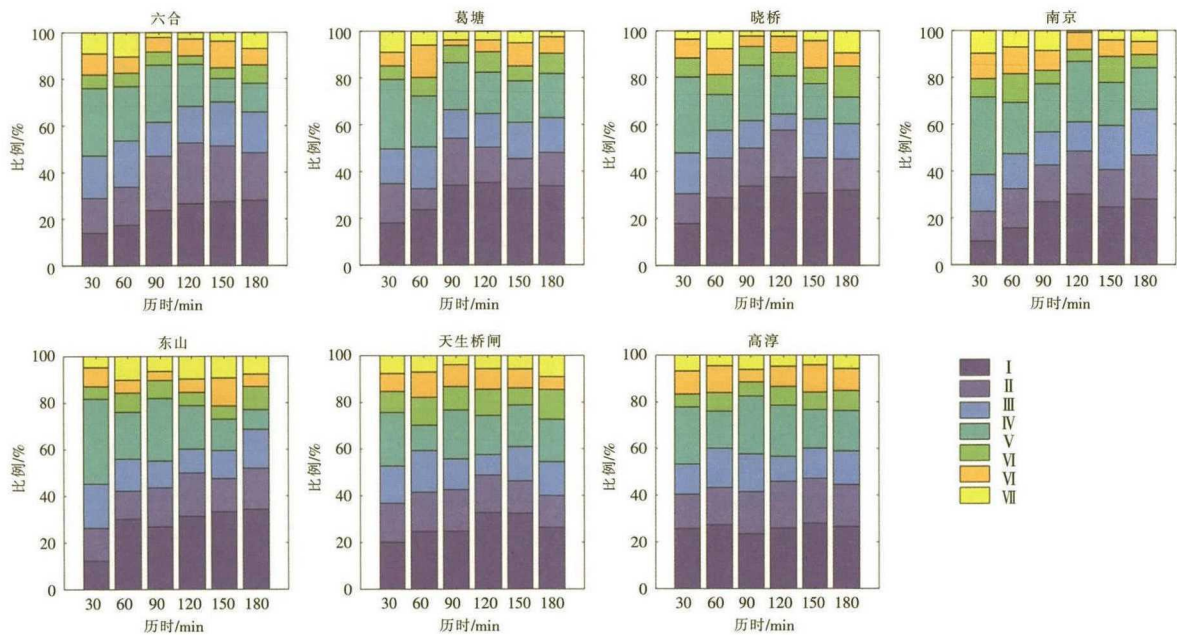


图 4 各历时暴雨雨型组成结构

Fig.4 The statistics of the rainstorm patterns structure in different durations

表4 各历时暴雨主要发生雨型							
Table4 The main rainstorm patterns in different durations							
历时 /min	六 合	葛 塘	晓 桥	南 京	东 山	天 生 桥 闸	高 淳
30	IV	IV	IV	IV	IV	IV	I
60	IV	I	I	IV	I	I	I
90	IV	I	I	I	I / IV	I	I
120	I	I	I	I	I	I	I
150	I	I	I	I	I	I	I
180	I	I	I	I	I	I	I

3.2 雨峰特征分析

由图 4 可知各站暴雨中单峰型(即雨型 I、II、III)暴雨占绝大多数,占比在 38.6%~70.2%之间,双峰雨型和均匀雨型均占比相当,较单峰雨型占比小,大多数历时双峰和均匀雨型占比不超过 30%。

图 5 列出了各历时暴雨的雨峰系数区间分布情况,从图中可看出同一历时不同站点暴雨的雨峰系数分布较为类似。从历时上看,不同历时暴雨雨峰系数分布差异较大,其中 30、60、90min 三种历时的雨峰系数分布较其余历时更加集中,120、150、180min 三种历时雨峰系数相对前三种历时较为均匀,主要分布区间更加靠前,集中特征不明显。

其中各站 30min 历时暴雨雨峰系数最为集中,暴雨雨峰位置大多位于中部,结合图 4 可知该历时暴雨中均匀型雨型占比高于其他历时,说明 30min 历时暴

雨强度分布最为均匀。随着历时增加,雨峰系数逐渐分散,180min 历时暴雨雨峰位置分布最均匀,总体上具有前部多、尾部少的分布特征,随着历时增加单峰雨型占比有增加趋势,从图 4 可知单峰雨型中的前锋型暴雨占比增加幅度最大,因而出现历时越长雨峰越靠前的现象。

3.3 城郊雨型特征差异

本文所选 7 个站点中,南京站位于主城区,葛塘、晓桥、东山、六合、天生桥闸、高淳六站位于郊区,其中葛塘、晓桥、东山三站距城区较近,而六合、天生桥闸、高淳三站距城区较远。从前述分析结果可知近 25 年来城郊暴雨发生特征存在差异性。城区暴雨发生次数年平均增加速率更大。图 3 显示城区及近郊暴雨年发生次数增加趋势显著,从表 3 中 S 值排位可知城区及近郊站点各历时暴雨发生次数增加速率显著高于郊区(以六合、天生桥闸两站为代表),在 90min 及以上历时南京站均居于首位,表明未来城区发生持续性强降水特征明显,发生内涝并造成损失的几率大大增加。

单次暴雨过程中郊区暴雨雨峰出现位置比城区更靠前。从图 5 可知,尤其在较长历时暴雨中南京站雨峰居中特征较郊区站点更显著,主要是因为南京站雨型 III、IV 发生频次较其他站高(见图 4),而这两种雨型均为雨峰在暴雨时程中部的雨型。对于同一历时暴雨而言,郊区雨峰位置越靠前则说明峰现时间越早,



图5 雨峰系数区间分布

Fig.5 The interval distribution of the rainfall peak coefficients

在暴雨出现时可利用的应急防范时间相对较短。

4 结论

(1)近 25 年来南京市暴雨年发生次数呈增加趋势,平均增加幅度为 2~6 次/10a,尤以 2009 年以来增加明显;南京、葛塘、晓桥、东山四站暴雨年发生次数增加趋势较大,六合、天生桥闸两站增加趋势较小,高淳站增加趋势随历时变化而波动较大。

(2)各站暴雨中雨型 I、II、III、IV 约占暴雨发生总数的 70%,其中雨型 I、IV 发生最多;各历时暴雨雨型组成结构上空间差异较小。

(3)各历时暴雨以单峰雨型为多,约占 38.6%~70.2%。30、60、90min 历时暴雨的雨峰多在出现暴雨过程中部,120、150、180min 历时暴雨雨峰分布较为均匀;同一历时不同站点暴雨的雨峰系数分布较类似。

(4)城区暴雨发生频次更高,且未来时期持续性强降水发生几率较大,单次暴雨过程中郊区暴雨雨峰出现位置比城区更靠前。

参考文献:

- [1] 史潇,李玉涛,黄亮,等. 南京城市降雨淹没模拟及径流分析[J]. 测绘科学, 2017,(9):179-185. (SHI Xiao, LI Yutao, HUANG Liang, et al. Waterlogging simulation and runoff analysis of urban rainstorm for Nanjing [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017,(9):179-185. (in Chinese))
- [2] 沈澄,颜廷柏,刘冬晴,等. 2008-2012 年南京短时强降水特征分析[J].

气象与环境学报, 2015,31(1):28-33. (SHEN Cheng, YAN Tingbai, LIU Dongqing, et al. Characteristics of short-time heavy precipitation from 2008 to 2012 in Nanjing [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015,31(1):28-33. (in Chinese))

- [3] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017,28(6):820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science, 2017,28(6):820-828. (in Chinese))
- [4] 孙燕,朱伟军. 江苏省梅汛期暴雨特征及其对长江下游水位的影响[J]. 地理科学, 2013,33(2):238-243. (SUN Yan, ZHU Weijun. Rainstorm characteristics during Meiyu period in Jiangsu and its effect on water levels of lower reaches of the Changjiang River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013,33(2):238-243. (in Chinese))
- [5] 陈圣稜,尹东屏,李玉涛,等. 南京地区城郊降雨差异特征分析[J]. 气象与环境学报, 2016,32(6):27-42. (CHEN Shengjie, YIN Dongping, LI Yutao, et al. Analysis of differences of rainfall between urban and rural regions in Nanjing [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016,32(6):27-33. (in Chinese))
- [6] 沈红霞,杜付然,江海涛,等. 南京主城区设计暴雨计算研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017,(6):74-78. (SHEN Hongxia, DU Furan, JIANG Haitao, et al. Study on design rainstorm in Nanjing main urban area [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017,(6):74-78. (in Chinese))
- [7] 毛宇清,吴海英,裴海瑛,等. 近 50a 南京夏季降水的气候特征[J]. 气象科学, 2012,32 (6):646-652. (MAO Yuqing, WU Haiying, PEI Haiying, et al. Climate features of summer rainfall in Nanjing during recent 50a [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2012,32(6):646-652. (in Chinese))

- [8] 王啸华,郑媛媛,徐芬,等. 2011 年江苏南部两场大暴雨对比分析[J]. 气象科学, 2015,35(4):497-505. (WANG Xiaohua, ZHENG Yuanyuan, XU Fen, et al. Comparative analysis on two torrential rains in southern Jiangsu of 2011[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015,35(4):497-505. (in Chinese))
- [9] 王宏伟,方娟. 一次梅雨期台风远距离暴雨的分析研究[J]. 气象科学, 2014,34(6):601-611. (WANG Hongwei, FANG Juan. Analysis on a rainstorm related to remote typhoon during Meiyu period [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014,34(6):601-611. (in Chinese))
- [10] 刘梅,王磊,陈圣劼,等. 江苏梅汛期不同天气背景水汽特征量分析[J]. 资源科学, 2017,39(11):2141-2152. (LIU Mei, WANG Lei, CHEN Shengjie, et al. Moisture characteristics analysis of different weather backgrounds in plum flood season in Jiangsu [J]. Resources Science, 2017,39(11):2141-2152. (in Chinese))
- [11] 胡茂川,张兴奇. 南京市内涝灾害成因分析[J]. 重庆交通大学学报(社会科学版), 2011,11(3):28-30. (HU Maochuan, ZHANG Xingqi. Analysis of causes of waterlogging disasters in Nanjing City [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2011,11(3):28-30. (in Chinese))
- [12] 翁莉,马林,徐双凤. 城市暴雨灾害风险评估及防御对策研究——以江苏省南京市为例[J]. 灾害学, 2015,(1):130-134. (WENG Li, MA Lin, XU Shuangfeng. The urban rainstorm disaster risk assessment and defensive countermeasure - a case study of Nanjing of Jiangsu province [J]. Journal of Catastrophology, 2015,30(1):130-134. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 林孝松,郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学, 2001,16(2): 87-92. (LIN Xiaosong, GUO Yue. A study on coupling relation between landslide and rainfall [J]. Journal of catastrophology, 2001,16(2):87-92. (in Chinese))
- [15] 张社荣,谭尧升,王超,等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(a2):4102-4112. (ZHANG Sherong, TAN Yaosheng, WANG Chao, et al. Influence of heavy rainfall characteristics on saturated-unsaturated slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(a2): 4102-4112. (in Chinese))
- [16] 高佳琦,沈天琦,朱晓晨. 基于 GIS 的南京主城区暴雨内涝灾害脆弱性研究[J]. 湖北农业科学, 2015,54(12):2891-2896. (GAO Jiaqi, SHEN Tianqi, ZHU Xiaochen. Study of the vulnerability of Nanjing City rainstorm waterlogging disaster based on GIS [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015,54(12): 2891-2896. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 王彬雁,赵琳娜,巩远发,等. 北京降雨过程分型特征及短历时降雨重现期研究[J]. 暴雨灾害, 2015,34(4):302-308. (WANG Binyan, ZHAO Linna, GONG Yuanfa, et al. Characteristics of temporal pattern and return period of short-duration rainfall at Beijing observatory [J]. Torrential Rain and Disasters, 2015,34(4):302-308. (in Chinese))
- [19] 戴有学,王振华,戴临栋,等. 芝加哥雨型法在短历时暴雨雨型设计中的应用[J]. 干旱气象, 2017,35(6):1061-1069. (DAI Youxue, WANG Zhenhua, DAI Lindong, et al. Application of Chicago hyetograph method in design of short duration rainstorm pattern [J]. Journal of Arid Meteorology, 2017,35(6):1061-1069. (in Chinese))

Pattern Characteristics of Short Duration Rainstorms in Nanjing City over Recent 25 Years

SUN Zhouliang^{1,2,3}, BAO Zhenxin^{1,2}, SHU Zhangkang^{1,2}, LIU Ji⁴, LIU Yanli^{1,2}, WANG Guoqing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. College of Hydraulic and Environment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Based on the rainfall data at 7 rainfall stations in Nanjing City during 1992-2016, this paper extracted the rainstorm samples in the durations of 30minutes, 60minutes, 90minutes, 120minutes, 150minutes and 180minutes. Besides, the annual rainstorm frequencies were collected and the spatial difference was compared. Moreover, the patterns of rainstorm samples were investigated based on the rainfall peak quantity and rainfall peak coefficients by using the fuzzy recognition method. Then, the rainstorm pattern difference was compared between the urban and suburban areas. The results show that the the rainstorm frequency increased in the recent 25 years. The temporal distribution of rainstorms tends to concentrate in a short duration. The rainstorms of pattern No.I and No.IV occur more frequently than the other patterns, and the spatial variation of rainfall pattern is little. The single peak rainstorm accounts for about 38.6%-70.2% of rainstorms. The spatial distribution of all duration rainstorm is similar. The frequency of rainstorms is higher in urban areas, and the probability of continuous rainstorms is greater in the future. The rainstorm peaks in the suburban areas appear earlier than that in the urban areas.

Key words: short duration rainstorm; fuzzy recognition method; rainstorm pattern; rainfall peak coefficient