

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.013

南京地区暴雨变化特性分析

杜尧¹, 陈启慧¹, 和鹏飞¹, 陈芸芸², 沈红霞¹, 李琼芳^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223005;
3. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心, 江苏 南京 210000)

摘要:选取南京地区7个雨量站长系列逐时降水资料,分析暴雨时空分布规律与变化特性,并解析暴雨雨型特征。结果表明:南京地区暴雨时空分布不均性显著,市区年暴雨量和暴雨次数多于郊区;不同历时年最大降雨量总体呈现增大趋势,且主城区增加趋势更显著;暴雨以一般暴雨、弱暴雨为主,但容易引起内涝的短历时、高强度的暴雨频次呈现增加趋势,且主城区相对郊区增加趋势更显著;主城区弱暴雨、中暴雨和强暴雨分别具有14年、8年和3年的丰枯变化周期,特短暴雨、短暴雨和一般暴雨也都具有3年左右的丰枯变化周期;雨型(历时12 h暴雨)以容易引起内涝的单峰Ⅲ型雨型为主,加大了城市内涝防治压力。

关键词:暴雨特性;暴雨雨型;M-K趋势检验;小波分析;南京地区

中图分类号:TV122;P458 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0089-06

Analysis of rainstorm variation characteristics in Nanjing region// DU Yao¹, CHEN Qihui¹, HE Pengfei¹, CHEN Yunyun², SHEN Hongxia¹, LI Qiongfang^{1,3} (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Huaishuxin River Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223005, China; 3. "World Water Valley" and Water Ecological Civilization Collaborative Innovation Center of Jiangsu Province, Nanjing 210000, China)

Abstract: The temporal and spatial distribution and variation characteristics and the rainstorm type of rainstorm were analyzed using long series hourly precipitation data of 7 precipitation stations in Nanjing region. The results show that the temporal and spatial distribution of rainstorm in Nanjing region is uneven, and the annual rainstorm amount and the number of rainstorm in urban area are more than that in suburban area. The annual maximum rainfall in different durations shows an increasing trend, and the increasing trend in the main urban area is more significant. The rainstorm mainly consists of general rainstorm and weak rainstorm, but the frequency of short duration and high intensity rainstorm which is easy to cause waterlogging shows an increasing trend, and the increasing trend of main urban area is more significant than that of suburban area. In the main urban area, weak rainstorm, medium rainstorm and heavy rainstorm have 14-, 8- and 3-year plentiful and withered circulation period, respectively. The extremely short rainstorm, short rainstorm and general rainstorm also have 3-year plentiful and withered circulation period. The rainstorm type (lasting for 12 hours) is the single peak type III rain, which is easy to cause waterlogging and increases the pressure of urban waterlogging control.

Key words: rainstorm characteristics; rainstorm type; Mann-Kendall trend test; wavelet analysis; Nanjing region

21世纪以来,受全球气候变化及城市化进程影响,我国城市暴雨频发,由此引发的内涝风险不断加剧^[1-5],严重影响了城市居民正常生产生活,在一定程度上制约了城市的可持续发展。因此,城市的暴雨变化特征受到相关学者和管理者的高度关注。李鹏程等^[6]采用北京、天津两个气象站近51年的日降水资料,剖析了两地区降水量的趋势性和周期性;张

洁祥等^[7]基于1971—2010年徐家汇站的日降雨资料,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;赵琳娜等^[8]采用模糊识别法对北京降雨过程进行了雨型划分,得到北京雨型特征;Chen等^[9]利用STRP和Huff RP法分析了广州市的降雨模式,对比了两种方法的优劣性;贺芳芳^[10]利用不同气象站30年降水资料,分析了

基金项目:国家自然科学基金(51879069)

作者简介:杜尧(1995—),男,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:1610697183@qq.com

通信作者:李琼芳,教授。E-mail:qfli@hhu.edu.cn

上海地区暴雨的气候变化特征及城市化对暴雨的影响;王琰等^[11-12]分析了近 64 年南京夏季降水峰期变化特征;沈澄等^[13]剖析了 2008—2012 年南京短时强降水特征;朱鑫君等^[14]分析了南京一次特大暴雨天气过程的中尺度特征。近些年南京市多次发生了导致严重内涝灾害的极端暴雨事件,进一步研究南京地区暴雨变化特性很有必要。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

南京市位于长江下游中部地区,属北亚热带湿润气候,四季分明,雨水充沛^[15],多年平均降雨 117 d,多年平均降雨量 1 106.5 mm。每年 6 月下旬到 7 月上旬为梅雨期,常发生暴雨、大暴雨。选取分布在南京不同行政区的 7 个雨量站点:南京站、东山站、晓桥站、江宁镇站、六合站、天生桥闸站和高淳站为研究对象,站点分布见图 1,其中南京站是主城区的代表站。

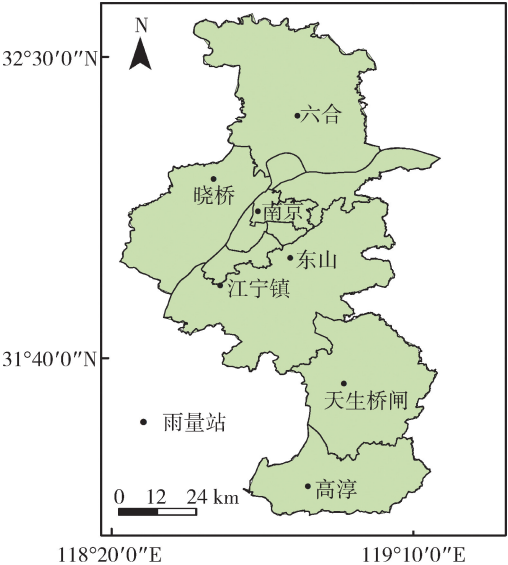


图 1 南京地区雨量站空间分布

1.2 研究方法

受中小尺度天气系统影响,南京地区降雨过程常在 12 h 以内,这种历时短、强度大的降雨对区域排涝和城市排水的影响更大,更容易引起城市内涝。依据我国气象规定,以连续 12 h 降雨超过 30 mm 为标准,滑动选取次暴雨过程,从滑动开始的时段到滑动结束的时段来计算此次暴雨的总历时。选用南京站 1975—2015 年以及东山站、晓桥站、江宁镇站、六合站、天生桥闸站和高淳站 1985—2015 年的逐时降水资料,依据雨量 30~59.9 mm 为弱暴雨、60~99.9 mm 为中暴雨、≥100 mm 为强暴雨的原则对暴雨强度进行划分。依据暴雨持续时间小于 6 h 为特短暴雨、6~11 h 为短暴雨、12~23 h 为一般暴雨、24~30 h 为长暴

雨、>30 h 为特长暴雨的原则对暴雨历时进行划分。运用 Mann-Kendall 趋势检验^[16]、小波分析^[17]、模糊识别法^[18]等统计方法进行分析。

2 南京地区暴雨特征变化规律分析

2.1 时空分布规律

2.1.1 暴雨时程分布规律

南京站 1975—2015 年 3—10 月多年平均暴雨次数分别为 1、3、26、62、63、54、33、2 次。1975—2015 年南京站暴雨次数共出现 244 次,汛期(6—9 月)与非汛期暴雨次数差异明显。暴雨主要集中在春末到秋末,6—8 月暴雨最多,总暴雨次数分别占全部暴雨的 25.4%、25.8% 和 22.1%;9 月和 5 月次之,占全部暴雨的 13.5% 和 10.7%;3 月、4 月和 10 月共出现了 6 场暴雨,11 月至次年 2 月没有出现暴雨。

图 2 为南京站 1975—2015 年暴雨次数的变化情况。可见,1975—2015 年南京城区年均暴雨次数波动较大,多年平均为 6 次左右,1975、1979、2015 年发生了 10 次以上暴雨,降水偏少年份则只出现了 2~3 次暴雨。20 世纪 90 年代南京城区年暴雨次数呈减少趋势,2000 年后年均暴雨次数呈增加趋势。

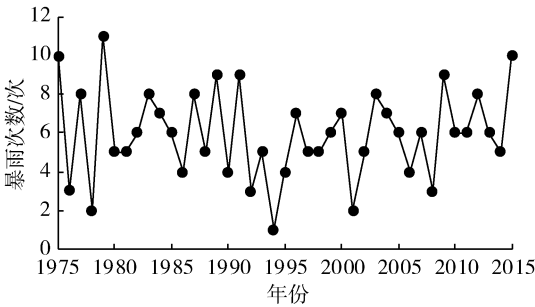


图 2 南京站 1975—2015 年暴雨次数变化

2.1.2 暴雨空间分布规律

表 1 为各雨量站 1985—2015 年多年平均暴雨量及暴雨次数。由表 1 可见,南京地区年平均暴雨量市区多于郊区,东部多于西部,临水区大,远水区小。主城区南京站年平均暴雨量最大,东山站次之,天生桥闸站、江宁镇站和高淳站年平均降水量最少。主城区暴雨偏多与城市热岛效应的叠加影响有关,城市中心

表 1 各雨量站 1985—2015 年多年平均暴雨量及暴雨次数

雨量站	多年平均暴雨量/mm	暴雨次数/次
南 京	398.8	182
六 合	383.1	209
晓 桥	387.4	190
东 山	389.6	193
天生桥闸	372.3	195
江宁镇	370.7	178
高 淳	373.9	209

气温高,下垫面向近地层输送热量较为强烈,对流加强,更易发生强度大的降雨。暴雨次数的空间分布与多年平均暴雨量分布相似。六合站和高淳站暴雨次数最大,江宁镇站暴雨次数最少。多年平均暴雨量最大的南京站为 182 次,相对偏少,表明与其他雨量站相比,南京站代表的主城区平均暴雨强度更大。

2.2 不同历时年最大降水量变化趋势

选取代表主城区的南京站和位于南京地区南部的高淳站以及位于北部的六合站,统计 1985—2015 年历年最大 1 h、3 h、6 h、12 h 和 24 h 降水量,结果如图 3 所示。3 站不同历时年最大降水量总体呈现出先增加、后略有减少的趋势。表 2 为 1985—2015 年 3 站不同历时年最大降水量的特征值统计。M-K 检验结果表明,南京站最大 1 h、3 h、6 h、12 h 和 24 h 雨量都呈现明显的增加趋势,其中最大 1 h 雨量、最大 24 h 雨量的 M-K 值分别为 1.66 和 1.67,通过了置

信度 95% 的显著性检验,最大 3 h、6 h 和 12 h 雨量的 M-K 值分别为 1.33、1.39 和 1.34,通过了置信度 90% 的显著性检验。六合站和高淳站的最大 1 h 年降水量呈略减少的趋势,其余历年最大降水量呈不同程度的增加趋势,但都未通过置信度 90% 的显著性检验。可以看出,除最大 1 h 雨量外,南京站其余历年最大雨量的最大值明显高于高淳站和六合站,且南京站不同历年最大雨量的平均值都明显大于其余两站,这表明南京主城区的降雨强度明显高于其他地区,应对暴雨内涝的压力更大。

2.3 雨强变化规律

图 4 为南京站和江宁镇站不同强度暴雨分布。1985—2015 年南京站出现弱暴雨 111 次、中暴雨 48 次和强暴雨 23 次,分别占 61.0%、26.4% 和 12.6%。1 月、2 月、11 月和 12 月没有出现暴雨,暴雨主要集中在 5—9 月,其中弱暴雨次数占比始终最多,中暴雨次之,强暴雨最少。中暴雨主要出现在 6—9 月,7 月次数占比最多。强暴雨主要出现在 6—8 月,其中 7 月次数占比最多,6 月次之。对比南

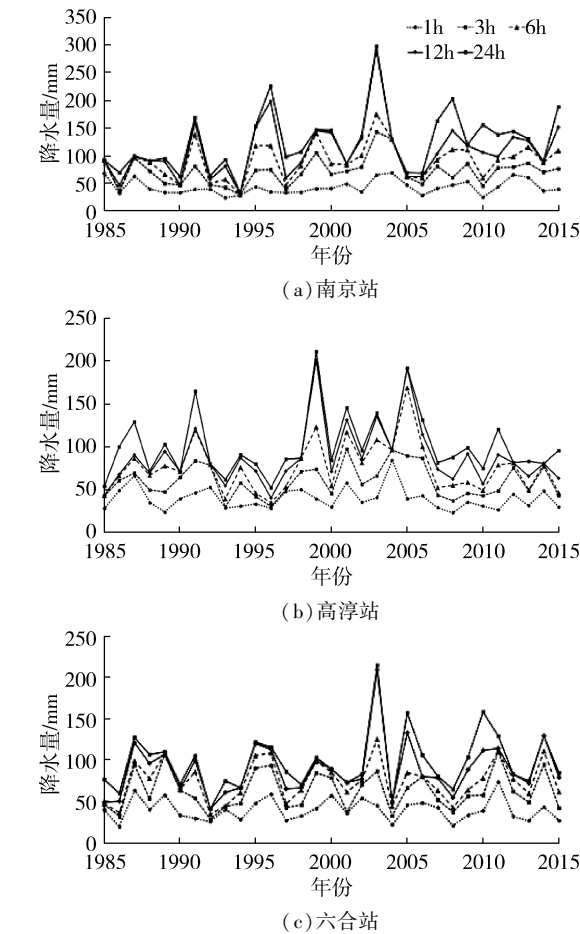


图 3 1985—2015 年 3 站历年年最大降水量

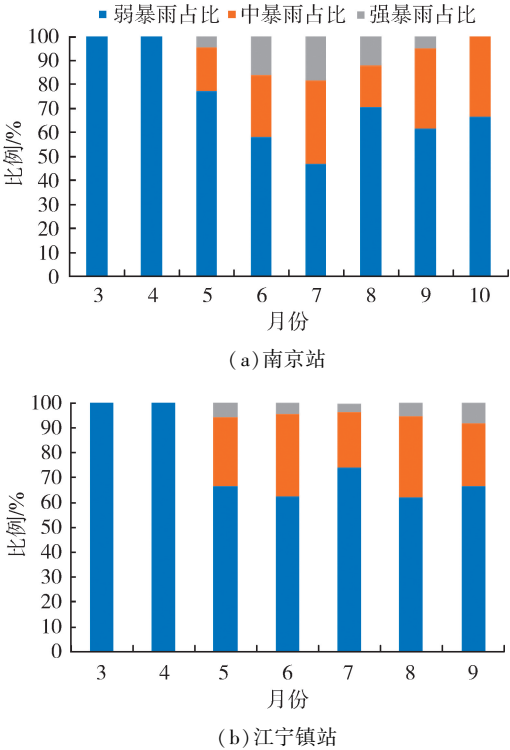


图 4 南京站和江宁镇站不同强度暴雨分布

表 2 3 站 1985—2015 年不同历时年最大降水量特征值统计

雨量站	最大 1 h 雨量			最大 3 h 雨量			最大 6 h 雨量			最大 12 h 雨量			最大 24 h 雨量		
	最大值/ mm	平均值/ mm	M-K 值	最大值/ mm	平均值/ mm	M-K 值	最大值/ mm	平均值/ mm	M-K 值	最大值/ mm	平均值/ mm	M-K 值	最大值/ mm	平均值/ mm	M-K 值
南 京	68.5	42.2	1.66	143.1	70.9	1.33	174.9	89.2	1.39	291	109.4	1.34	297.9	124.1	1.67
六 合	73.3	39.4	-0.32	109.4	62.2	0.27	124.7	74	0.44	208	88	1.27	213.9	96.8	0.85
高 淳	85.1	40.3	-0.42	97.2	60.3	0.17	168.8	76.2	0.14	201	88.9	0.37	210.9	101.3	0.65

京站的统计结果,江宁镇站弱暴雨占总暴雨次数的比例更大,中暴雨占比相近,而强暴雨占比明显偏少。分析两站年内分布特征,6—7月南京站弱暴雨次数占比略有减少,中暴雨占比略有增加,而江宁镇站与之相反,弱暴雨占比明显增加,中暴雨占比略有减少,这表明当南京地区进入汛期后,南京市中心更易出现高强度的暴雨。

图5为南京站不同强度暴雨次数5年滑动平均曲线。南京主城区的年均暴雨次数波动较大,1985—1996年主城区总暴雨、弱暴雨和中暴雨次数都呈现明显的减少趋势,1996年后整体呈现增加趋势,其中弱暴雨和总暴雨的变化趋势基本一致。强暴雨1985—2015年一直呈现增加趋势。为进一步分析不同强度暴雨的变化趋势,对比不同站点差异,对7个雨量站不同强度暴雨次数进行M-K统计检验,结果如表3所示。由表3可见,对于弱暴雨,除江宁站M-K值大于0,弱暴雨次数略有增加外,其余雨量站的弱暴雨次数均呈现减少趋势,但M-K值绝对值都未超过1.28,未通过置信度90%的显著性检验。对于中暴雨,南京站中暴雨次数呈略微减少趋势,晓桥站中暴雨次数的M-K值为1.73,增加显著,其余雨量站中暴雨次数略有增加。各站强暴雨次数都呈现增加趋势,其中南京站的M-K值为2.57,通过了置信度99%的显著性检验,东山站和六合站的M-K值分别为2.21和1.70,通过了置信度95%的显著性检验。南京地区整体的暴雨强度呈现增强的趋势,且代表主城区的南京站和靠近水域的六合站、东山站的强暴雨增加趋势相较于其他站点更为明显。

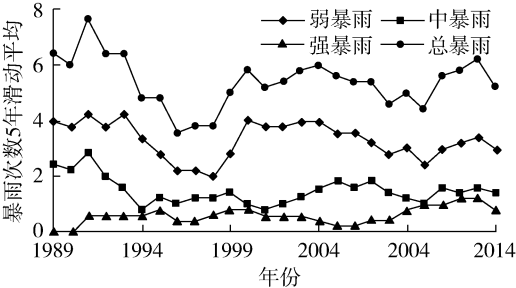


图5 南京站不同强度暴雨5年滑动平均曲线

表3 各雨量站不同强度暴雨次数M-K值

雨量站	弱暴雨	中暴雨	强暴雨
南 京	-0.83	-0.37	2.57
东 山	-1.02	0.32	2.21
晓 桥	-0.46	1.73	1.04
江宁镇	0.08	0.61	0.48
六 合	-0.49	0.90	1.70
天生桥闸	-0.92	0.20	0.90
高 淳	-0.42	0.85	0.42

图6为南京站1985—2015年不同强度暴雨小波方差图,图中方差越大表示波动能量越大,即相应

的周期性越明显。南京站弱暴雨丰枯变化周期分别为3年、8年和14年,其中14年的周期震荡最为剧烈,为第一主周期。中暴雨的丰枯变化周期分别为3年、4年和8年,8年左右的周期震荡最为剧烈,为第一主周期。强暴雨丰枯变化周期分别为3年、8年和18年,其中3年的周期震荡最为剧烈,为第一主周期。南京站总暴雨的丰枯变化周期分别为3年、4年、6年和14年,3年周期震荡最剧烈,为第一主周期。

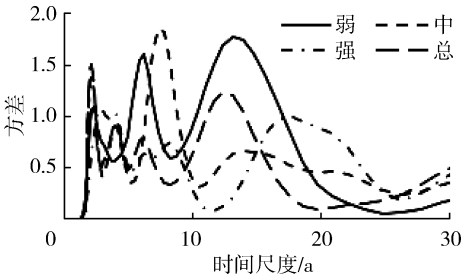


图6 南京站不同强度暴雨小波方差

2.4 历时变化规律

图7为南京站和江宁镇站不同历时暴雨分布。1985—2015年南京站特短暴雨出现30次、短暴雨出现68次、一般暴雨出现5次、长暴雨出现4次、特长暴雨出现4次。一般暴雨最多,占41.2%,短暴雨和特短暴雨分别占37.4%和16.5%,而长暴雨和特长暴雨共仅占4.7%,南京主城区的大部分暴雨过程持续时间不超过1d。

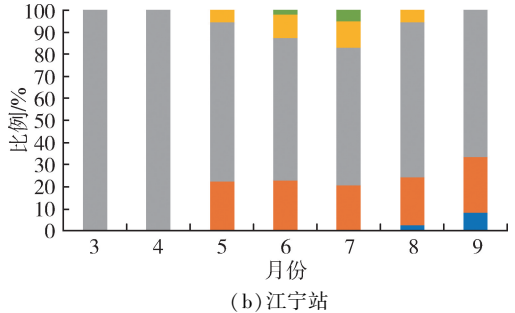
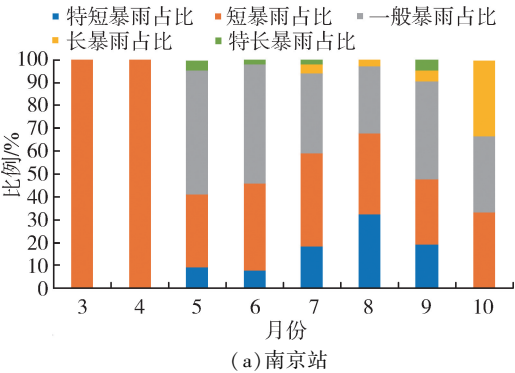


图7 南京站和江宁镇站不同历时暴雨分布

由图7可见,南京站3、4月仅出现了短暴雨,在暴雨集中出现的5—9月,7、8月短暴雨占比最多,其余月份一般暴雨占比最多。6—8月特短暴雨占

比逐渐增加,一般暴雨占比减少,一般历时以上暴雨的比例明显下降。与南京站相比,江宁镇站特短暴雨和短暴雨占总暴雨次数的比例明显更少,一般暴雨和长暴雨占比更多,特长暴雨占比相近。与南京站相比,5—9月江宁镇长暴雨出现更多,主要集中在6—7月,此时一般暴雨也呈现增加趋势。可以看出,当南京地区进入汛期时,相较于江宁镇,城市化程度更高的市中心区域出现的暴雨历时更短。

图8为南京站不同历时暴雨次数5年滑动平均曲线。可以看出,南京主城区以一般暴雨和短暴雨为主,且呈现暴雨历时缩短的趋势。1985—1996年,特短暴雨、短暴雨和一般暴雨都呈现减少趋势,其中一般暴雨减少趋势显著。1996年后,一般暴雨年平均次数变化不大,特短暴雨年平均次数整体呈现增加趋势,短暴雨年平均次数先显著增加后呈略减少趋势。长暴雨和特长暴雨出现次数极少,年平均次数都少于0.5。

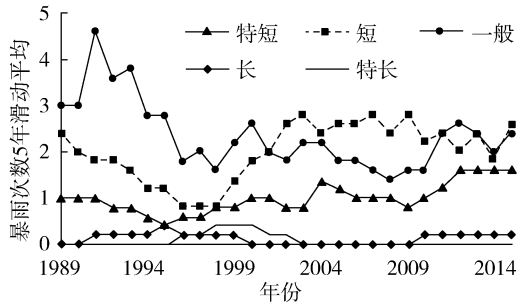


图8 南京站不同历时暴雨次数5年滑动平均曲线

因各雨量站长暴雨和特长暴雨的出现次数极少,故只对各站特短暴雨、短暴雨和一般暴雨进行M-K检验,结果见表4。对于特短暴雨,各站统计量都大于0,呈现增加趋势。其中南京站和六合站的M-K值分别为1.87和1.64,通过了95%的显著性检验,东山站和晓桥站的M-K值分别为1.56和1.46,通过了90%的显著性检验,特短暴雨次数增加趋势显著。对于短暴雨和一般暴雨,各站的M-K值绝对值都未超过1.28,未通过90%的显著性检验,增加或减少趋势都不明显。可以看出,南京地区短暴雨和一般暴雨次数没有明显的增减变化,但特短暴雨整体呈现增加趋势,其中代表主城区的南京

表4 各雨量站不同历时暴雨次数的M-K值

雨量站	特短暴雨	短暴雨	一般暴雨
南 京	1.87	0.82	-0.03
东 山	1.56	-0.73	-0.98
晓 桥	1.46	0.63	0.65
江宁镇	0.86	0.54	0.12
六 合	1.64	-0.73	0.21
天生桥闸	0.97	-0.85	0.54
高 淳	0.76	0.65	1.14

站和靠近水系的六合站、东山站、晓桥站相较于其他站点弱暴雨增加趋势更显著。

1985—2015年南京地区长暴雨和特长暴雨出现次数极少,只对特短暴雨、短暴雨和一般暴雨进行小波分析。图9为南京站不同历时暴雨的小波方差,南京站特短暴雨存在3年、4年及14年左右的丰枯周期变化,其中3年左右的周期震荡能量最强,为第一主周期。短暴雨存在3年和15年的丰枯周期变化,其中3年左右的周期震荡能量最强,为第一主周期,15年的周期震荡能量与3年周期的震荡能量相近。一般暴雨存在3年、5年和12年的左右的丰枯周期变化,其中3年左右的周期震荡能量最强,为第一主周期。

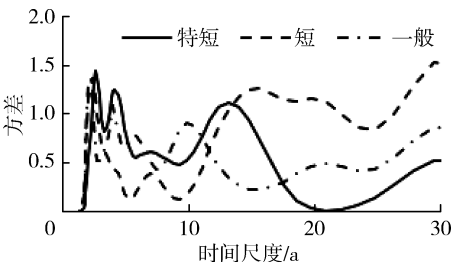


图9 南京站不同历时暴雨小波方差

2.5 雨型特征

雨型特征判断采用常用的模糊识别法,将12h暴雨雨型划分为单峰型、均匀型(Ⅳ型)和双峰型,其中单峰型又分为前单峰(Ⅰ型)、后单峰(Ⅱ型)和中单峰(Ⅲ型),双峰型分为前后相等的双峰(Ⅴ型)、前后不等的双峰(Ⅵ型)和中后双峰(Ⅶ型)。各站雨型统计结果见表5(受原始数据限制,江宁镇站未统计雨型)。南京地区历时12h暴雨雨型以单峰为主,占67.86%;双峰型次之,占20.65%;均匀型最少,只占11.48%。7种雨型中,出现频数排在前3位的雨型分别为Ⅲ型、Ⅱ型和Ⅰ型,均为单峰型暴雨。在单峰雨型中,雨峰在后部所占的比例最大,约占单峰雨型总数的38%,其次是前单峰和中单峰。在双峰雨型中,雨峰在前后两头的所占比例最大,约占双峰雨型的46%,雨峰在中间的最少。同时,对比各雨量站的单峰型暴雨可以发现,位于南京地区北部的南京站、六合站的Ⅰ型暴雨明显多于Ⅲ

表5 各雨量站12h暴雨雨型

雨量站	单峰			均匀	双峰		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
南京站	23.61	19.44	18.75	6.94	9.72	13.19	8.33
六 合	26.36	18.18	22.73	4.55	8.18	13.64	6.36
高 淳	11.86	25.42	27.12	25.42	3.39	3.39	3.39
晓 桥	26.67	22.67	28.00	8.00	4.00	8.00	2.67
东 山	19.70	24.24	25.76	4.55	10.61	12.12	3.03
天生桥闸	11.11	22.22	33.33	19.44	4.17	6.94	2.78
平 均	19.89	22.03	25.95	11.48	6.68	9.55	4.43

型暴雨,而位于南京地区南部的东站点、高淳站和天生桥闸站的Ⅲ型暴雨明显多于Ⅰ型暴雨。单峰型暴雨雨量集中,特别是雨峰在后部的暴雨,对区域除涝和城市排水的影响更大,容易引起农田受淹和城市大面积积水。

3 结 论

a. 南京地区暴雨时空分布不均性显著。暴雨主要集中在6~8月,其中7月暴雨最多。市区年暴雨量和暴雨次数明显多于郊区。

b. 南京地区不同历时年最大降雨量总体呈现增加趋势,且主城区增加趋势最为显著,其中最大3h、6h和12h雨量通过了置信度90%的M-K显著性检验,最大1h、24h雨量通过了置信度95%的M-K显著性检验;主城区的多年平均值明显高于其他区域。

c. 南京地区以弱暴雨、一般暴雨为主,但易引起内涝的短历时、高强度暴雨频次呈现增加趋势,且主城区比其他行政区的增加趋势更显著,面临的内涝风险更大。

d. 南京主城区的弱暴雨、中暴雨、强暴雨分别具有14年、8年和3年的丰枯变化周期;特短暴雨、短暴雨和一般暴雨均具有3年左右的丰枯变化周期;主城区总暴雨次数同样也具有3年的丰枯变化周期。

e. 南京地区历时12h暴雨以容易引起内涝的单峰型雨型为主,其中单峰型中Ⅲ型(中单峰)暴雨最多。从空间分布看,南京北部Ⅰ型(前单峰)暴雨偏多,而南部Ⅲ型(中单峰)暴雨偏多。

参考文献:

[1] 叶斌,盛代林,门小瑜. 城市内涝的成因及其对策[J]. 水利经济, 2010, 28(4): 62-65. (YE Bin, SHENG Dailin, MEN Xiaoyu. Causes and countermeasures of urban water logging[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2010, 28(4): 62-65. (in Chinese))

[2] 姜仁贵,解建仓. 城市内涝的集合应对体系[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 17. (JIANG Rengui, XIE Jiancang. An integrated coping system for urban waterlogging[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 17. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 张鑫,王嘉鑫,王全蓉. 洪水灾害的风险特征及保险制度设计[J]. 水利经济, 2018, 36(5): 57-60. (ZHANG Xin, WANG Jiabin, WANG Quanrong. Risk characteristics of flood disasters and design of insurance system[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(5):

57-60. (in Chinese))

[5] 刘艺,张郑贤,张锋贤. 经济发展与水环境监测指标的耦合关联性研究[J]. 水利经济, 2018, 36(3): 21-24. (LIU Yi, ZHANG Zhengxian, ZHANG Fengxia. Coupling correlation between economic development and monitoring indices of water environment[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(3): 21-24. (in Chinese))

[6] 李鹏程,李琼芳,蔡涛,等. 北京天津地区近51a降水变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 6-9. (LI Pengcheng, LI Qiongfang, CAI Tao, et al. Feature analysis of 51 years precipitation change in Beijing and Tianjin area[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 6-9. (in Chinese))

[7] 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))

[8] 赵琳娜. 北京城市暴雨分型及短历时降雨重现期研究[C]//第33届中国气象学会年会 S9 水文气象灾害预报预警. 北京:中国气象学会, 2016:3.

[9] CHEN Z H, YIN L, CHEN X H, et al. Research on the characteristics of urban rainstorm pattern in the humid area of Southern China: a case study of Guangzhou City [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(14): 4370-4386.

[10] 贺芳芳. 1980年代以来上海地区暴雨的气候变化特征[C]//第六届海峡论坛2014年两岸民生气象论坛文集. 福州:福建省气象科学研究所, 2014:14.

[11] 王赓. 近64年南京夏季降水峰期变化特征分析[C]//第35届中国气象学会年会 S11 城市气象与环境:第七届城市气象论坛. 北京:中国气象学会, 2018:5.

[12] 王赓,张立凤,朱鹏,等. 近64a来南京夏季降水峰期变化及其异常环流分析[J]. 大气科学学报, 2017, 40(2): 243-252. (WANG Yuan, ZHANG Lifeng, ZHU Peng, et al. Variability of summer precipitation peak time in Nanjing during 1951—2014 and its associated anomalous circulation [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2017, 40(2): 243-252. (in Chinese))

[13] 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))

[14] 朱鑫君,黄翠芳,尹宜舟,等. 南京一次特大暴雨天气过程的中尺度特征[J]. 气象科学, 2008, 28(增刊1): 52-55. (ZHU Xinjun, HUANG Cuifang, YIN Yizhou, et al. Meso-scale characteristic during the course of one heavy storm in Nanjing[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2008, 28(Sup1): 52-55. (in Chinese))

(下转第114页)

- [23] CHEN M, DING S, LIU L, et al. Kinetics of phosphorus release from sediments and its relationship with iron speciation influenced by the mussel (*corbicula fluminea*) bioturbation[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 542: 833-840.
- [24] CHEN M, DING S, LIU L, et al. Fine-scale bioturbation effects of tubificid worm (*Limnodrilus hoffmeisteri*) on the lability of phosphorus in sediments[J]. *Environ Pollut*, 2016, 205: 511-515.
- [25] ANDERS S, PYL P T, HUBER W. HTSeq: a python framework to work with high-throughput sequencing data[J]. *Bioinformatics*, 2015, 31(2): 166-169.
- [26] REVSBECH N P. An oxygen microsensor with a guard cathode[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(2): 474-478.
- [27] HULTH S, ALLER R C, ENGSTRÖM E P, et al. pH plate fluorosensor (optode) for early diagenetic studies of marine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002(47): 212-220.
- [28] 王建军, 沈吉, 张路, 等. 湖泊沉积物-水界面氧气交换速率的测定及影响因素[J]. *湖泊科学*, 2009(21): 474-482. (WANG Jianjun, SHEN Ji, ZHANG Lu, et al. Spatial heterogeneity of oxygen exchange between sediment-water interface in lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009(21): 474-482. (in Chinese))
- [29] 徐洋, 陈敬安, 王敬富, 等. 氧化还原条件对红枫湖沉积物磷释放影响的微尺度分析[J]. *湖泊科学*, 2015(28): 68-74. (XU Yang, CHEN Jingan, WANG Jingfu, et al. The micro-scale investigation on the effect of redox condition on the release of the sediment phosphorus in Lake Hongfeng[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015(28): 68-74. (in Chinese))
- [30] LEWANDOWSKI J, RÜTER K, HUPFER M. Two-dimensional small-scale variability of pore water phosphate in freshwater lakes; results from a novel dialysis sampler[J]. *Environ Sci Technol*, 2002(36): 2039-2047.
- [31] XU D, WU W, JIA F. A high-resolution dialysis technique for rapid determination of dissolved reactive phosphate and ferrous iron in pore water of sediments[J]. *Sci Total Environ*, 2012(421/422): 245-252.
- [32] HARPER M P, DAVISON W. Temporal, spatial and resolution constraints for porewater sampling devices using diffusional equilibration; dialysis and DET[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(11): 3110-3119.
- [33] DAVISON W, GRIME G W. Distribution of dissolved iron in sediment pore waters at submillimeter resolution[J]. *Nature*, 1994, 352: 323-325.
- [34] ZHANG H, DAVISON W. Localised remobilization of metals in a marine sediment[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 296: 175-187.
- [35] PANTHER J G, TEASDALE P R, BENNETT W W, et al. Comparing dissolved reactive phosphorus measured by DGT with ferrihydrite and titanium dioxide adsorbents: Anionic interferences, adsorbent capacity and deployment time[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, 698: 20-26.
- [36] LUO J, ZHANG H. Performance characteristics of diffusive gradients in thin films equipped with a binding gel layer containing precipitated ferrihydrite for measuring Arsenic (V), Selenium (VI), Vanadium (V), and Antimony (V)[J]. *Anal Chem*, 2010, 82: 8903-8909.
- [37] PANTHER J G, TEASDALE P R. Titanium dioxide-based DGT technique for in situ measurement of dissolved reactive phosphorus in fresh and marine waters[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(24): 9419-9424.
- [38] BENNETT W W, PETER R. New diffusive gradients in a thin film technique for measuring inorganic Arsenic and selenium(IV) using a titanium dioxide based adsorbent[J]. *Anal Chem*, 2010, 82: 7401-7407.
- [39] SUN Q, CHEN J, YAO Y, et al. Comparison of diffusive gradients in thin film technique with traditional methods for evaluation of zinc bioavailability in soils[J]. *Environ Monit Assess*, 2014, 186: 6553-6564.
- [40] DING S, XU D, SUN Q, et al. Measurement of dissolved reactive phosphorus using the diffusive gradients in thin films technique with a high-capacity binding phase[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(21): 8169-8174.

(收稿日期: 2019-01-06 编辑: 彭桃英)

(上接第 94 页)

- [15] 林昕, 刘嘉熙. 南京市水资源利用效率研究[J]. *水利经济*, 2017, 35(5): 23-27. (LIN Xin, LIU Jiaxi. Utilization efficiency of water resources in Nanjing City[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2017, 35(5): 23-27. (in Chinese))
- [16] 蔡涛. 基于 Mann-Kendall 方法的大凌河中上游 1956—2016 年降水变化特性分析[J]. *人民珠江*, 2018, 39(11): 83-88. (CAI Tao. Analysis of precipitation variations in the middle and upper reaches of the Dalinghe River Basin from 1956 to 2016 based on the Mann-Kendall method[J]. *Pearl River*, 2018, 39(11): 83-88. (in Chinese))
- [17] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2006(4): 503-509. (SHAO Xiaomei, XU Yueqing, YAN Changrong. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006(4): 503-509. (in Chinese))
- [18] 柴苑苑, 孙翔. 深圳市流域暴雨雨型及变化趋势分析[J]. *水利技术监督*, 2018, 146(6): 140-142. (CAI Yuanyuan, SUN Xiang. Analysis of rainstorm pattern and change trend in Shenzhen river basin[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2018, 146(6): 140-142. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-12-26 编辑: 王芳)