

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.007

镇江市降雨场次划分与暴雨特性分析

皋云¹,李琼芳^{1,2},周正模¹,杜尧¹,和鹏飞¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098;

2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心,江苏南京 210098)

摘要:为划分镇江市降雨场次和分析暴雨特性,基于丹徒站1981—2016年汛期5—10月的逐分钟降雨资料,确定了降雨间隔时间,筛选了暴雨场次,分析了汛期各月暴雨次数和暴雨量的变化特性,解析了不同历时和不同强度暴雨的演变规律。结果表明:镇江市合理的降雨间隔时间为2 h;汛期总暴雨次数呈略微上升的趋势,总暴雨量以每10年43.4 mm的速度增加;汛期暴雨主要集中在6—8月,其暴雨次数占汛期总暴雨次数的73.0%,其暴雨量占汛期总暴雨量的73.5%;7月和8月的暴雨量及其对总降雨的贡献率呈增加趋势,其他月份呈减少趋势,暴雨集中度增强;不同历时的暴雨中,一般暴雨占比最大,特短、短暴雨次数增长趋势显著,且特短暴雨的强度呈增加趋势;不同强度的暴雨中,弱暴雨占比最大,中、强暴雨次数均有不同程度的增长。

关键词:暴雨特性;降雨场次划分;暴雨历时;暴雨强度;镇江市

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0043-07

Division of rainfall events and analysis of rainstorm characteristics in Zhenjiang City // GAO Yun¹, LI Qiongfang^{1,2}, ZHOU Zhengmo¹, DU Yao¹, HE Pengfei¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center of World Water Valley and Water Ecological Civilization, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to divide rainfall events and analyse rainstorm characteristics in Zhenjiang City, based on the minute rainfall data of Dantu Station from May to October in flood season from 1981 to 2016, the rainfall interval time was determined, the rainstorm frequency and rainstorm quantity variation characteristics of each month in flood season were analyzed, and the evolution law of rainstorm with different duration and intensity was analyzed. The results show that the reasonable rainfall interval of Zhenjiang City is 2 h. The total number of rainstorms in flood season showed a slight upward trend, and the total storm rainfall increased at the speed of 43.4 mm every 10 years. The rainstorm in flood season was mainly concentrated in June to August, and the rainstorm frequency accounts for 73.0% of the total rainstorm frequency in the flood season, and the rainstorm amount accounted for 73.5% of the total storm rainfall in the flood season. In July and August, the rainstorm and its contribution rate to the total rainfall showed an increasing trend, while in other months it showed a decreasing trend, and the rainstorm concentration increased. Among the rainstorms with different durations, the general rainstorm accounted for the largest proportion, and the number of extreme short and short rainstorms increased significantly, and the intensity of extreme short rainstorms showed an increasing trend. Among the rainstorms with different intensities, the weak rainstorm accounted for the largest proportion, and the number of moderate and heavy rainstorms increased in different degrees.

Key words: rainstorm characteristics; division of rainfall events; rainstorm duration; rainstorm intensify; Zhenjiang City

快速城市化改变了局部气候,城市热岛效应、阻碍效应、凝结核效应显著改变了城区降雨模式与分布^[1],暴雨频次和短历时暴雨强度不断增加,城市

暴雨洪涝风险增大,危及城市居民生命和财产安全,严重制约了城市经济社会有序发展^[2-3]。降雨场次的划分是暴雨特性研究的基础,对于精准地解析暴

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51879069)

作者简介:皋云(1995—),女,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: 14597896781@qq.com

通信作者:李琼芳(1966—),女,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: qfli@hhu.edu.cn

雨特性至关重要。然而,目前尚未形成统一的降雨场次划分方法。李俊奇等^[4]将每日降雨(20:00至次日20:00)作为一场降雨,但该划分方法得到的场次降雨与实际情况存在较大偏差;Adams等^[5]在分析降雨间隔时间与降雨自相关系数关系的基础上,确定了最小降雨间隔时间,并提出降雨间隔在1~6 h之内时实际应用性较强,但亟须验证其在中国高强度城市化地区的适用性。由于不同城市在城市规模、城市化程度、人类活动干扰程度、地形地貌及气候条件等方面均有较大差异,在气候变化和人类活动共同作用下其暴雨特性变化规律也不尽相同,因此,一些学者针对不同城市开展了暴雨特性研究^[6-8]。张洁祥等^[9]分析了上海市年代际降水、年降水、汛期与非汛期降水的变化和周期变化特征,但未对不同历时降雨的变化特征进行研究;李政等^[10]解析了伊宁市的强降雨特征以及对洪灾的影响。在江苏省,南京、无锡、常州已开展了关于城市暴雨特性的研究^[11-13],然而,镇江市作为第一批国家海绵试点城市,对其暴雨变化规律的精细化分析却鲜见报道。城市雨洪管理应以防涝达标为重点^[14],清楚地认识城市暴雨规律既是科学推求设计暴雨、合理规划与设计城市排水防涝系统的前提,也是有效制定海绵城市设计指标以及评估不同降雨条件下海绵城市建设效果的重要依据,对建立完善的城市排水防涝系统、提高城市防灾减灾能力、保障人民群众生命财产安全也至关重要^[15-16]。因此,亟须在科学合理划分镇江市场次暴雨的基础上,对其暴雨变化规律进行深入细致的分析。

1 研究区概况

镇江市(北纬31°37'~32°19'、东经118°58'~119°58')位于江苏省南部,长江下游南岸,长江和京杭大运河在此交汇。镇江市属暖温带向北亚热带过渡的季风气候,气候湿润温和,雨量充沛,雨热同期,全年无霜期239 d,降雨多集中在5—10月,多年平均降水量1 106.2 mm,汛期平均雨量达781.3 mm。随着镇江城市化建设进程加快,下垫面不透水面积增加,镇江市热岛效应明显,降雨增多。特殊的地理位置、快速的城市化进程与汛期的集中降水使得镇江市区面临外洪与内涝的夹击,不断出现严重的暴雨洪涝灾害^[17]。

2 研究方法与数据

降雨具有持续性和间断性的特点,长时间序列的降雨数据可划分为多场独立的场次降雨。对于某一场确定的降雨序列,不同的降雨场次划分对应着

不同的降雨场次和降水量。工程实践中,海绵城市建设的降雨总量控制目标、城市雨洪模型的降水量过程线模拟、防洪工程及城市管网系统的设计标准均与场次降雨数据密切相关。因此,合理地确定降雨间隔时间、划分降雨场次尤为重要,但因最小降雨间隔 T 及无雨标准需人为确定,划分结果受主观因素影响较大^[4]。在数据资料的时间分辨率达到小时降雨数据时,按照 T 进行场次划分更为合理^[18]。当两场雨的间隔时间 $t \geq T$ 时,视为2场降雨;当 $t < T$ 时,视为1场降雨(图1)。Adams等^[5]提出降雨数据存在自相关性,可利用自相关分析确定 T :

$$r_k = \frac{\sum (y_i - \bar{y})(y_{i-T} - \bar{y})}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

式中: y_i 为 t 时刻观察到的降水量,mm; $\bar{y}$ 为降水量 y_i 的均值,mm; T 为降雨间隔时间,h; r_k 为自相关系数。

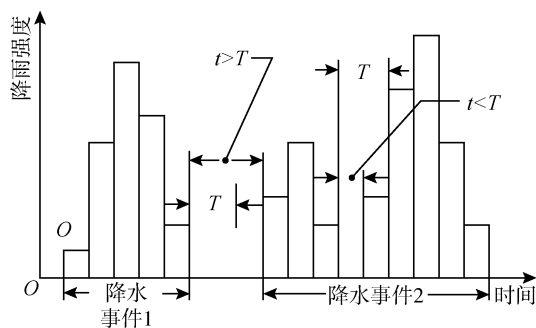


图1 基于降雨时间间隔的降雨场次划分示意图
Fig.1 Schematic diagram of rainfall event division based on rainfall time interval

通过对降雨数据进行自相关分析,得到自相关系数与间隔时间的关系(图2),自相关系数在0~0.3之间可认为数据之间相关性较弱,一定间隔时间后,降雨数据自相关系数显著下降并且接近0,可选择此间隔时间作为最小降雨间隔。该划分方法根据研究区实测的降雨数据确定间隔时间,减少了由于主观因素造成的误差,更符合研究区实际的降雨过程,得到的降雨历时、降水量、降雨强度更具代表性。

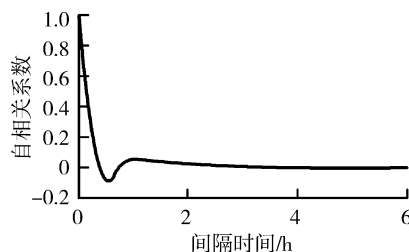


图2 自相关分析
Fig.2 Autocorrelation analysis

为揭示镇江市暴雨变化规律,在选用长系列降雨资料时,既要考虑降雨站点的区域代表性,也要考虑历史数据连续性和一致性要求,还要考虑资料系

列至少 30 年以上。鉴于镇江站于 1997 年停测后直接移用丹徒站资料,而丹徒站是除镇江站之外最具代表性的观测站点,本文选用丹徒站 1981—2016 年降雨资料进行镇江市暴雨变化规律研究。基于镇江市丹徒站汛期 5—10 月逐分钟降雨资料,采用自相关分析法^[5]确定降雨间隔时间,划分降雨场次,以我国气象上规定的 12 h 降水量超过 30 mm 为标准筛选暴雨场次。进而统计分析汛期各月暴雨场次、各月暴雨量和汛期总暴雨次数、总暴雨量。以月为时间尺度研究汛期暴雨场次和暴雨量的分布规律,基于线性倾向估计、M-K 法^[15]解析汛期及各月暴雨次数和暴雨量的年际变化特性,并分析各月暴雨量对汛期总降水量的贡献。依据暴雨历时小于 6 h、6~11 h、12~23 h、24~30 h、大于 30 h 将暴雨划分为特短暴雨、短暴雨、一般暴雨、长暴雨、特长暴雨;依据场次总雨量为 30~60 mm、60~100 mm、大于 100 mm 将暴雨分为弱暴雨、中暴雨、强暴雨^[16]。采用数理统计法分析汛期各月不同历时和不同强度暴雨次数的分布情况,探明汛期不同历时和不同强度的暴雨次数的变化趋势、年际及年代际变化特征。针对选取的汛期特短暴雨和短暴雨,分析不同年代特短暴雨、短暴雨的强度变化规律,揭示短历时暴雨的频次和强度演变特征。

3 结果与分析

3.1 镇江市暴雨场次划分结果

基于镇江市丹徒站 1981—2016 年汛期 5—10 月降雨资料进行自相关分析(图 3)。由图 3 可见,随着降雨间隔时间的增大,自相关系数逐渐趋近于 0,自相关系数小于 0.2 的合理降雨间隔为 2~10 h,因此将 2 h 作为降雨间隔时间,这与建设部颁布的《给水排水设计手册》中推荐的以 2 h 作为降雨间隔时间的标准一致^[4],验证了该方法在高度城市化的镇江的适用性。以 12 h 降水量超过 30 mm 为标准筛选暴雨场次,对降雨场次进行筛选,得到 1981—2016 年汛期 5—10 月暴雨共 252 次。

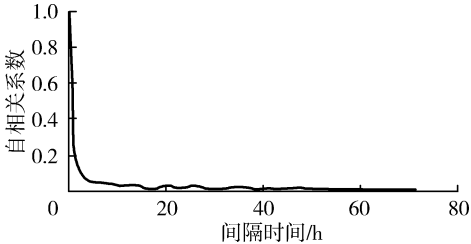


图 3 镇江市降雨自相关分析

Fig.3 Autocorrelation analysis of rainfall in Zhenjiang City

3.2 汛期各月暴雨次数及暴雨量变化规律

图 4 为镇江市 1981—2016 年汛期总暴雨次数

和总暴雨量变化。由图 4 可见,镇江市 1981—2016 年汛期共出现暴雨 252 次,年平均暴雨次数为 7 次。镇江市的汛期年暴雨次数和汛期年暴雨量年际变化大,汛期年暴雨次数呈略微增长的趋势,汛期年暴雨量以每 10 年 43.4 mm 的速度增加,这可能是气候变暖与城市化共同影响的结果^[19]。1991 年华东水灾,1998 年长江全流域洪水,2009 年盛夏极端异常气候造成镇江市低温多雨,2016 年受厄尔尼诺现象导致强降雨频发,这 4 年均发生 10 次以上暴雨。1993 年、1994 年、1997 年、2006 年、2013 年汛期均发生持续 1~7 个月的一般干旱或重旱事件^[20],这 5 年暴雨次数均在 1~3 次。

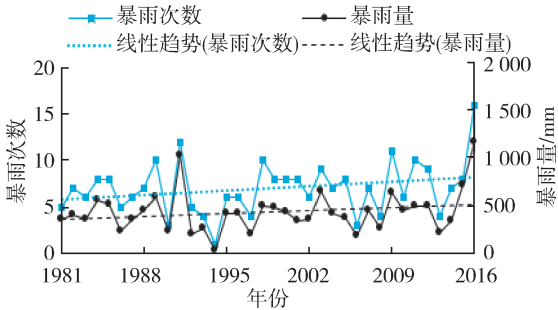


图 4 镇江市 1981—2016 年汛期总暴雨次数和总暴雨量变化
Fig.4 Variation of total number of rainstorms and rainfall amount in flood season of Zhenjiang City from 1981 to 2016

图 5 为镇江市 1981—2016 年汛期总暴雨次数和总暴雨量的各月分布。由图 5 可见,镇江市汛期暴雨分布不均性显著,夏季多发性明显,主要集中在 6—8 月。7 月出现最多,为 72 次,占汛期总暴雨次数的 28.6%,7 月暴雨量占汛期总暴雨量的 29.4%;6 月次之,发生 64 次暴雨,占汛期总暴雨次数的 25%,6 月暴雨量占汛期总暴雨的 27.1%;8 月略低于 6 月,发生 49 次暴雨,占总场次的 19.4%,8 月暴雨量占汛期总暴雨量的 17.0%;5 月和 10 月暴雨次数较少,仅占汛期总暴雨次数的 7.5% 和 6.3%,5 月和 10 月暴雨量分别占汛期暴雨量的 7.2% 和 5.4%。

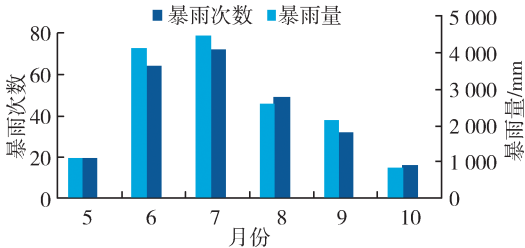


图 5 镇江市 1981—2016 年汛期总暴雨次数和总暴雨量各月分布

Fig.5 Monthly distribution of total number of rainstorms and rainfall amount in flood season of Zhenjiang City from 1981 to 2016

研究汛期多年月平均暴雨量以及月暴雨量对汛期总暴雨量贡献率并进行 M-K 检验(表 1)。5 月暴雨量 M-K 统计量绝对值大于 1.64,通过了置信度为 90%的显著性检验,表明 5 月暴雨量下降趋势显著;7 月暴雨量 M-K 统计量大于 1.96,通过了置信度为 95%的显著性检验,表明 7 月暴雨量上升趋势显著。月暴雨量贡献率 M-K 值中,5 月、7 月暴雨量对总暴雨量的贡献均通过了置信度为 95%的显著性检验,表明 5 月形成暴雨的概率低,7 月形成暴雨的概率较高。7 月与 8 月暴雨量增多,对汛期总暴雨量贡献增大,其他月份暴雨量减少,对暴雨贡献减小,暴雨集中度增强,这可能是由东亚季风以及西北太平洋台风登陆的影响造成的^[21]。因此,7 月与 8 月的防汛任务较为艰巨,这与林恒等^[22]研究表明长江三角洲地区春秋季节各强度降水减少,夏季降水增多,且夏季降雨强度较大的结论是一致的。

表 1 汛期不同月份暴雨量、暴雨量贡献率 M-K 统计量及变化趋势

Table 1 Variation trend and M-K statistics of rainstorm amount and contribution rate of rainstorm amount in different months of flood season					
月份	多年月平均暴雨量/mm	月暴雨量 M-K 统计量	月暴雨量变化趋势	月暴雨量贡献率 M-K 统计量	月暴雨量贡献率变化趋势
5	30.18	-1.88	显著减少	-2.40	显著下降
6	114.41	-0.29	不明显	-0.86	不明显
7	123.85	2.19	显著增多	2.22	显著上升
8	71.49	1.06	略微增多	0.59	不明显
9	58.97	-1.05	略微减少	-0.73	不明显
10	22.54	-0.54	不明显	-0.48	不明显

3.3 不同历时暴雨变化规律

图 6 统计了镇江市汛期各月特短暴雨、短暴雨、一般暴雨、长暴雨、特长暴雨次数占比。镇江市各历时暴雨中,一般暴雨出现次数最多,为 83 次,占汛期总暴雨次数的 32.9%;特短和短暴雨次之,分别为 55 次和 51 次,占比 21.8% 和 20.2%;长暴雨和特长暴雨出现次数最少,分别为 32 次和 31 次,仅占 12.7%

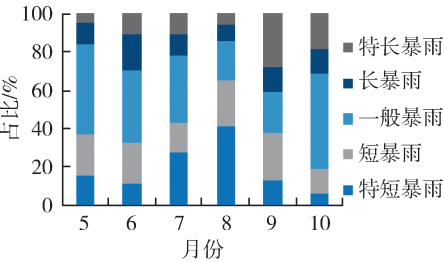


图 6 镇江市 1981—2016 汛期各月不同历时暴雨次数占比 Fig. 6 Proportion of rainstorm number with different duration in each month of flood season from 1981 to 2016 in Zhenjiang City

和 12.3%。由图 6 可知,进入汛期后,特短暴雨和短暴雨出现次数逐渐增多,暴雨次数占比增大,8 月达到峰值后次数开始减少,一般暴雨呈汛期频发的特点,长暴雨在汛期占比都较小,特长暴雨仅在 9 月、10 月出现次数较多。5—7 月,一般暴雨次数占比最大,8 月,特短暴雨、短暴雨次数占比最大,9—10 月,一般暴雨次数占比最大。

图 7 统计了不同历时暴雨次数的 5 年滑动平均值。由图 7 可知,镇江市暴雨以短暴雨和一般暴雨为主,1981—1996 年,特短暴雨和短暴雨 5 年滑动平均次数略微减少,1996 年后,短暴雨和特短暴雨平均次数增长趋势显著;一般暴雨平均次数变化趋势显著,1981—2003 年,一般暴雨平均次数略微增长,2003 年后呈逐渐下降趋势;1981—2016 年,长暴雨次数 5 年滑动平均值都在 1 次左右;特长暴雨平均次数总体呈下降趋势,2003—2015 年,仅出现 2 次特长暴雨。

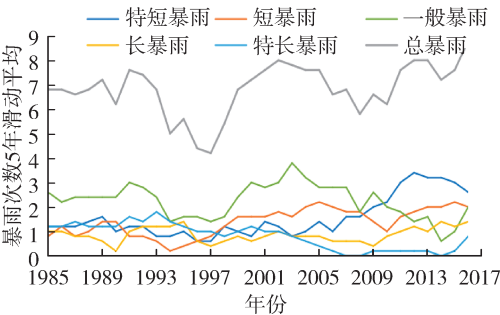


图 7 镇江市 1981—2016 汛期不同历时暴雨次数 5 年滑动平均变化 Fig. 7 Five-year moving average variation of rainstorm number with different duration in flood season from 1981 to 2016 in Zhenjiang City

对各历时暴雨次数进行 M-K 检验(表 2),特短暴雨次数通过了置信度为 95% 显著性检验,短暴雨次数的 M-K 统计量大于 2.58,通过了置信度为 99%的显著性检验,说明特短和短暴雨次数增加趋势显著。短历时暴雨的增多可能与太阳辐射加热或城市热岛效应密切相关^[23]。一般暴雨次数 M-K 统计量小于 0,但绝对值未超过 1.64,说明一般暴雨次数呈减少趋势,但趋势不明显;长暴雨次数 M-K 统

表 2 汛期不同历时暴雨次数的变化趋势

Table 2 Variation trend of rainstorm number with different duration in flood season		
暴雨类型	暴雨次数 M-K 统计量	暴雨次数变化趋势
特短暴雨	2.13	显著增多
短暴雨	2.81	显著增多
一般暴雨	-1.04	略微减少
长暴雨	1.32	略微增多
特长暴雨	-1.52	略微减少

计量大于0,但未通过显著性检验,说明长暴雨次数呈增长趋势,但趋势不明显;特长暴雨次数 M-K 统计量小于0,表明特长暴雨次数呈减少趋势,但减少趋势不显著。

图 8 为不同年代不同历时暴雨次数占比。由图 8 可见,1981—2000 年,特短暴雨、短暴雨占比略微减小;2010 年后,特短暴雨和短暴雨占比显著增大;1981—2010 年,一般暴雨、特长暴雨呈现占比减小的趋势,长暴雨占比略微增大。2010 年前,均为一般暴雨占比最大,2010 年后,特短暴雨占比最大。

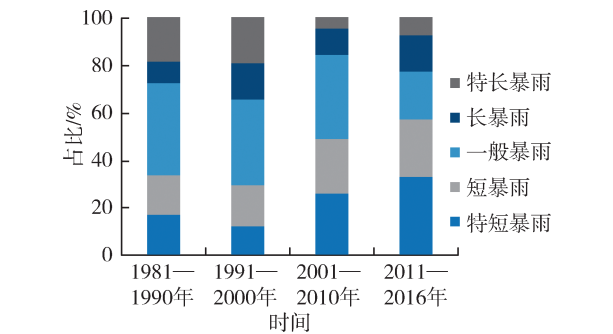


图 8 汛期不同年代的不同历时暴雨次数占比
Fig. 8 Proportion of rainstorm number with different duration in different decades in flood season

3.4 不同强度暴雨变化规律

图 9 统计了镇江市汛期弱暴雨、中暴雨、强暴雨次数的占比。由图 9 可见,镇江市各强度暴雨中,弱暴雨出现次数最多,为 152 次,占汛期总暴雨次数的 60.3%;中暴雨次之,为 73 次,占到 29.0%;强暴雨出现次数最少,为 27 次,仅占 10.7%。由图 9 可得,弱暴雨 8 月占比最多,中暴雨除在 7—8 月占比比较小,其他月份占比相近,强暴雨主要集中在 7 月,占汛期总强暴雨次数的 48.1%。

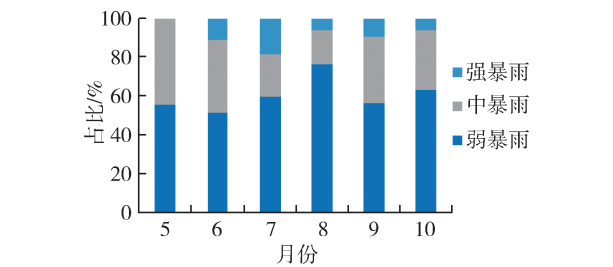


图 9 镇江市 1981—2016 汛期各月不同强度暴雨次数占比
Fig. 9 Proportion of monthly rainstorm number with different intensify in flood season from 1981 to 2016 in Zhenjiang City

图 10 为不同强度暴雨次数的 5 年滑动平均值。由图 10 可见,1981—1996 年,弱暴雨 5 年滑动平均次数呈现出减小的趋势,1997 年后暴雨平均次数逐渐增多;中暴雨平均次数变化幅度较小,5 年滑动平均值均在 2 次左右;1981—1991 年,强暴雨平均次

数略微增长,1992—2006 年,仅发生 4 次强暴雨,2007 年后,强暴雨平均次数呈上升趋势。

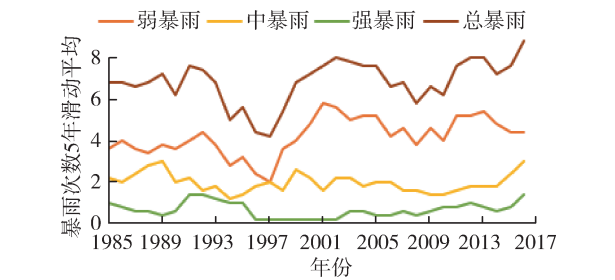


图 10 镇江市 1981—2016 汛期不同强度暴雨次数 5 年滑动平均变化
Fig. 10 Five-year moving average variation of rainstorm number with different intensify in flood season from 1981 to 2016 in Zhenjiang City

对各强度暴雨次数进行 M-K 检验(表 3),由表 3 可见,弱暴雨、中暴雨和强暴雨的暴雨次数的 M-K 统计量均大于 0,均未通过显著性检验,说明各强度暴雨次数均呈增多趋势,但趋势均不明显。

表 3 汛期不同强度暴雨次数的变化趋势
Table 3 Variation trend of rainstorm number with different intensify in flood season

暴雨类型	暴雨次数 M-K 统计量	暴雨次数变化趋势
弱暴雨	1.48	略微增多
中暴雨	0.22	不明显
强暴雨	0.05	不明显

图 11 为不同年代不同历时暴雨次数的占比。由图 11 可见,1981—2000 年,弱暴雨占比小幅度增大,中暴雨、强暴雨占比小幅度减小,2010 年后,弱暴雨占比减小,中暴雨、强暴雨占比略微增大。

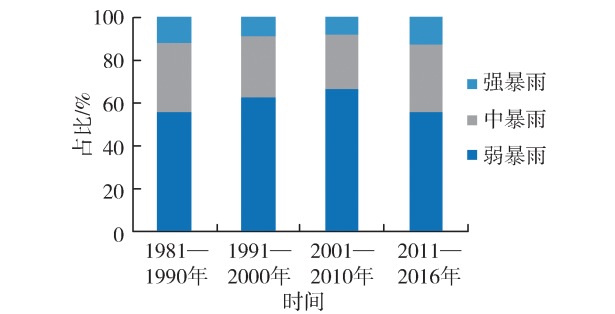


图 11 汛期不同强度暴雨次数占比的不同年代分布
Fig. 11 Proportion of rainstorm number with different intensify in different decades in flood season

3.5 特短暴雨与短暴雨的强度变化特征

作为海绵城市试点城市的镇江,近年来内涝灾害频发,短历时、高强度的暴雨是造成城市内涝的重要原因。因此,着重对特短暴雨和短暴雨强度进行分析,统计了不同年代特短暴雨、短暴雨中的弱暴雨、中暴雨、强暴雨次数及其占比,结果见图 12、图 13。由图 12、图 13 可见,各个年代特短暴雨和短暴

雨均以弱暴雨为主,中暴雨次之,1981—2016年,仅发生1次短历时强暴雨;特短暴雨中,1981—1990年,弱暴雨和中暴雨次数减少,但特短暴雨中的弱暴雨占比增大,中暴雨占比减小,2000年后,弱暴雨和中暴雨次数呈增多趋势,特短暴雨中的弱暴雨占比呈减小趋势,中暴雨占比呈增大趋势;短暴雨中,1981—1990年未发生短历时的中暴雨,1991—2000年,弱暴雨次数减少,中暴雨次数增多,弱暴雨占比减小,中暴雨占比增长显著,2000年后,短暴雨中的弱暴雨次数呈增长趋势,中暴雨次数变化不明显,因此,弱暴雨占比增大,中暴雨占比减小。从不同年代特短暴雨、短暴雨中弱暴雨、中暴雨、强暴雨的占比来看,特短暴雨的强度呈增强的趋势,短暴雨的强度略微减弱,但2010年后,出现了1981—2016年间唯一的1次短历时强暴雨。

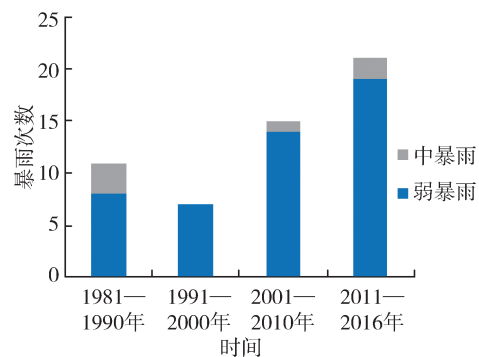


图 12 汛期不同强度的特短暴雨次数分布

Fig. 12 Distribution of extreme short rainstorm number with different intensify in flood season

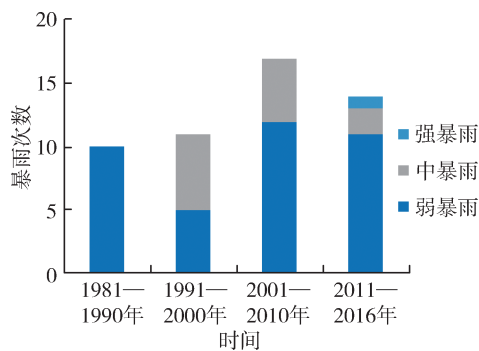


图 13 汛期不同强度的短暴雨次数分布

Fig. 13 Distribution of short rainstorm number with different intensify in flood season

4 结 论

- a. 镇江市合理的降雨场次划分间隔时间为2 h,与建设部颁布的《给水排水设计手册》中推荐的以2 h作为降雨间隔时间的标准一致。
- b. 镇江市汛期暴雨次数、暴雨量均呈增加趋势。6—8月暴雨次数、暴雨量远高于其他月份,分

别占汛期总暴雨的73.0%和73.5%。7月和8月的暴雨量及其对总降雨的贡献率呈增加趋势,其他月份呈减少趋势,暴雨集中度增强。

- c. 镇江市不同历时的暴雨中,一般暴雨占比最大,占汛期总暴雨次数的32.9%。特短、短暴雨次数增长趋势显著,分别通过了95%和99%的显著性检验,且特短暴雨的强度也呈增强趋势。
- d. 镇江市不同强度的暴雨中,弱暴雨占比最大,占汛期总暴雨次数的60.3%,弱、中、强暴雨次数均有不同程度的增长,但没有通过显著性检验。

参考文献:

[1] 姜昀,张升堂. 城市化对水文循环的影响及应对措施 [J]. 水科学与工程 技术,2010 (6) : 30-32. (JIANG Yun, ZHANG Shengtang. Influence of urbanization on hydrologic cycle and countermeasures [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2010 (6) : 30-32. (in Chinese))

[2] 林建,杨贵名. 近 30 年中国暴雨时空特征分析 [J]. 气象,2014,40 (7) : 816-826. (LIN Jian, YANG Guiming. Spatio-temporal characteristics of rainstorm in China during 1981-2010 [J]. Meteorological Monthly, 2014, 40 (7) : 816-826 (in Chinese))

[3] 李海宏,吴吉东. 2007—2016 年上海市暴雨特征及其与内涝灾情关系分析 [J]. 自然资源学报,2018, 33 (12) : 2136-2148. (LI Haihong, WU Jidong. Rainstorm characteristics and its relationship with waterlogging disaster in Shanghai during 2007-2016 [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33 (12) : 2136-2148. (in Chinese))

[4] 李俊奇,林翔,王文亮,等. 降雨间隔对雨水年径流总量控制率的影响规律探析 [J]. 中国给水排水,2019, 35 (9) : 120-126. (LI Junqi, LIN Xiang, WANG Wenliang, et al. Analysis of influence of rainfall interval on volume capture ratio of annual rainfall [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (9) : 120-126. (in Chinese))

[5] ADAMS B J, PAPA F. Urban stormwater management planning with analytical probabilistic models [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 28 (3) : 545.

[6] 关铁生,姚惠明,许钦,等. 辽河区极端暴雨特性及其天气成因分析 [J]. 水利水运工程学报,2015 (2) : 18-25. (GUAN Tiesheng, YAO Huiming, XU Qin, et al. Characteristics and weather causes of extreme rainstorms in Liaohe River region [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015 (2) : 18-25. (in Chinese))

[7] 张亮亮,曹永强,朱明明. 近 50 年辽宁省大雨与暴雨时空变化特征分析 [J]. 水利水运工程学报,2017 (1) : 49-56. (ZHANG Liangliang, CAO Yongqiang, ZHU Mingming. Spatiotemporal variation characteristics of heavy

- rainfall and rainstorm in Liaoning province over past 50 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(1): 49-56. (in Chinese))
- [8] 张晓婧. 北京市暴雨特性及对设计暴雨时程的影响分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [9] 张洁祥, 张雨凤, 李琼芳, 等. 1971—2010 年上海市降水变化特征分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(4): 47-52. (ZHANG Jiexiang, ZHANG Yufeng, LI Qiongfang, et al. Analysis of precipitation variation characteristics in Shanghai City over period from 1971 to 2010[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(4): 47-52. (in Chinese))
- [10] 李政, 张文太, 轩俊伟. 伊宁市 1956—2015 年强降雨特征及对洪灾的影响[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 49-55. (LI Zheng, ZHANG Wentai, XUAN Junwei. Characteristics of heavy rainfall in Yining City from 1956 to 2015 and its impact on flood[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 49-55. (in Chinese))
- [11] 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, 28(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 and Water Engineering, 2017, 28(6): 74-78. (in Chinese))
- [12] 秦建国, 洪国喜, 张涛, 等. 无锡站年际降雨趋势、特征与预报分析[J]. 水文, 2013, 33(4): 92-96. (QIN Jianguo, HONG Guoxi, ZHANG Tao, et al. Trend, characteristics and forecasting analysis of inter-annual rainfall at Wuxi Station[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(4): 92-96. (in Chinese))
- [13] 胡尊乐, 张悦, 李丹, 等. 基于不同分布曲线的常州市暴雨组合概率[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 68-72. (HU Zunle, ZHANG Yue, LI Dan, et al. Probability of rainstorm combinations in Changzhou City based on different distribution curves[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 68-72. (in Chinese))
- [14] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 13-15. (in Chinese))
- [15] 高绍凤. 应用气候学[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [16] 贺芳芳, 赵兵科. 近 30 年上海地区暴雨的气候变化特征[J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1260-1267. (HE Fangfang, ZHAO Bingke. The characteristics of climate change of torrential rains in Shanghai region in recent 30 years[J]. Advance in Earth Sciences, 2009, 24(11): 1260-1267. (in Chinese))
- [17] 胡坚, 赵宝康, 刘小梅, 等. 镇江市主城区排水能力与内涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2015, 31(1): 100-103. (HU Jian, ZHAO Baokang, LIU Xiaomei, et al. Assessment of drainage capacity and waterlogging risk in central zone of Zhenjiang City[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(1): 100-103. (in Chinese))
- [18] 张宇航, 杨默远, 潘兴瑶, 等. 降雨场次划分方法对降雨控制率的影响分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(13): 122-127. (ZHANG Yuhang, YANG Moyuan, PAN Xingyao, et al. Influence of rainfall division method on capture ratio of rainfall[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(13): 122-127 (in Chinese))
- [19] DONAT M G, LOWRY A L, ALEXANDER L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J]. Natural Climate Change, 2016, 6: 508-513.
- [20] 孔启亮, 李建国, 周勃, 等. 镇江 2009 年盛夏极端异常气候分析及 ECMWF 模式检验[J]. 气象科学, 2010, 30(6): 862-867. (KONG Qiliang, LI Jianguo, ZHOU Qing, et al. The ECMWF model test and the analysis of extreme abnormal climate in the summer of 2009 in Zhenjiang[J]. Journal Article, 2010, 30(6): 862-867. (in Chinese))
- [21] 卞洁, 何金海, 李双林. 近 50 年来长江中下游汛期暴雨变化特征[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(1): 68-80. (BIAN Jie, HE Jinhai, LI Shuanglin. Heavy rain variation characteristics in flood seasons in the middle and lower reaches of Yangtze River in the last 50 years[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(1): 68-80. (in Chinese))
- [22] 林恒, 孙鉴泞. 城市化对长江三角洲区域降水的可能影响[J]. 南京大学学报(自然科学), 2014, 50(6): 792-799. (LIN Heng, SUN Jianning. Possible effects of urbanization on regional precipitation over Yangtze River Delta area[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014, 50(6): 792-799. (in Chinese))
- [23] 孔锋, 薛澜. 1961—2017 年中国不同长历时暴雨与总降雨事件的空间分异特征对比研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9): 2262-2277. (KONG Feng, XUE Lan. Comparative study on spatial differentiation characteristics of different long duration heavy rainfall and total rainfall events in China from 1961 to 2017[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(9): 2262-2277. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-11-15 编辑: 王 芳)

