

赣江上游平江流域近 30 年不同量级 降雨时空分布特征

刘声洪, 刘惠英, 罗萍, 朱俊杰, 兰盈盈

(南昌工程学院 水利与生态工程学院, 南昌 330099)

摘 要:为研究全球气候变暖影响下的赣江上游平江流域不同量级降雨时空分布特征,基于 1989—2018 年逐小时降雨数据,运用 Mann-Kendall 趋势检验法、Morlet 小波分析等方法对不同量级降雨在年、季、月、时尺度上进行了分析。结果表明:(1) 近 30 年来,小、中、大、暴雨占年雨量的比率分别为 18.64%, 29.76%, 29.70%, 21.90%, 降雨集中在春、夏季,小、中、大、暴雨峰值分别出现在 3 月、4 月、6 月、6 月,百年一遇暴雨量为 175.5 mm;(2) 空间分布特征:暴雨在各尺度上多为“南低北高”,小雨、大雨总体表现为“西低东高”,中雨随机性较强,在各尺度上差异较大;(3) 年小雨、年中雨量呈下降趋势,年大雨、年暴雨量呈上升趋势,2 月、11 月中雨量分别通过 $\alpha=0.05$ 及 0.01 显著性检验分别表现为下降、上升趋势;(4) 小时降雨量在 09:00 至次日 06:00 随时间变化递增,其与降雨侵蚀力在空间分布上均表现出自东北向中南递减而后向西南递增的特点,其雨带在空间上随时间的推移表现出自中部向两侧扩散的特征;(5) 年降雨量受中、大雨量的影响第一、二主周期表现为 26~27 a, 7~8 a, 受暴雨量的第一主周期影响第三主周期表现为 4~5 a。综上,不同量级降雨时空分布不均,具有朝极端降水发展的趋势,未来应更加注意 5—6 月流域北部由暴雨带引发的洪涝灾害。

关键词:不同量级降雨; 小时降雨; 时空分布; 平江流域

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0106-09

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Rainfall of Different Magnitudes in Pingjiang Basin of Upper Ganjiang River in Recent 30 Years

LIU Shenghong, LIU Huiying, LUO Ping, ZHU Junjie, LAN Yingying

(College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of technology, Nanchang 330099, China)

Abstract:In order to study the temporal and spatial distribution characteristics of different magnitudes of rainfall in Pingjiang basin in the upper reaches of Ganjiang River under the influence of global warming, based on its hourly rainfall data from 1989 to 2018, Mann Kendall trend test method and Morlet wavelet analysis are used to analyze different magnitudes of rainfall on annual, seasonal, monthly and hourly scales. The results show that: (1) in the past 30 years, the proportions of light rain, moderate rain, heavy rain and excessive rain of annual rainfall were 18.64%, 29.76%, 29.70% and 21.90%, respectively; the rainfall mainly concentrated in spring and summer, and the peak values of light, moderate, heavy and excessive rain appeared in March, April, June and June, respectively, with a 100 year return period of 175.5 mm; (2) distribution characteristics of space was that excessive rainfall on each time scale were low in the south and high in the north of the basin, light rain and heavy rain were generally low in the west and high in the east of the basin, moderate rainfall was obviously different at different times scales; (3) the annual light and moderate rainfall showed a downward trend, the annual heavy rain and excessive rain showed an upward trend, the moderate rainfall in February and November showed a downward and upward trend, respectively, by passing the significance tests of 0.05 and 0.01, respectively; (4) the hourly rainfall increased with time from 09:00 to

收稿日期:2021-03-06

修回日期:2021-05-13

资助项目:2020 年国家大学生创新创业训练计划资助项目(202011319003);2021 年国家大学生创新创业训练计划资助项目(202111319001, S202111319002);国家自然科学基金项目“水利工程和水土保持措施对赣江上游水沙关系影响的定量研究”(41761058)

第一作者:刘声洪(1999—),男,江西赣州人,研究方向:水文与水资源工程。E-mail:lsh01035597@163.com

通信作者:刘惠英(1973—),女,陕西凤翔人,副教授,主要从事流域水沙变化和水体监测方面的研究。E-mail:huiyingliu@nit.edu.cn

06:00 the next day, and its spatial distribution and rainfall erosivity decreased from northeast to central and south China, and then increased to southwest, and its rain belt showed the characteristics of diffusion from the middle to both sides over time; (5) annual rainfall was affected by moderate and heavy rain the first and second main cycles were 26~27 years, 7~8 years, and the third main cycle was 4~5 years under the influence of the first main cycle of heavy rainfall. The uneven distribution of different magnitudes of rainfall in time and space had a trend towards extreme precipitation, and more attention should be paid to floods caused by heavy rain belt in the northern part of the basin in May and June.

Keywords: rainfall of different magnitudes; hourly rainfall; spatiotemporal distribution ; Pingjiang River Basin

在全球变暖的背景下,我国降雨结构发生了明显地变化,不同强度降雨雨量和雨日变化趋势表现出不同的空间分异格局^[1]。不同量级降雨作为主要气候因子,是旱涝等自然灾害发生的直接原因,其变化趋势特征研究具有重要的意义^[2-4]。已有研究表明,在过去 50 a(1961—2010 年)中国西部,小雨、中雨、大雨对降雨量增量起主导作用,而在中国东部暴雨降水强度在降雨量贡献中起主导作用^[5]。但研究同时发现我国现代降雨量变化趋势具有明显的地域性差异,全国平均没有表现出显著增加或减少的长期变化,但强降雨事件频率和降雨量出现明显增多,而小雨事件特别是痕量降雨事件显著减少^[6-8]。上述研究表明,我国降雨结构及时空变化在全球气候变暖的背景下具有明显地域性及规律性^[1-11],然而同时发现目前研究缺乏对不同量级降雨多时间尺度的研究。因此,对不同量级降雨在不同区域^[2,12-13]的多时间尺度的研究非常有必要。

赣江是江西省五大水系之冠,为江西省第一大河,主河道全长 823 km,流域面积 8.35 万 km²,占鄱阳湖流域面积的 51%^[14-15]。已有众多学者对其进行研究,结果表明:赣江流域降雨量年内分配不均,年降雨量集中在流域东部和西北部,近几十年来,赣江流域降雨量呈现显著上升趋势极端降水指数上游、中游的 I95 和中游的 I99,在 0.05 显著性水平下,显著上升^[16-20]。但目前的许多研究大都集中在年尺度上,对于季、月尺度尤其在小时尺度上的研究相对较少^[15-23]。平江流域为赣江上游右岸的一级支流,大部分面积处于江西兴国县境内,而兴国县水土流失严重为全国水土保持 8 个重点治理区之一^[23-25]。已有学者研究表明,平江流域降雨侵蚀力的时空分布特征与流域内降水时空分布基本一致^[23]。本文采用赣江上游平江流域 9 个雨量站点 1989—2018 年逐小时降水数据,选取小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个降雨量级,利用更高精度的小时降水数据,从小时尺度^[26-28]来分析流域的降雨特征。研究可为流域的灾害防治及水资源综合开发利用提供参考依据。

1 数据来源及研究方法

1.1 区域概况

平江为赣江上游右岸一级支流,又称兴国江,位于江西省南部;主要由潏江(东河)、潏水(北河)在兴国县城东南方向狮子口汇合,经埠口、龙口流入赣县江口入贡水;流域地处东经 115°04′—115°52′,北纬 25°57′—26°37′,主河道长 148 km、比降 1.26‰、流域面积 2 851 km²;地貌以低山、丘陵为主,局部有中山、低山地分布,地处华南地层区,构造单元为赣中南褶皱赣州—吉安凹陷,主要为石炭纪和白垩纪砂岩、变质岩和第四纪松散堆积物,极易发生水土流失,受亚热带季风气候影响,雨量充沛,气候温暖,多年平均降雨量 1 585 mm,平均气温 18.8℃,无霜期 284 d,日照为 1 861.4 h^[14,23]。

1.2 数据来源

本文使用的降水数据来源于江西省水文局,为保证资料的连续性及代表性,选用赣江上游平江流域内翰林桥、田村、龙口、富口、长竹、兴国、崇胜、城冈、澄江共 9 个站点 1989—2018 年的逐小时降水数据,雨量站点位置见图 1。

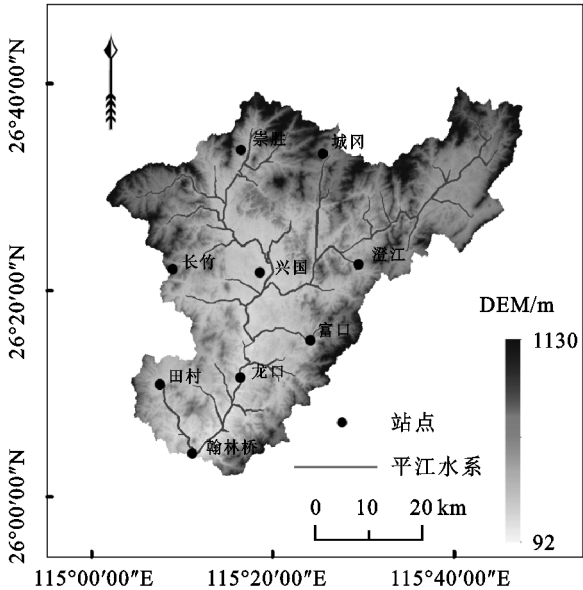


图 1 平江流域雨量站点分布

1.3 研究方法

本文将逐小时降雨数据按当日 08:00 至次日 08:00 为今日降雨,按水文行业标准,将降雨分为 4 个不同强度的降雨量级。日降雨在 0.1~9.9 mm 为小雨,在 10~24.9 mm 为中雨,在 25~49.9 mm 为大雨,在 ≥50 mm 为暴雨。根据流域气候特征,季节划分为:春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—翌年 2 月)。本文采用 1989—2018 年共 30 a 的逐小时降雨数据,为分析小时降雨的时空分布特征,以 10 a 为界划分为前期(1989—1998 年)、中期(1999—2008 年)和后期(2009—2018 年)共 3 个阶段。

采用线性倾向估计法^[1,29]来估算平江流域 1989—2018 年不同量级降雨变化速率(b), $b>0$,表示呈上升趋势; $b<0$,表示呈下降趋势; $|b|$ 值表示上升或下降的速率。应用皮尔逊 P —Ⅲ 型曲线来估算降雨重现期。运用 Mann-Kendall(M - K) 趋势检验法^[22,29]来检验时间序列显著性,当 $Z_{1-a/2}$ 小于 90%,95% 及 99% 置信水平分别对应的 $|Z|$ 时,表示上升或下降趋势达到该置信水平检验的要求,其对应的 $|Z|$ 分别为 1.64,1.96,2.58,且在年、季、月尺度

上进行检验时,按流域气候特征划分季节使得冬季时间序列为 29 其余各尺度均为 30。通过 Morlet 小波分析法^[29-32]来分析时间序列的周期性,小波系数为正表示研究对象在该时段为偏多期,为负时表示研究对象在该时段为偏少期,零值则对应着突变点。空间插值采用反距离权重插值法^[33-34],采样点离插值点越近,权重越大;反之,采样点离插值点越远,权重就越小。

2 结果与分析

2.1 不同量级降雨的时间分布特征

2.1.1 不同量级降雨的年际变化特征 根据降雨数据,计算各量级降雨基本特征见表 1。平江流域在 1989—2018 年小雨年均值为 297.21 mm,最大、小值分别为 367.53 mm,237.53 mm,标准差为 2.38 mm,以 6.12 mm/10 a 的速率下降;小雨主要集中在春季,夏、冬季次之,秋季最小,春、冬季呈下降趋势,夏、秋季呈上升趋势;月雨量集中在 1—6 月且呈“双峰”型,主峰出现在 3 月,均值为 42.52 mm,次峰出现在 8 月,均值为 25.45 mm,最小值出现在 10 月,均值为 11.04 mm。

表 1 平江流域 1989—2018 年不同量级降雨基本特征值

时间	小雨/mm					中雨/mm					大雨/mm					暴雨/mm				
	最大值	最小值	均值	标准差	斜率	最大值	最小值	均值	标准差	斜率	最大值	最小值	均值	标准差	斜率	最大值	最小值	均值	标准差	斜率
1月	48.52	6.82	27.69	0.94	-2.33	78.86	0.00	30.54	1.19	-6.59	107.85	0.00	18.88	1.63	5.96	58.29	0.00	2.88	1.38	-3.50
2月	51.16	4.63	28.74	0.82	-5.00	120.94	0.00	37.78	1.53	-1.11	59.52	0.00	16.79	1.97	-9.27	49.67	0.00	5.75	0.83	-1.82
3月	66.63	21.35	42.52	0.59	-2.35	129.54	12.65	57.82	2.57	-2.88	177.59	2.92	50.33	2.78	-13.57	120.79	0.00	18.65	2.74	-5.85
4月	47.48	18.12	31.09	0.55	-1.49	115.60	6.49	66.99	2.32	-1.71	137.97	2.22	56.85	2.28	5.90	114.19	0.00	22.37	4.26	0.15
5月	60.12	14.56	30.66	0.61	-4.48	105.14	18.03	62.16	2.41	2.64	199.63	1.74	73.88	4.60	8.33	203.49	6.89	68.84	9.89	13.21
6月	43.77	13.23	28.54	1.40	3.00	89.99	21.11	58.12	2.57	7.82	162.00	30.40	82.26	5.09	-2.72	284.08	0.00	82.60	19.66	-1.80
7月	44.54	6.09	19.60	0.90	-1.63	67.88	0.00	36.07	1.48	0.38	141.85	0.00	44.03	2.80	-0.79	152.67	0.00	54.76	3.87	3.77
8月	43.59	6.67	25.45	1.08	1.19	88.55	13.32	47.18	1.74	2.57	112.90	5.25	47.09	4.62	1.08	252.98	0.00	46.61	7.87	-7.18
9月	34.16	4.10	16.77	0.70	-1.79	64.13	0.97	22.01	1.79	-1.65	72.63	0.00	21.45	2.02	-2.28	92.83	0.00	17.39	2.14	2.26
10月	37.80	0.10	11.04	0.65	1.68	65.52	0.00	17.26	2.04	-2.77	88.98	0.00	22.14	3.26	6.69	168.52	0.00	13.35	1.18	1.73
11月	43.52	0.00	17.00	0.64	4.96	111.16	0.00	23.57	1.50	1.29	148.12	0.00	24.57	1.68	18.13	74.96	0.00	12.40	2.10	12.20
12月	39.10	1.93	18.11	0.61	2.14	62.29	0.00	14.93	1.00	5.50	91.05	0.00	15.19	0.91	-0.12	60.85	0.00	3.54	1.01	5.03
春季	157.69	67.86	104.27	0.53	-8.32	289.86	96.60	186.97	5.80	-11.95	336.53	41.29	181.06	6.44	0.65	280.31	13.13	109.86	15.43	7.51
夏季	102.19	43.33	73.59	0.75	2.55	211.06	75.94	141.37	3.35	10.77	377.47	86.82	173.38	9.72	-2.44	387.53	4.16	183.96	29.82	5.21
秋季	91.37	12.97	44.81	0.82	4.85	142.17	1.82	62.84	2.18	8.46	235.99	0.00	68.16	3.36	9.17	227.57	0.00	43.13	3.14	12.72
冬季	118.63	37.33	73.49	1.50	-6.19	169.28	9.35	81.09	3.22	-10.14	163.91	0.00	52.26	2.94	-4.56	60.85	0.00	10.23	2.19	2.57
年	367.53	237.53	297.21	2.38	-6.12	674.28	332.36	474.42	10.04	-4.87	862.69	221.66	473.46	15.03	3.96	745.56	104.68	349.12	43.82	14.73

中雨与小雨分布相似但值更大,年均值为 474.42 mm,最大、小值为 674.28 mm,332.36 mm,标准差为 10.04 mm,以 4.87 mm/10 a 的速率下降;中雨主要集中在春季,夏季次之,秋季最小,冬季次之,春、冬季呈下降趋势,夏、秋季呈上升趋势;月雨量集中在 2—8 月

且呈“多峰”型,主峰分别出现在 4 月,均值为 66.99 mm,次峰出现在 8 月、11 月其均值分别为 47.18 mm,23.57 mm,最小值出现在 12 月,均值为 14.93 mm。

大雨量年均值为 473.46 mm,与中雨雨量极其接近,最大、小值为 862.69 mm,221.66 mm,标准差为

15.03 mm,以 3.96 mm/10 a 的速率上升;大雨量从大到小依次排序为春、夏、秋、冬,春、秋季呈上升趋势,夏、冬季呈下降趋势;月雨量集中在 3—8 月且呈“多峰”型,主峰分别出现在 6 月,均值为 82.26 mm,次峰出现在 8 月、11 月其均值分别为 47.09 mm,24.57 mm,最小值出现在 12 月,均值为 15.19 mm。

暴雨雨量表现极端,年均值为 349.12 mm,最大、小值为 745.56 mm,104.68 mm,标准差为 43.82 mm,以 14.73 mm/10 a 的速率上升;暴雨量主要集中在夏季均值为 183.96 mm 占年暴雨量的 52.99%,春季次之,冬季最小均值仅为 10.23 mm 占年暴雨量的 2.95%,秋季次之,各季均呈上升趋势;月雨量集中在 5—8 月且呈“单峰”型,峰值出现在 6 月,均值为 82.60 mm,8—9 月雨量骤降其均值从 46.61 mm 降至 17.39 mm,最小值出现在 1 月,均值为 2.88 mm。

综上所述,近 30 a 平江流域降雨由中、大雨占主导地位,小雨量最小,暴雨量次之,其占总降雨的比率分别为 18.64%,29.76%,29.70%,21.90%;从雨量最大值可以看出,大、暴雨量的最大值较大,说明流域洪涝灾害主要由大、暴雨引起,6 月暴雨量最大值高达 284.08 mm;标准差按小雨、中雨、大雨、暴雨的顺序依次增大;年小雨、年中雨量呈下降趋势,年大雨、年暴雨量呈上升趋势,说明流域降雨有向极端降雨发展的趋势,这与任国玉等^[6-8]研究我国降水时空变异规律具有一致性,与王永文等^[15]研究赣江流域极端降水的变化规律相吻合。结合平江流域易发生水土流失这一特点,得出未来由于极端降雨增加可能会影响流域农业发展。

2.1.2 降雨重现期 基于以上结论,为探究降雨的发展规律。以 9 个雨量站 1989—2018 年共 971 个不重复数值的降雨事件作为样本,利用皮尔逊 P—Ⅲ型曲线来估算降雨重现期,其特征值见表 2。由表 2 可见,样本统计参数 EX,C_V,C_S,C_S/C_V(倍比)分别为

54.02 mm,0.71,1.23,1.73,50 mm 雨量对应的设计频率为 46%,即暴雨的发生概率约为两年一遇,而五十年一遇的雨量为 155.2 mm、百年一遇的雨量为 175.5 mm,千年一遇的雨量为 240.3 mm。当极端降雨事件发生频率增加时,五十年一遇、百年一遇及千年一遇降雨发生的概率也会增加,这可能会对当地经济尤其是农业的发展产生巨大的影响。

表 2 P—Ⅲ型曲线设计特征值

统计参数				设计频率所对应的雨量/mm			
EX/mm	C _V	C _S	C _S /C _V	46%	98%	99%	99.9%
54.02	0.71	1.23	1.73	50	155.2	175.5	240.3

2.2 不同量级降雨时空分布特征

2.2.1 年尺度上的空间分布特征 1989—2018 年平江流域不同量级降雨年雨量表现出明显的空间分异特征(图 2)。小雨总体上呈现西低东高的分布特征,在流域中部兴国站附近存在 1 个低值中心,值为 290.37 mm。中雨量分布具有较强的区域性,但总体来看流域表现出中部低四周高的分布特征,在城冈、长竹、田村、富口站附近存在 4 个高值中心其值为 480~505 mm,在兴国和龙口站附近具有 2 个低值中心其值为 422~460 mm。大雨和小雨的分布规律一致,大体上表现为西低东高的特征,且相比小雨,大雨雨量带层次分明在流域东北部形成 10 个高值的雨量带其值为 480~505 mm。暴雨量表现出南低北高的分布特征,具有较强的层次性,在流域北部城冈、崇胜站附近存在两个 2 高值中心其值为 422~460 mm,在龙口、富口 2 站存在 1 个低值中心其值为 246~290 mm。

根据 M-K 趋势检验结果显示,小雨量总体呈现下降趋势,中雨量东北部表现为上升其余地区为下降趋势,大雨量为西部上升东部下降趋势,暴雨量由西北向东南方向表现出平行的过渡带其特征为上升—下降—上升,但各量级降雨年雨量仅中、大雨个别站点通过显著性检验。

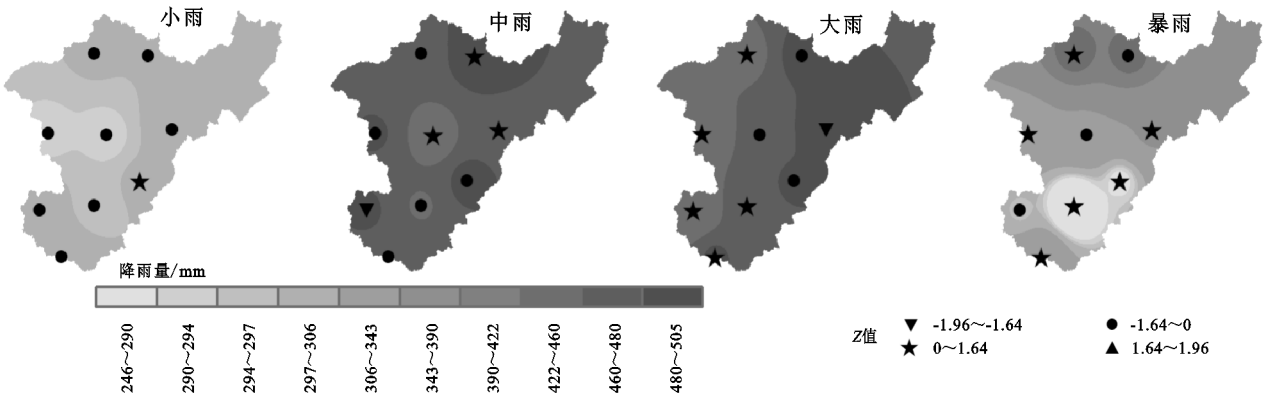


图 2 平江流域 1989—2018 年不同量级降雨及 Z 值年尺度上的空间分布

2.2.2 季尺度上的空间分布特征 图 3 为平江流域 1989—2018 年不同量级降雨季雨量及其变化趋势的

空间分布特征。小雨在各季的空间分布各异,春季有较强的规律性表现出西低东高的分布特征,秋季具有中部低南北端高的分布特征,夏、冬季无明显特征。中雨分布具有较强的区域性在各季度易形成降雨中心,春季形成 2 个 192~200 mm 及 1 个 200~235 mm 的高值中心,夏季形成 2 个 143~160 mm 的高值中心,秋季形成 1 个 71~75 mm 的高值中心,冬季形成 2 个 82~95 mm 的高值中心和一条 82~95 mm 雨量带。大雨在季尺度上有统一的规律性,各季总体表现出西低东高的分布特征,且各季都形成降雨中心,表现明显的是春季流域东南部和夏季流域北部均形成 1 个 192~200 mm 的高值中心。暴雨在季度上的分布规律相似,春、夏季与年雨量大体上表现出一致的南低北高的分布特征,春、夏季在流域北部形成

降雨高值中心,秋、冬季雨量少,最小为 9~13 mm,然秋季北部和冬季南部降雨相对较大。

根据 M-K 检验结果显示,小雨量在春、冬季呈下降趋势,夏(南部除外)、秋季呈上升趋势,其中春季翰林桥站通过 $p=0.05$ 的显著性检验,春、秋、冬三季均有少数站点通过 $p=0.01$ 的显著性检验。中雨量在春、冬季呈下降趋势且田村站春季、翰林桥站冬季雨量通过 $p=0.05$ 的显著性检验且冬季富口站通过 $p=0.01$ 的显著性检验,夏、秋季呈上升趋势但未通过显著性检验。大雨量在春季呈西升东降,夏季呈南升北降,秋季总体呈上升趋势,冬季总体呈下降趋势,各季降雨均未通过显著性检验。暴雨量变化趋势规律性较差,秋季降雨呈下降趋势且崇胜站雨量通过 $p=0.05$ 的显著性检验。

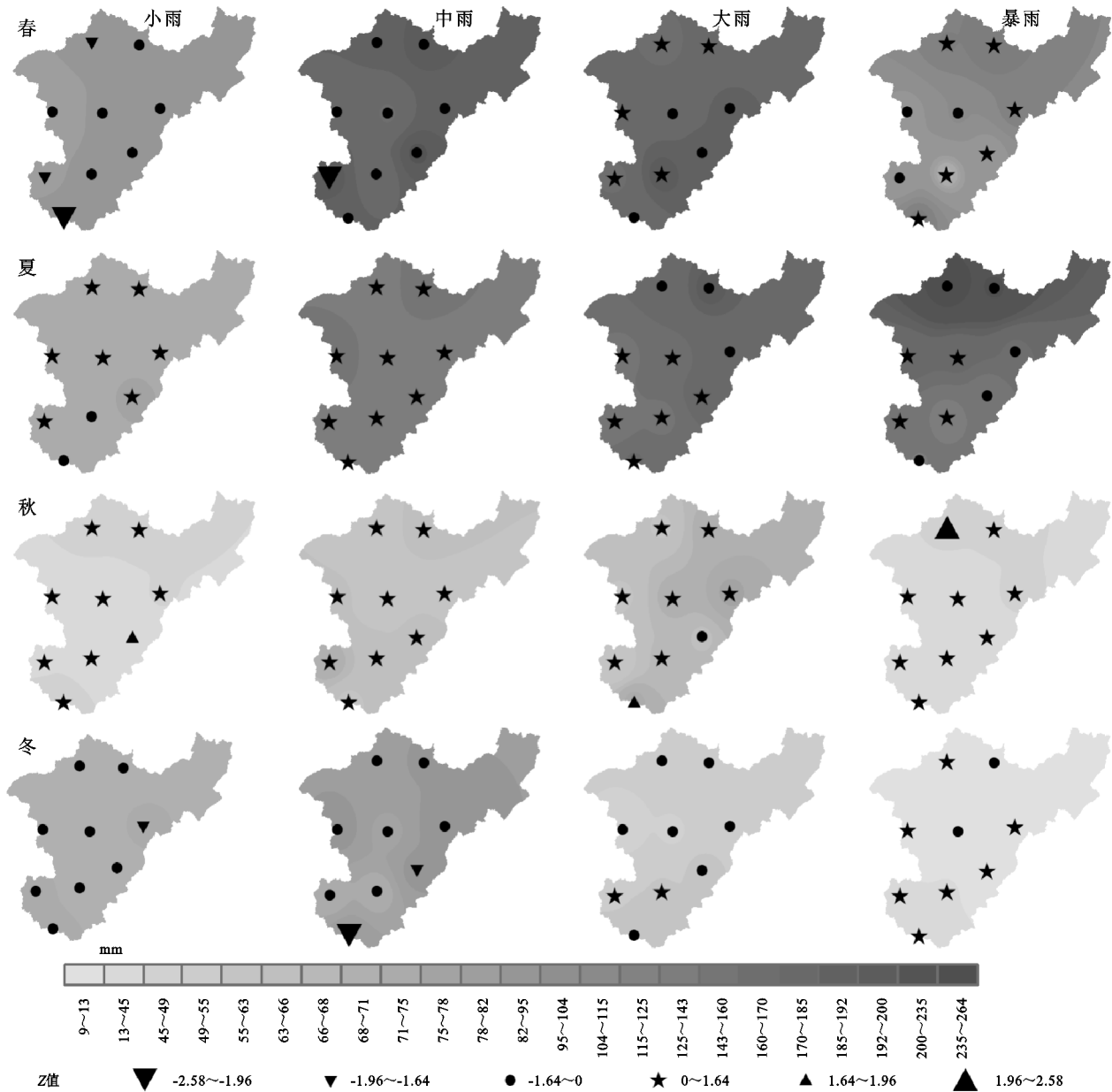


图 3 平江流域 1989—2018 年不同量级降雨及 Z 值季尺度上的空间分布

综合分析得,春、夏季降雨丰沛且流域北部雨量较大,尤其是中、大、暴雨量在流域北部均形成降雨高值中心;而秋、冬季降雨不足,流域南部雨量相对较大;各量级降雨季雨量仅少数站点通过 $p=0.05$ 的显著性检验,降雨变化趋势并不明显。

2.2.3 月尺度上的空间分布特征 由图 4 看出,小雨因雨量整体偏小在月尺度上的空间分布无明显地差异,但较稳定,1—12 月雨量为 8~44 mm。相比年、季尺度,小雨量在月尺度上的变化趋势更为明显。小雨量 2 月有 4 个站点、5 月有 1 个站点通过 $p=0.05$ 的显著性检验呈下降趋势其中 2 月长竹站通过 $p=0.01$ 的显著性检

验,6 月有 1 个站点、11 月有 2 个站点通过 $p=0.05$ 的显著性检验且呈上升趋势其中 11 月富口站通过 $p=0.01$ 的显著性检验,其余月份无显著变化。

月中雨量具有鲜明地空间分异格局,其中 3 月、8 月、11 月中雨量呈现西低东高,2 月呈现中部低南北高,7 月由西南向东北方向呈现高一低一高的分布特征,且在 3 月、5—6 月、10 月有多个降雨高值中心形成,其余月份无明显地空间分异特征。中雨量在 2 月基本通过 $p=0.05$ 的显著性检验呈下降趋势,11 月基本通过 $p=0.01$ 的显著性检验呈上升趋势,12 月富口站通过 $p=0.05$ 的显著性检验呈上升趋势,其余月份无显著变化。

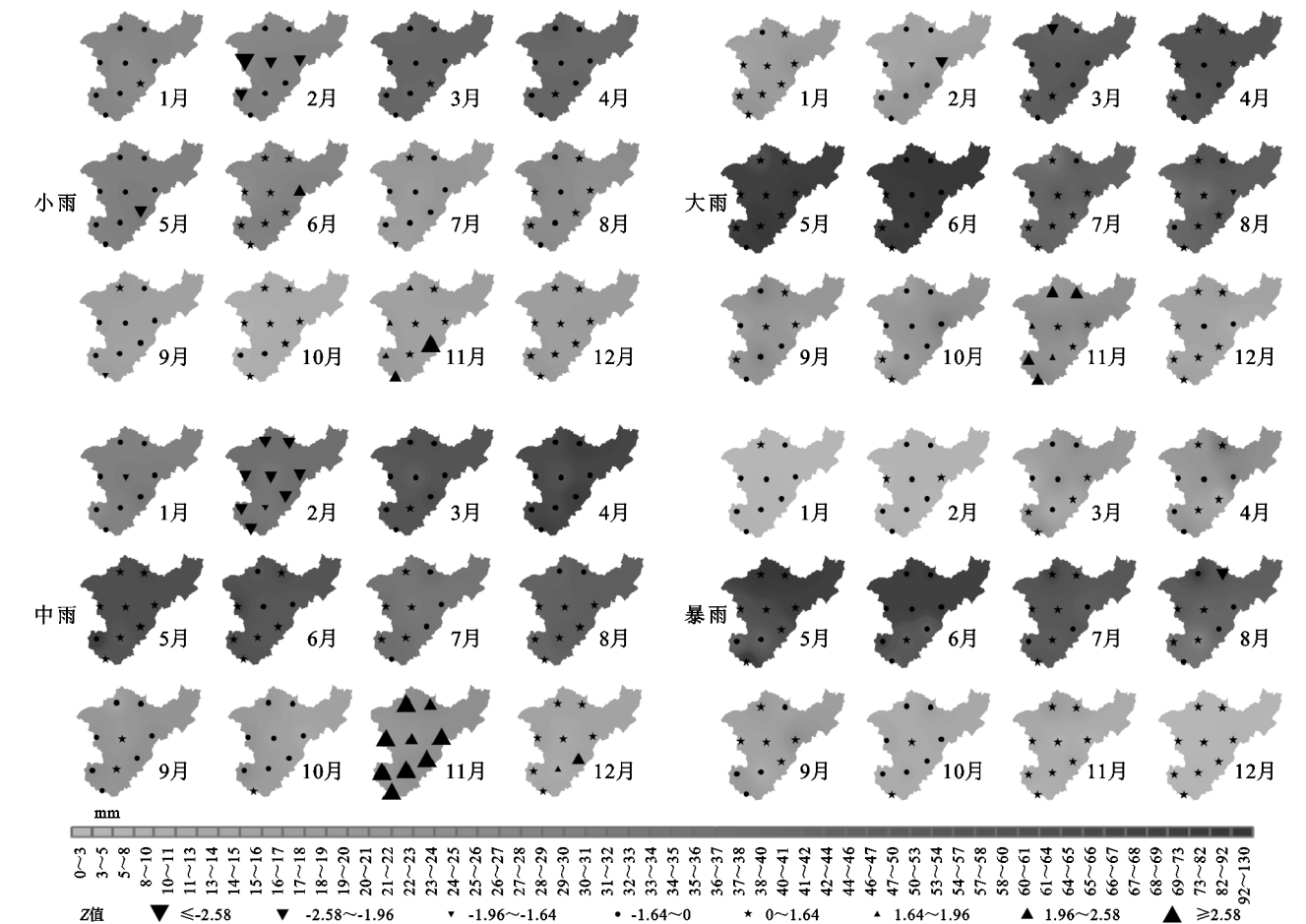


图 4 平江流域 1989—2018 年不同量级降雨及 Z 值月尺度上的空间分布

大雨量在 1—2 月、6—8 月、10 月总体表现出西低东高的分布特征,5 月在龙口附近形成 92~130 mm 的高值中心,其余月份未表现出明显地空间分异格局。大雨量在 2—3 月均有 1 个站点通过 $p=0.05$ 的显著性检验呈下降趋势,11 月有 4 个站点通过 $p=0.05$ 的显著性检验呈上升趋势,8 月、11 月均有少数站点通过 $p=0.10$ 的显著性检验分别呈下降、上升趋势,其余月份无显著变化。

暴雨量的空间分布在月尺度上较其他量级降雨高度统一且年内分配极度不均,雨量在 4—8 月总体呈现南低北高的分布特征但流域南端雨量较大,5 月

崇胜、城冈站附近共形成 1 个 82~92 mm 的高值中心,6 月崇胜、城冈站附近各形成 1 个 92~130 mm 的高值中心,7—8 月崇胜站附近形成高值中心。暴雨量仅 8 月城冈站通过 $p=0.05$ 的显著性检验呈下降趋势,其余月份无显著变化。

总而言之,月小雨量空间分布不明显,中、大雨量在多个月份表现出西低东高的分布特征但中雨规律性总体较差,暴雨量在 4—8 月雨量较大的月份呈现南低北高的分布特征且在流域北部多形成降雨高值中心。因此在总降雨中暴雨量虽不大,但其年内分配及空间分布极度不均造成雨量主要集中在 5—6 月流域北部。据

M-K 趋势检验显示,中雨量在月尺度上变化明显,2 月基本通过 $p=0.05$ 的显著性检验呈显著下降趋势、11 月基本通过 $p=0.01$ 的显著性检验呈显著上升趋势,小、大、暴雨量有部分地区呈显著变化。

2.3 逐小时降雨时空分布特征

本文参照方德贤等^[27](2008—2016 年重庆地区降水时空分布特征)的逐小时降雨的空间特征,且为更好地反映出小时尺度上的时空分布特征,将整个阶段分为前期(1989—1998 年)、中期(1999—2008 年)和后期(2009—2018 年)3 个阶段。

2.3.1 逐小时降雨时间分布特征 整体来看,逐小时降雨在 07:00—08:00 呈现先增后减的趋势,在 09:00—06:00(次日)呈现递增的趋势。统计表明(表 3),平江流域前、中、后期逐小时降雨变化明显,前期降雨主要集中在 07:00—08:00,中期降雨集中

在 07:00—08:00,15:00—19:00,后期降雨集中在 15:00—18:00。09:00 至次日 06:00 小时雨量随前、中、后期的发展有递增的现象,先由 0.99~1.83 mm 增至 1.32~2.03 mm 后增至 1.96~2.69 mm。而 07:00—08:00 雨量随时间的变化为先增后减的趋势,雨量由 1.73~2.24 mm 增至 2.46~2.80 mm 再减至 2.11~2.21 mm。以最值来看,07:00—08:00 雨量最大值变化最为显著,07:00 的小时雨量最大值为 4.64~4.67~2.26 mm,08:00 的小时雨量最大值为 5.60~4.67~2.97 mm,各时段小时雨量最小值变化相同均随时间递增。流域小时雨量标准差变化具有一致性,各时段雨量标准差在前期至后期的变化过程中均随时间减小,表明各时段降雨越来越稳定。因此,可将前、中、后期按照稳定性划分为不稳定期、较稳定期、稳定期。

表 3 平江流域 1989—2018 年逐小时降雨量基本特征 mm

开始 时间	1989—1998 年				1999—2008 年				2009—2018 年			
	最大值	最小值	均值	标准差	最大值	最小值	均值	标准差	最大值	最小值	均值	标准差
08:00	5.60	0.64	1.73	0.89	4.67	0.71	2.80	0.63	2.97	1.77	2.21	0.20
09:00	1.76	0.69	1.12	0.24	2.53	0.73	1.56	0.29	2.14	1.56	1.98	0.10
10:00	2.10	0.64	1.24	0.33	2.10	0.74	1.39	0.23	2.22	1.90	2.02	0.04
11:00	2.20	0.62	1.11	0.28	1.68	0.73	1.32	0.19	2.40	1.94	2.22	0.09
12:00	1.87	0.58	1.05	0.24	2.38	0.70	1.58	0.32	2.29	1.72	2.12	0.06
13:00	1.98	0.55	1.27	0.30	2.33	0.71	1.71	0.34	2.93	1.77	2.48	0.17
14:00	2.59	0.72	1.29	0.35	2.32	0.95	1.69	0.28	2.59	1.74	2.22	0.13
15:00	1.79	0.74	1.22	0.24	2.57	0.91	1.86	0.30	3.23	1.83	2.69	0.25
16:00	2.37	0.73	1.35	0.35	2.68	1.07	2.00	0.28	2.95	1.93	2.67	0.13
17:00	1.95	0.79	1.29	0.27	2.81	0.99	1.94	0.33	3.21	1.95	2.53	0.17
18:00	2.11	0.66	1.33	0.31	3.00	0.98	2.03	0.37	3.08	1.89	2.66	0.18
19:00	3.53	0.79	1.83	0.57	2.74	1.11	2.02	0.31	2.50	1.90	2.22	0.08
20:00	2.81	0.73	1.24	0.38	2.36	0.99	1.69	0.25	2.67	1.83	2.36	0.15
21:00	1.94	0.70	1.08	0.23	2.46	0.79	1.63	0.31	2.73	1.67	2.28	0.17
22:00	1.59	0.65	1.05	0.20	2.24	0.74	1.63	0.31	2.38	1.80	2.17	0.10
23:00	1.57	0.62	1.04	0.21	2.03	0.67	1.40	0.24	2.21	1.78	1.97	0.09
00:00	1.74	0.61	1.02	0.20	1.97	0.71	1.35	0.22	2.61	1.68	1.96	0.17
01:00	1.91	0.61	1.14	0.27	1.88	0.78	1.37	0.18	2.23	1.78	2.05	0.07
02:00	2.27	0.59	1.04	0.31	2.30	0.75	1.45	0.27	2.54	1.96	2.15	0.12
03:00	1.72	0.57	0.99	0.22	2.35	0.75	1.53	0.29	2.62	1.70	2.18	0.14
04:00	1.55	0.70	0.99	0.16	2.03	0.85	1.49	0.23	2.22	1.67	2.03	0.10
05:00	1.84	0.62	1.01	0.22	2.07	0.76	1.51	0.27	2.61	1.71	2.21	0.15
06:00	2.19	0.60	1.12	0.30	1.99	0.76	1.38	0.22	2.30	1.88	2.04	0.09
07:00	4.64	0.71	2.24	0.83	4.67	0.88	2.46	0.81	2.26	1.87	2.11	0.08

注:表中所示时段时间均为起始时间。

2.3.2 逐小时降雨空间分布特征 在李喻鑫等^[23]的研究中发现平江流域 1989—2018 年降雨侵蚀力在空间上具有自东北向中南递减,而后向西南递增的特

点,且最大值出现在流域北部城冈站附近,最小值出现在流域中南部龙口站附近。而在本文研究中发现,平江流域小时降雨量在前、中期的空间分布上也具有

相同特征。于前期,小时雨量在各时段上基本为自东北向西南表现出先减后增的空间分布特征,且各时段最大值与最小值出现的区域也分别为城冈站和龙口站附近,最突出的时段为08:00,其最大值为5.60 mm、最小值为0.73 mm;于中期,雨带相比与前期有向两侧扩散的趋势,因此有部分时段的空间分布特征有所改变,但总体上大多数时段也表现出自东北向西南表现出先减后增的空间分异格局,雨量最大值出现在08:00城冈站附近为4.67 mm,最小值出现在23:00田村在附近为0.67 mm。

与前、中期相比,后期降雨空间分布差异较小,雨带在空间上随时间的推移表现出自中部向两侧扩散的特征。08:00雨量增加了1.07 mm表现最为显著,此外15:00—18:00雨量增加了0.64~0.70 mm,其余时段雨量也均表现出增加趋势,说明前一中期各时段雨量在雨带由中部向两侧扩散的过程中呈增加趋势。中—后期雨量在雨带由中部向两侧扩散的过程中并非完全是呈增加趋势。纵观整个阶段,后期各时段降雨的空间分布呈现出非常均匀的状态,因此若分析流域降雨得空间分布差异应从前、中期入手。在研究前期,流域北部极易形成降雨高值中心,在11:00—12:00,20:00—21:00,02:00—06:00等多个时段形成唯一的高值中心,而在各时段流域南部降雨均较小。在中期,流域北部雨量仍然较大,在08:00城冈站雨量为4.67 mm,前、中期小时雨量主要集中在流域北部。

通过以上分析得:总体上,平江流域小时降雨随时间变化显著增加,造成这一结果的原因可能是研究时段恰好处于该流域降雨增加的时段。小时降雨在07:00—08:00呈现先增后减的趋势,在09:00—06:00(次日)呈现递增的趋势。降雨侵蚀力与小时雨量(前、中期)的空间分布具有一致性,共同表现为自东北向中南递减,而后向西南递增的特点,且最大值出现在流域北部城冈站附近,最小值出现在流域中南部龙口站附近。雨带在空间上随时间的推移表现出自中部向两侧扩散的特征,前、中期雨量集中在流域北部,后期雨量空间分布差异较小,整体来说1989—2018年小时雨量在流域北部相对集中。

2.4 不同量级降雨周期性分析

对平江流域1989—2018年不同量级降雨及总降雨的时间序列进行Morlet小波分析(图略),可以看出各量级降雨与总降雨的周期性变化。年小雨量小波方差在27~28 a尺度下表现最为显著,为主周期,期间经历2次“偏少—偏多”的交替循环。年中雨量小波方差在26~27 a尺度下表现最为显著,说明在26~27 a尺度下周期

震荡最剧烈,其次为7~8 a和4~5 a,分别为第一、二、三主周期且分别经历2,6,12次“偏少—偏多”的交替循环。年大雨量具有3个主周期,分别为26~27 a,7~8 a和12~13 a,其中26~27 a尺度下周期震荡最剧烈,期间经历了2次“偏少—偏多”的交替循环。年暴雨量小波方差图中存在3个峰值,其第一、二和三主周期为4~5 a,25~26 a和9~10 a,分别经历9,2次“偏少—偏多”的交替循环和5次偏多—偏少的交替循环。总降雨量小波方差存在3个峰值,其第一、二和三主周期分别为26~27 a,7~8 a和4~5 a,分别经历2,6,8次“偏少—偏多”的交替循环。

因小、中、大和暴雨雨量组成总降雨量,所以总降雨量受年中、大雨量的影响第一、二主周期表现为26~27 a,7~8 a,受年暴雨量的影响第三主周期表现为4~5 a。

3 结论

(1) 在1989—2018年流域小、中、大和暴雨多年均值分别为297.15 mm,473.57 mm,470.82 mm,344.34 mm,占年总雨量的比率分别为18.64%,29.76%,29.70%,21.90%,中、大雨占主导地位。各量级降雨年内分配不均,降雨主要集中在春、夏季,小雨集中在1—6月,峰值为3月,最小值为10月;中雨集中在2—8月,峰值为4月,最小值为12月;大雨集中在3—8月,峰值为6月,最小值为12月;暴雨集中在5—8月,起伏大,峰值为6月,最小值为1月。50 mm的暴雨重现期约为两年一遇,五十年、百年及千年一遇的雨量分别为155.2 mm,175.5 mm,240.3 mm。

(2) 暴雨较其余量级具有良好的空间分布规律,其在各时间尺度表现出明显的“南低北高”的空间分布特征尤其是春、夏两季表现突出;小雨、大雨在各尺度上总体为“西低东高”的空间分异格局,但在月尺度上小雨的空间分布较不明显其特征主要体现在年、季尺度上;中雨相对于其余量级降雨其规律性较差,在尺度上空间差异较大但流域中部降雨较小。

(3) 根据线性倾向估计显示,年小雨、年中雨量呈下降趋势,年大雨、年暴雨量呈上升趋势且年暴雨量上升幅度大,说明流域降雨有向极端降雨发展的趋势。据M-K检验结果,各量级降雨于年、季尺度上变化不明显仅少数站点通过 $p=0.01$ 或0.05的显著性检验;于月尺度上,中雨量变化显著,2月中雨量通过 $p=0.05$ 的显著性检验呈下降趋势,11月中雨量通过 $p=0.01$ 的显著性检验呈上升趋势,其余量级降雨变化趋势不明显。

(4) 平江流域 1989—2018 年小时降雨在 07:00—08:00 呈现先增后减的趋势,在 09:00—06:00(次日)呈现递增的趋势。本文小时雨量(前、中期)的空间分布与前人^[23]研究平江流域降雨侵蚀力的空间分布特征具有一致性,共同表现为自东北向中南递减,而后向西南递增的特点,且最大值出现在流域北部城冈站附近,最小值出现在流域中南部龙口站附近。雨带在空间上随时间的推移表现出自中部向两侧扩散的特征,雨量主要集中在流域北部。

(5) 不同量级降雨具有明显的周期性变化,总降雨量受中、大雨年降雨量的影响第一、二主周期表现为 26~27 a, 7~8 a, 受暴雨年降雨量的第一主周期的影响第三主周期表现为 4~5 a。

参考文献:

- [1] 孔锋,方建,吕丽莉,等.1961—2015 年中国不同强度降雨的变化趋势和波动特征[J].热带地理,2017,37(4):473-483.
- [2] 董满宇,田相佑,胡木兰,等.1960—2017 年太湖流域不同等级降水时空特征[J].热带地理,2020,40(6):1063-1074.
- [3] 王容,李相虎,薛晨阳,等.1960—2012 年鄱阳湖流域旱涝急转事件时空演变特征[J].湖泊科学,2020,32(1):207-222.
- [4] 张瑞涵,高涵,气候变化条件下黄河流域的旱涝特征[J].西安理工大学学报,2020,36(3):323-329.
- [5] 徐新创,张学珍,戴尔阜,等.1961—2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J].地理研究,2014,33(7):1335-1347.
- [6] 任国玉,战云健,任玉玉,等.中国大陆降水时空变异规律:I.气候学特征[J].水科学进展,2015,26(3):299-310.
- [7] 任国玉,任玉玉,战云健,等.中国大陆降水时空变异规律:II.现代变化趋势[J].水科学进展,2015,26(4):451-465.
- [8] 任国玉,柳艳菊,孙秀宝,等.中国大陆降水时空变异规律:III.趋势变化原因[J].水科学进展,2016,27(3):327-348.
- [9] 艾卉,张耀存,卢伟.我国东部地区夏季不同等级降水日数年际变化特征分析[J].气象科学,2009,29(3):299-306.
- [10] 宁亮,钱永甫.中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析[J].高原气象,2008(5):1010-1020.
- [11] 陈晓燕,尚可政,王式功,等.近 50 年中国不同强度降水日数时空变化特征[J].干旱区研究,2010,27(5):766-772.
- [12] 赵平伟,郭萍,李成武,等.云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2135-2141.
- [13] 朱继前,韩美,徐泽华,等.淮河流域不同量级降雨时空分布特征及其影响因素[J].水土保持研究,2019,26(4):87-95.
- [14] 江西省.江西河湖大典[M].武汉:长江出版社,2010.
- [15] 王永文,刘惠英.赣江上游章水流域 1955—2015 年降雨量时空变化[J].水土保持研究,2019,26(4):105-110.
- [16] 黄彬彬,王悦,龙昊宇,等.赣江流域气象要素变化及径流响应关系[J].南昌工程学院学报,2020,39(4):13-19.
- [17] 王永文,卢怡诗,刘裕辉.1961—2015 年赣江流域极端降水时空变化特征分析[J].南昌工程学院学报,2019,38(6):50-56.
- [18] 鲁向晖,张海娜,胡羊羊.赣江流域 1966—2015 年降水量多尺度时空变化特征分析[J].水土保持研究,2021,28(2):168-175.
- [19] 韩会明,郭红虎,游文荪,等.赣江流域降水时空分布特征[J].江西水利科技,2020,46(6):449-455.
- [20] 刘明霞,刘友存,刘燕,等.赣江流域气象因子时空变化特征与成因分析[J].江西理工大学学报,2020,41(3):52-60.
- [21] 张余庆,项琰,陈昌春,等.赣江流域旱涝时空变化特征研究[J].气象科学,2015,35(3):346-352.
- [22] 黄建刚,刘惠英.赣江主源贡水流域 1957—2016 年降雨特性[J].水土保持研究,2020,27(3):91-100.
- [23] 李喻鑫,刘惠英.赣江上游平江流域降雨侵蚀力的时空分布特征[J].水土保持通报,2020,40(1):1-8,23.
- [24] 史德明,杨艳生,黄心唐.从江西兴国县的水土流失谈我国南方的水土保持问题[J].水土保持通报,1981,6(4):23-28.
- [25] 全国水土保持 8 个重点治理区工程实施初见成效[J].自然资源,1990(4):39.
- [26] 周秋雪,刘莹,冯良敏,等.2008—2012 年四川强小时雨强的时空分布特征[J].高原气象,2015,34(5):1261-1269.
- [27] 方德贤,董新宁,邓承之,等.2008—2016 年重庆地区降水时空分布特征[J].大气科学,2020,44(2):327-340.
- [28] 陈炯,郑永光,张小玲,等.中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J].气象学报,2013,71(3):367-382.
- [29] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [30] 李森,夏军,陈社明,等.北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J].自然资源学报,2011,26(6):1001-1011.
- [31] 姜晓艳,刘树华,马明敏,等.东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析[J].地理研究,2009,28(2):354-362.
- [32] 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,2006,42(4):503-509.
- [33] 符静,易臻照,赵莎.基于 GIS 空间插值的降水分布模拟方法比较研究[J].中国农村水利水电,2021,459(1):94-97.
- [34] 蔡福,于贵瑞,祝青林,等.气象要素空间化方法精度的比较研究:以平均气温为例[J].资源科学,2005,27(5):173-179.