

赣江流域 1966—2015 年降水量多尺度 时空变化特征分析

鲁向晖^{1,2}, 张海娜^{1,2}, 胡羊羊^{2,3}

(1.南昌工程学院 江西省樟树繁育与开发利用工程研究中心, 南昌 330099;

2.南昌工程学院 水利与生态工程学院, 南昌 330099; 3.南昌工程学院 瑶湖学院, 南昌 330099)

摘 要:为研究全球气候变化影响下的赣江流域降水量时空分布特征,基于赣江流域及其周边的 27 个气象站 1966—2015 年逐日降水量数据,采用 Mann-kendall、累积距平法及 Morlet 小波分析等方法研究了不同时间尺度降水量变化特征。结果表明:赣江流域年、汛期、夏季和秋季降水量呈不显著的增加趋势($p>0.05$),而春季和冬季呈不显著的减少趋势($p>0.05$);不同时间尺度降水量均具有明显的阶段性特征,且进入 21 世纪 00 年代后降水量多为枯水阶段;赣江流域降水量变化主周期多在 8~10 a, 20~22 a, 26~30 a。赣江流域全年和春季降水量呈南少北多的分布格局,汛期和夏季降水量空间分布较均匀,无明显的空间差异,秋季降水量呈南北两端少、中部相对较多的分布格局,而冬季降水量呈由北向南递减的变化趋势。

关键词:降水量; 时空分布; 阶段性; 周期; 赣江流域

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0168-08

Spatiotemporal Variation Characteristics of Precipitation at Multi-scale in Ganjiang River Basin from 1966 to 2015

LU Xianghui^{1,2}, ZHANG Haina^{1,2}, HU Yangyang^{2,3}

(1.Jiangxi Province Engineering Research Center of Seed-breeding and Utilization of Camphor Tree, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2.College of Water and Ecology Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 3.Yaohu Honors College, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: In order to study the temporal and spatial distribution characteristics of precipitation in Ganjiang River Basin under the influence of global climate change, the spatiotemporal variation characteristics of precipitation in the Ganjiang River basin were investigated using mann-kendall, cumulative anomaly method and Morlet wavelet analysis based on the daily precipitation data of 27 meteorological stations within and around the basin. The results showed that the annual, flood season, summer and autumn precipitation in ganjiang river basin presented the insignificant increasing trend ($p>0.05$), and showed an insignificant decreasing trend in spring and winter ($p>0.05$); the precipitation of Ganjiang River Basin in different time scales had obvious stage characteristics, and the precipitation after the 2000's was mostly in the dry stages; the main cycles of precipitation change in Ganjiang River Basin were usually 8~10 years, 20~22 years, and 26~30 years; the annual and spring precipitation in Ganjiang River Basin was low in the southwest and high in the northeast; the distribution pattern of precipitation in autumn was high in the west and low in the east, while the change trend of precipitation in winter was decreasing from north to south; the distribution pattern of precipitation in flood and summer was uniform and had no distinct spatial difference.

Keywords: precipitation; temporal and spatial variation; stages; period; Ganjiang River

IPCC 第 4、5、6 次评估报告均指出全球气候变化环境下,陆面降水模式发生重大改变。全球的降水量在较长的时间尺度上随着气温的升高而增加,大部分地区干湿两季的降水量呈增大趋势;全球降水量在空间上的差异显著,未来一段时间内中、高纬度的降水量可能增加,且湿润地区与干旱地区的降水量差异将进一步增大;在热带及中纬度的陆地区域,极端降水的出现频率将增大^[1-3]。已有研究者对全球气候变化背景下的不同区域降水变化格局进行了分析:孙秀博等^[4]研究表明,全国在 20 世纪 60—80 年代和 2000 年以来处于少雨期,20 世纪 90 年代为多雨期;王润等^[5]利用文献综述法和 CMIP5 中的模式数据对汉江流域 1961—2049 年降水量变化进行了研究,发现汉江流域过去 50 年及未来的 30 年内,降水无显著的变化趋势;张宏利等^[6]运用累积距平曲线与信噪对比法对渭河流域时间尺度的降水特征进行了研究,近 50 a 降雨量具有明显的阶段性,但年降水量未发生突变;王丽娜等^[7]对海河流域近 50 a 降水量时空变化特征研究得出,海河流域年降水量呈小幅增大趋势,且四季变化不一致;王秀娜等^[8]利用 1960—2017 年河西地区日降水量资料分析结果认为,小雨降水日数增加但降雨强度呈下降趋势,小到中雨降水日数及强度均有增加趋势。已有的研究结果均表明,受全球气候变化的影响,区域降水量的空间分布格局也将会发生改变,且不同区域的变化趋势各不相同,目前尚未有赣江流域降水量受全球气候变化影响的特征研究,因此,本研究的开展,对于指导赣江流域农业生产应对全球气候变化、制定预防气候变化危害具有重要意义。

赣江是鄱阳湖流域的最大支流,是江西省土壤侵蚀最为严重的流域。近年来赣江流域季节性干旱频发,对农业生产及社会发展产生了较大的影响^[9],而降水量的时空演变则是影响赣江流域水土流失状况及季节性干旱灾害重要因素之一。本文以赣江流域 1966—2015 年的多站点逐日降水量资料,采用时间序列经典数理统计方法分析近 50 a 来降水量时空分布特征,揭示赣江流域降水量的变化规律,为水土保持措施布局和预防季节性干旱提供依据。

1 研究区概况

赣江流域面积为 83 500 km²,占鄱阳湖流域面积的 51.5%,流域东西宽度平均为 148 km,南北最长 550 km,流域形状为不规则四边形(图 1)。地貌类型主要有山地、丘陵、低丘、平原及水域,分别占流域面

积的 43.9%,20.8%,31.5%,3.9%。研究区地处亚热带湿润季风气候区,春夏主要是梅雨季节,秋冬两季降雨量较少,四季分明,无霜期较长,年降雨量处于 1 400~1 800 mm,多年平均降雨量 1 643.75 mm (1966—2015 年),多年平均气温为 17.8℃,多年平均蒸发量 1 550 mm。据《江西河湖大典》资料显示,赣江流域历史上特大旱灾发生在 1963 年、1978 年、1986 年、1991 年,近期主要大旱灾主要发生在 2003 年、2004 年、2007 年、2009 年、2011 年。

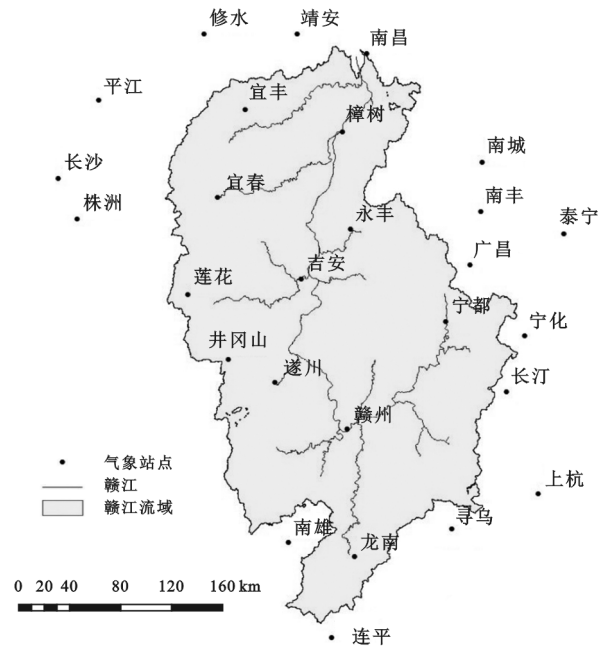


图 1 赣江流域气象站点分布

2 资料与方法

2.1 资料

分析资料为赣江流域内及其周边 27 个气象站 1966—2015 年日降水量数据,其中位于流域内的站点 11 个,位于流域周边的站点 16 个(图 1)。资料来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)。本文中有 15 个站点在 2014 年 5 月存在 1~6 日的数据缺失(绝大部分缺失两天),但由于占比较小($<0.1\%$),因此将缺失的日雨量按 0 计算。

2.2 方法

降水量的年际变化趋势采用一元线性回归和 Mann-Kendall(M-K)法分析^[10]。降水量阶段性分析采用累积距平法进行,采用克里金插值法(Kriging)对降水量空间变化进行分析。赣江流域季节划分时间为:春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—翌年 2 月),汛期指 4—9 月。由于一元线性回归、累积距平等方法已在时间序列分析中广泛使用,具体计算方法本文不在赘述。

采用 Matlab 小波分析工具箱中的 Morlet 小波为母函数对降水时间序列进行分析^[11],找出降水量变化的主要特征。本文先对降水资料作标准化处理,再进行小波分析,以降低噪声影响。

3 结果与分析

3.1 降水量年际变化

赣江流域 1966—2015 年多年平均降水量为 1 643.75 mm;汛期为 1 120.13 mm,占年降水量的 68.2%;春季、夏季、秋季、冬季的平均降水量为 633.90,567.09,

221.81,220.95 mm,分别占年降水量的 38.6%,34.5%,13.5%,13.2%(表 1)。秋季和冬季降水量的极值比和变异系数较大,年降水量的极值比和变异系数值最小,表明秋季和冬季的降水量年际波动剧烈,而年均降水量波动较小。年、汛期、夏季、秋季和冬季降水量的 M-K 检验统计量均大于 0 但小于 1.96,表明赣江流域 1966—2015 年的年、汛期、夏季、秋季和冬季降水量呈不显著的增加趋势;春季降水量 M-K 检验统计量小于 0 且大于-1.96,表明春季降水量呈不显著的减少趋势。

表 1 赣江流域 1966—2015 年不同时间尺度降水量变化特征值

指标	年	汛期	春	夏	秋	冬
平均值/mm	1643.75	1120.13	633.90	567.09	221.81	220.95
最大值(出现的年份)/mm	2085.47(1997)	1557.97(1973)	936.51(1975)	838.61(1997)	427.22(2015)	397.92(1998)
最小值(出现的年份)/mm	1173.70(1971)	731.40(1991)	348.59(2011)	327.13(1991)	76.18(1996)	88.25(1999)
极值比	1.78	2.13	2.69	2.56	5.61	4.51
变异系数/%	15.00	15.99	19.78	21.37	40.92	32.68
M-K 统计量	0.75	0.59	-0.03	1.37	0.40	0.18

线性回归分析显示,年、汛期、夏季、秋季和冬季的降水量增加速率分别为 1.74,0.81,1.69,0.40,0.34 mm/a,春季的降水量减小速率为 0.69 mm/a(图 2)。5 a 滑动平均值曲线显示:年尺度上,赣江流域近 50 a 的年降水量在 1966—1990 年波动较小,而 1991 年之

后波动较大,总体呈增加趋势。夏季和汛期降水量都在 1991 年以后出现较大波动变化,呈现上升趋势;春季、秋季、冬季降水量年际变化波动较小,其中,春季呈现出减少趋势,秋季和冬季呈现出增加趋势,但变化趋势均不显著。

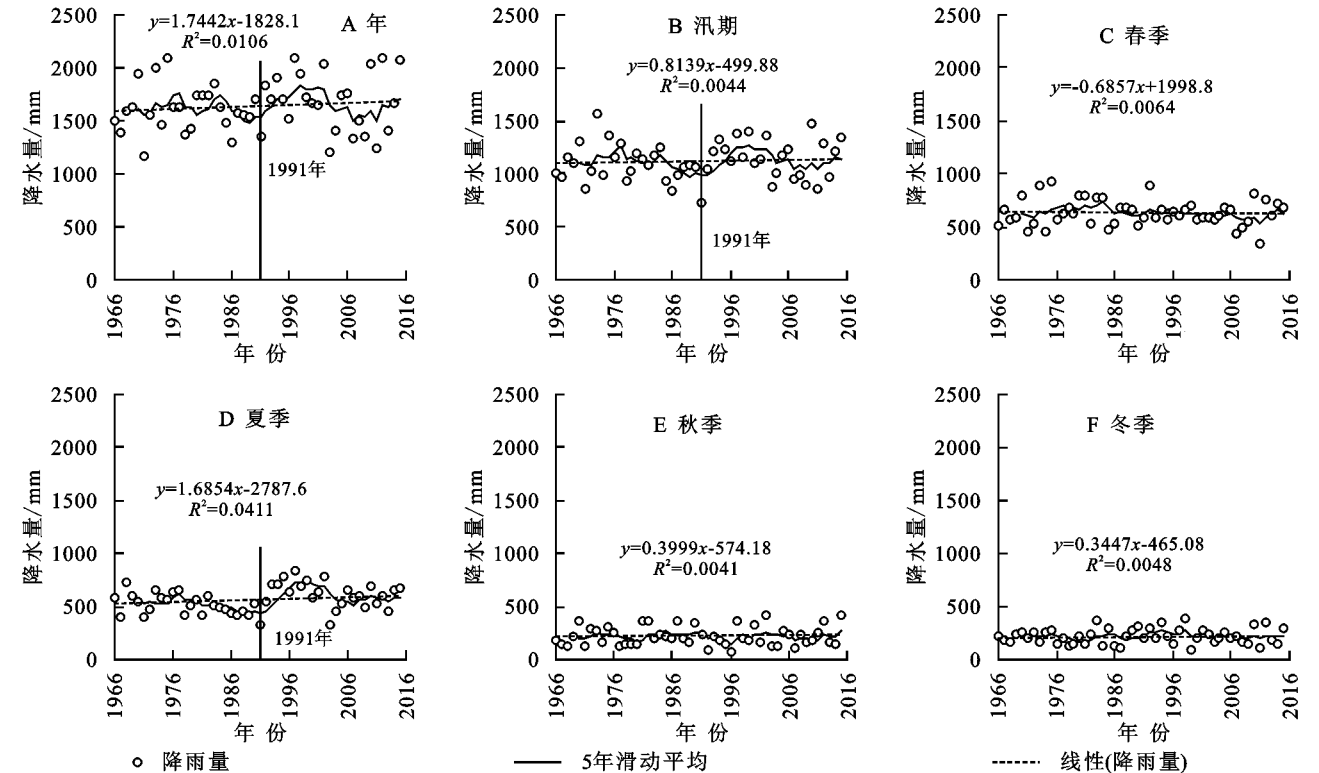


图 2 赣江流域 1966—2015 年不同时间尺度降水量年际变化

对研究区域中涉及到的 27 个站点年降水量变化趋势分析显示,大部分站点呈现增加趋势,且显著增

加的站点数达 12 个(44.4%),显著减少的站点仅 3 个(11.1%);汛期降水量以不显著增加趋势为主,站

点达 18 个,占比 66.7%;春季降水量不显著增加和显著增加的站点相同,各有 13 个,各占比 48.1%,无显著减少的站点;夏季、秋季和冬季降水量均以不显著减少为主,三者站点分别为 16,13,14 个,占比分别为 59.3%,48.1%,51.9%(图 3)。

3.2 降水量的阶段性变化

赣江流域 1966—2015 年降水量具有明显的阶段性特征,对不同时间尺度降水量进行累积距平分析(图 4),以持续 5 年以上的变化为基准,除秋季降水量无明显阶段性(整体表现为随机波动)外(图 4E),其他时间尺度降水量均具有明显的阶段特征。

春季和夏季可分为 4 个阶段(表 2),但时间存在差异。春季第一阶段 1966—1979 年,无明显阶段性变化,第二阶段 1980—1984 年呈现上升趋势,第三阶段 1985—2006 年无明显阶段性变化,第四阶段为 2007—2016 年,为先波动下降后上升趋势(图 4C);夏季 4 个阶段为 1966—1977 年、1978—1992 年、1993—

2002 年和 2003—2015 年,其中 1966—1977 年和 2003—2015 年两个阶段均无明显阶段性变化,1978—1992 年和 1993—2002 年两个阶段分别呈现为降低和上升趋势(图 4D)。冬季可分为 3 个阶段,为 1966—1987 年、1988—1997 年和 1998—2015 年,分别对应无明显阶段性变化、波动上升和波动下降趋势(图 4F)。年、汛期、夏季的降水变化趋势有一定的相似性。

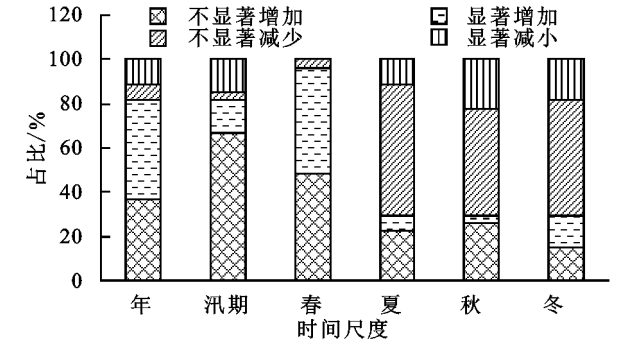


图 3 赣江流域 1966—2015 年各站点不同时间尺度降水量变化趋势统计

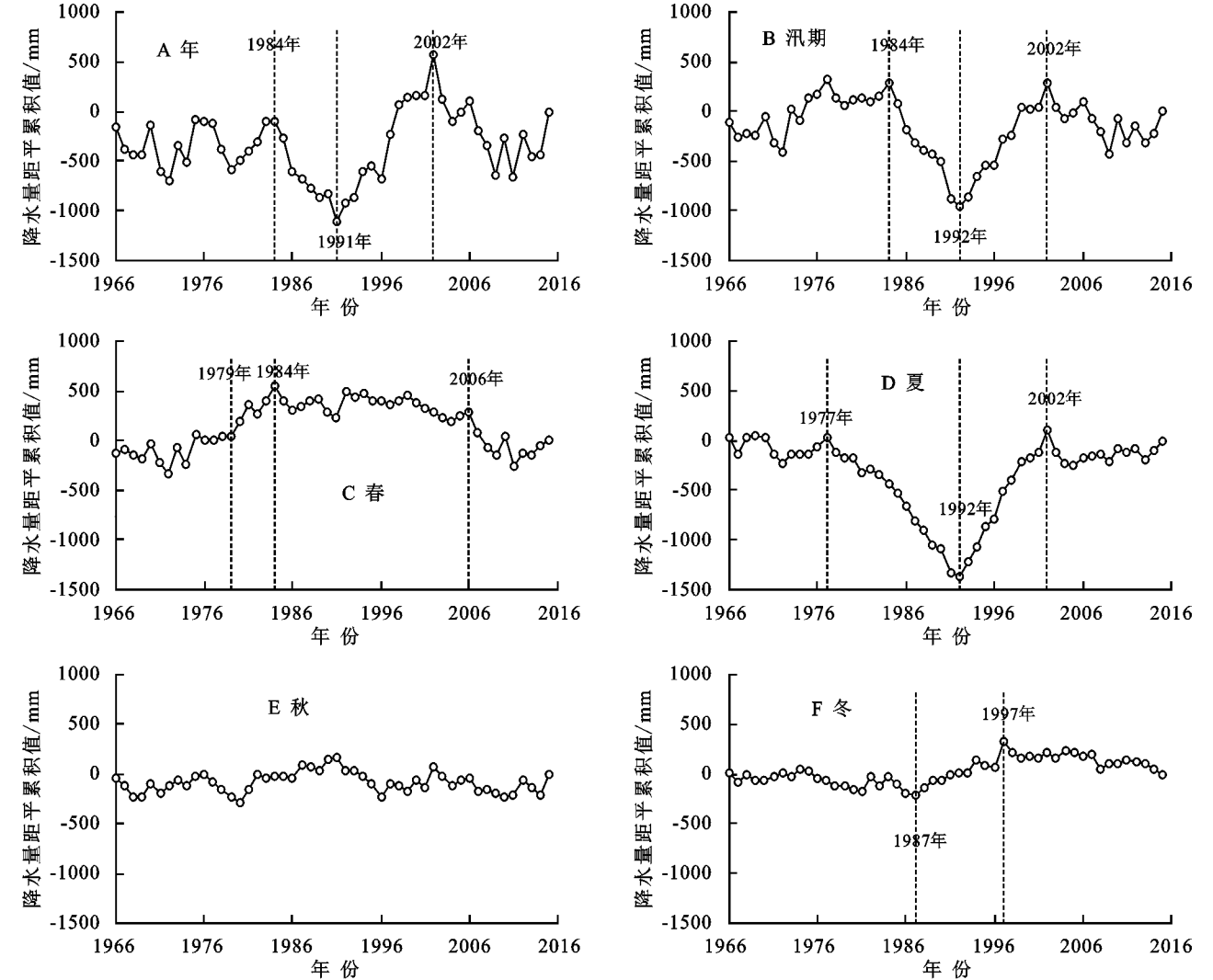


图 4 赣江流域 1966—2015 年不同时间尺度降水量累积距平曲线

年和汛期降水量可分为 4 个阶段(表 2,图 4A—B), 第一个阶段 1966—1984 年,其中年降水量表现为平水特

征,而汛期降水量在该阶段呈上升趋势,表现为丰水特点;年降水量第二阶段为 1985—1991 年,汛期降水量第二阶段为 1985—1992 年,降水量均有所下降,对应枯水特征;

年降水量第三阶段为 1992—2002 年,汛期降水量第三阶段为 1993—2002 年,该阶段二者降水量增加,为丰水阶段;第四阶段 2003—2015 年,降水量减少,为枯水阶段。

表 2 赣江流域 1966—2015 年不同时间尺度降水量阶段特征

时间	项目	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
年	时间	1966—1984 年	1985—1991 年	1992—2002 年	2003—2015 年
	平均值/mm	1637.41	1499.35	1795.85	1602.08
	特征	无明显趋势	下降趋势	上升趋势	波动下降
汛期	时间	1966—1984 年	1985—1992 年	1993—2002 年	2003—2015 年
	平均值/mm	1134.38	966.38	1244.21	1098.46
	特征	波动上升	下降趋势	上升趋势	无明显趋势
春	时间	1966—1979 年	1980—1984 年	1985—2006 年	2007—2015 年
	平均值/mm	635.49	737.66	621.80	603.35
	特征	无明显趋势	上升趋势	无明显趋势	先波动下降后上升趋势
夏	时间	1966—1977 年	1978—1992 年	1993—2002 年	2003—2015 年
	平均值/mm	569.66	474.29	714.41	558.48
	特征	无明显趋势	下降趋势	上升趋势	无明显趋势
冬	时间	1966—1987 年	1988—1997 年	1998—2015 年	
	平均值/mm	205.85	253.61	221.26	
	特征	无明显趋势	波动上升	波动下降	

3.3 降水量的周期变化

对赣江流域 1966—2015 年降水量进行小波分析,年降水量具有 8,22,32 a 的主变化周期(图 5A),短周期变化剧烈,长周期变化较为稳定,且存在 4 个降水周期丰枯交替年时间序列,分别为 1974—1980 年、1986—1990 年、1996—2001 年、2004—2011 年。汛期降水量具有 10,24,32 a 的主变化周期,长周期及短周期变化均具有明显的规律性,有 4 个丰枯交替年时间段(图 5B):1974—1978 年、1988—1990 年、1996—2002 年、2004—2010 年。春季降水量具有 14,20,26 a 的主变化周期(图 5C),长周期变化呈现不规律性,短周期变化波动不大,有 1 个丰枯交替年时间序列,即 1984—1988 年。夏季降水具有 26,30 a 的主变化周期(图 5D),整个时间序列的周期性变化规律性不明显,有主要两个丰枯交替年时间段:1986—1992 年、1994—1998 年。秋季降水量具有 7,14,20,30 a 的主变化周期(图 5E),长周期变化具有明显的不稳定性,短周期变化不显著,具有多个丰枯交替年时间段:1970—1980 年、1988—1992 年、1994—1996 年、2000—2004 年、2006—2012 年。冬季降水量的主变化周期不明显,降水量在近 50 a 内变化不大,不存在丰枯交替年时间序列(图 5F)。

3.4 降水量空间分布

赣江流域 1966—2015 年年均降水量呈现明显的

南部少、北部多的分布特征,宜丰、永丰、宁都一线以东是降水偏多区域(图 6A)。整体上,降水量少于多年平均值(1 643.75 mm)的地区占大多数,大于 1 700 mm 的地区极少,赣州及其周边地区降水量是全省最小的区域。汛期降水的空间分布总体上呈中部及西部地区少,东部、南部及北部外围地区多的分布特征(图 6B)。比较年降水量和汛期降水量的空间分布图发现,赣江流域降水量在这两个时期的空间分布具有一定的相识性。

春季降水的空间分布与全年降水的空间分布有一定的相似性,呈现南少北多的分布特征(图 6C),这也和春季降水量占全年比重较多有关(表 1)。总体上春季降水量以 600~700 mm 居多,主要分布于中部地区,春季的降水空间呈现不均匀分布。夏季降水的空间分布是全年中分布最均匀的一个季节(图 6D),降水量主要集中在 550~600 mm,仅赣州站及其周边区域降水量处于 500~550 mm,因此,夏季降水空间分布相对均匀,且波动不大。秋季和冬季降水量各站点相差不大,但两个季节的空间分布情况有所不同(图 6E 和 6F);秋季降水空间分布呈南北两端少,中部地区相对较多的格局;冬季降水空间分布则是呈由南向北逐步递增的趋势。总体上,赣江流域降水量在 4 个季节的空间分布特征表现出明显的差异。

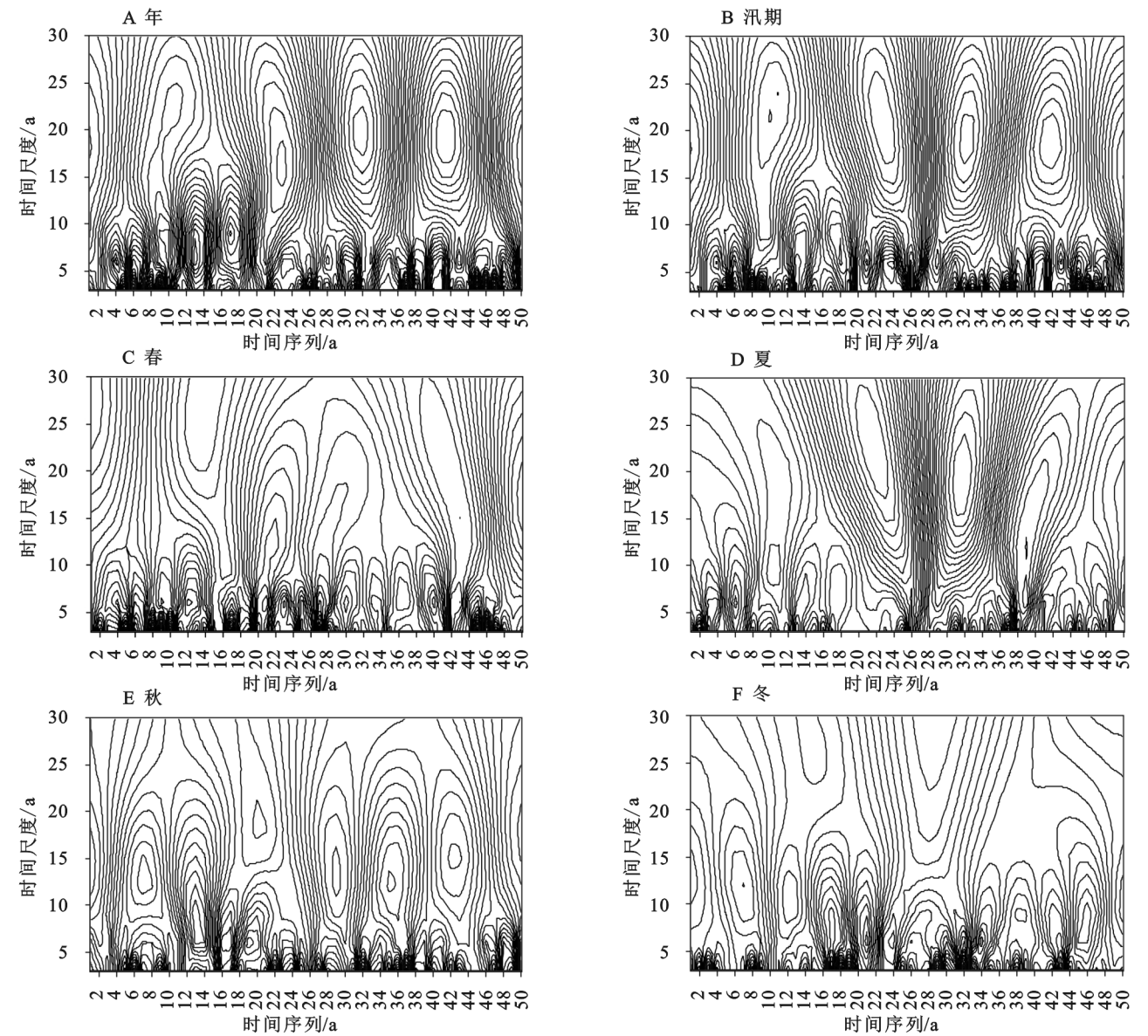


图5 赣江流域 1966—2015 年不同时间尺度降水量小波系数等值线

赣江流域降水空间分布的形成与多个因素有关,降水量与经度、纬度以及海拔的偏相关分析表明(表3),除秋季降水量外,其他尺度降水量均与经度显著相关;而只有年降水量与纬度显著相关;表明经度是影响赣江流域降水量空间分布的主要地理主轴。海拔对降水量亦有较大的影响,年、汛期和秋季降水量均呈显著的相关性,偏相关系数 0.6 以上,达极显著水平。

表3 1956—2015 年赣江流域 27 个气象站点不同时间尺度降水量偏相关系数

项目	降水量					
	年	汛期	春	夏	秋	冬
经度	0.69**	0.58**	0.78**	0.42*	-0.36	0.54**
纬度	0.41*	0.05	0.12	0.22	0.42	0.00
海拔	0.66**	0.63**	0.07	0.00	0.72**	0.12

注: * 表示达到 0.05 显著性水平, ** 表示达到 0.01 显著性水平, 其他表示不显著。

4 结 论

(1) 赣江流域 1966—2015 年多年平均降水量为 1 643.75 mm; 汛期为 1 120.13 mm, 占年降水量的 68.2%; 春季、夏季、秋季、冬季的平均降水量为 633.90, 567.09, 221.81, 220.95 mm, 分别占年降水量的 38.6%, 34.5%, 13.5%, 13.2%。秋季和冬季的降水量年际波动剧烈, 而年均降水量波动较小。年、汛期、夏季、秋季和冬季降水量呈不显著的增加趋势; 春季和冬季的降水量呈不显著的减少趋势。赣江流域 27 个雨量站点年降水量显著增加的站点数达 12 个, 显著减少的站点仅 3 个; 汛期降水量以不显著增加趋势为主, 站点达 18 个; 春季降水量显著增加的站点有 13 个, 无显著减少的站点; 夏季、秋季和冬季降水量均以不显著减少为主, 站点分别为 16, 13, 14 个。

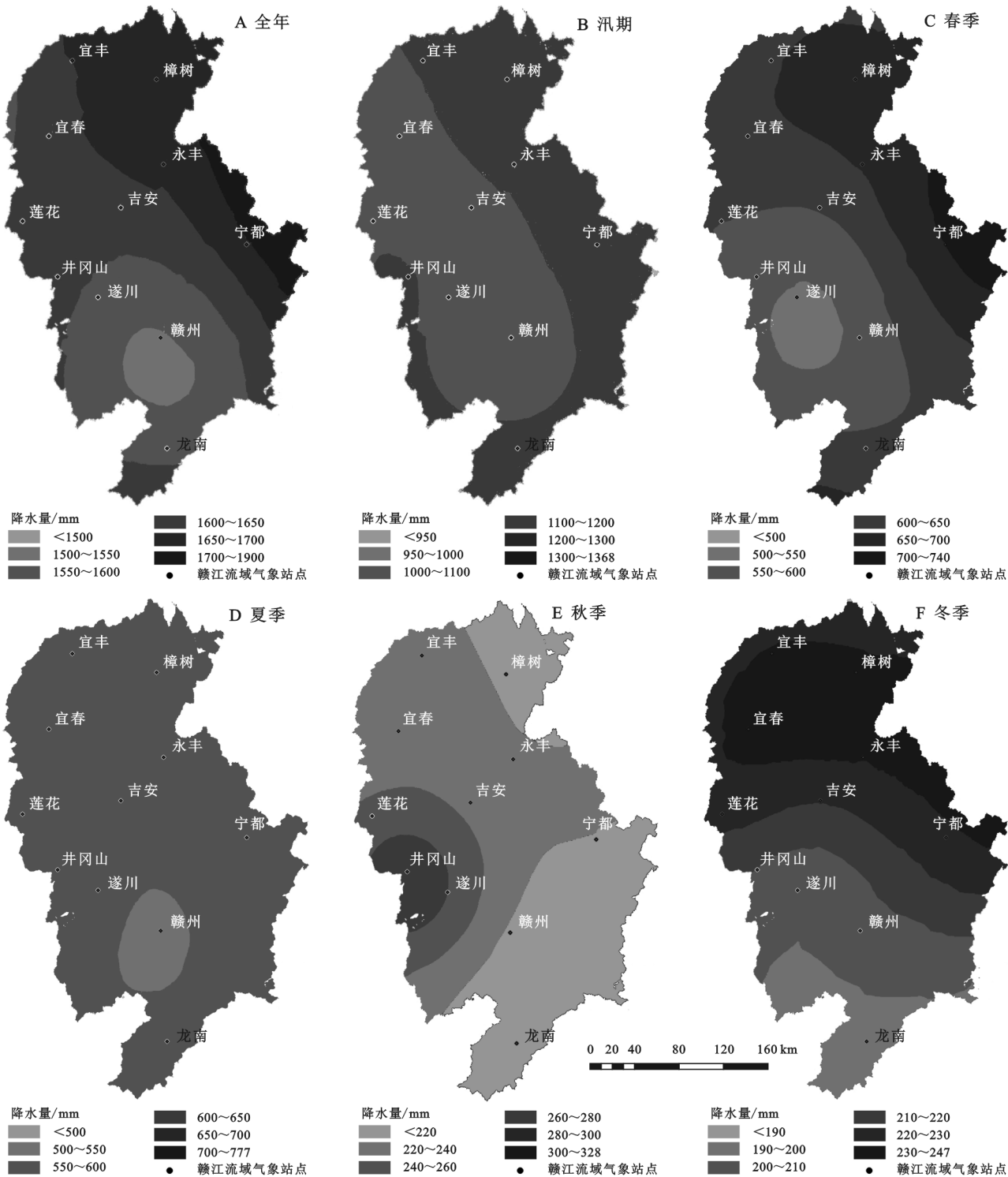


图 6 赣江流域 1966—2015 年不同时期降水量空间分布

(2) 1966—2015 年赣江流域降水量变化在年、汛期、夏季、秋季与春季、冬季分别呈不显著的增加与减少趋势($p>0.05$);赣江流域不同时间尺度的降水量均具明显的阶段性,年和汛期降水量均可分为 1966—1984 年(丰水),1985—1991 年(汛期为 1992 年)(枯水),1992(汛期为 1993 年)—2002 年(丰水)和 2003—2015 年(枯水)4 个阶段。春季和夏季降水量具有 4 个变化阶段,冬季降水量具有 3 个阶段的变

化特征,而秋季降水量变化整体以随机性为主。

(3) 赣江流域 1966—2015 年降雨量的主变化周期在年际为 8,22,32 a,汛期为 10,24,32 a;春季、夏季和秋季的降水量主周期分别为 14,20,26 a 和 26,30 a 以及 7,14,20,30 a,而冬季降水无变化周期。

(4) 1966—2015 年赣江流域的全年和春季降水量呈南少北多的分布格局;汛期和夏季降水量空间分布较均匀,无明显的空间差异;秋季降水量呈南北两

端少、中部多的分布格局,而冬季降水量呈由北向南递减的变化趋势。不同尺度降水量受经度和海拔变化的影响较大,受纬度变化影响较小。

参考文献:

[1] 董思言,高学杰.长期气候变化:IPCC 第五次评估报告解读[J].气候变化研究进展,2014,10(1):56-59.

[2] 罗亚丽.极端天气和气候事件的变化[J].气候变化研究进展,2012,8(2):90-98.

[3] 龙浠玉,张新主,章新平,等.洞庭湖流域雨季极端降水事件的环流演变特征分析[J].水土保持研究,2020,27(2):158-164,177.

[4] 孙秀博,李清泉,魏敏.1960—2009 年中国年降水量的年际及年代际变化特征[J].气象,2012,38(12):1464-1472.

[5] 王润,张奇谋,李娜,等.1961—2049 年汉江流域降水量变化

研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(11):2743-2752.

[6] 张宏利,陈豫,任广鑫,等.近 50 年来渭河流域降水变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2008,26(4):236-241.

[7] 王利娜,朱厚华,鲁帆,等.海河流域近 50 年降水量时空变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):242-246.

[8] 王秀娜,丁永建,王建,等.1960—2017 年河西地区降水时空变化特征[J].冰川冻土,2020,42(2).DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1151.

[9] 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.

[10] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J].Journal of Hydrology, 2008,349(3/4).350-363.

[11] 易华,舒红,张涛,等.Morlet 小波在确定局部周期中的应用[J].应用数学,2010,23(2):395-400.



(上接第 167 页)

[3] Chen Y N, Li B F, Li Z, et al. Water resource formation and conversion and water security in arid region of Northwest China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26(7):939-952.

[4] 马兴旺,李保国,吴春荣,等.民勤绿洲现状土地利用模式下地下水位时空变化的预测[J].水科学进展,2003,14(1):85-90.

[5] 冯起,程国栋.我国沙地水分分布状况及其意义[J].土壤学报,1999,36(5):225-236.

[6] 李卫,冯伟,杨文斌,等.流动沙丘水分深层入渗量与降雨的关系[J].水科学进展,2015,26(6):779-786.

[7] 袁剑舫,周月华.黏土夹层对地下水上升运行的影响[J].土壤学报,1980,17(1):94-99.

[8] 李雪垠,李朝霞,王天巍,等.紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J].水科学进展,2016,27(5):662-669.

[9] 卢修元,魏新平,邱玥,等.砂土中黏土夹层对入渗过程影响的试验分析[J].灌溉排水学报,2009,28(6):39-41.

[10] Betti G, Grant C D, Murray R S, et al. Size of subsoil clods affects soil-water availability in sand-clay mixtures[J]. Soil Research, 2016,54(3):276-290.

[11] 陈丽娟,冯起,王昱,等.微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J].农业工程学报,2012,28(8):44-51.

[12] 涂安国.层状土壤水分入渗与溶质运移研究进展[J].江西农业大学学报,2017,39(4):818-825.

[13] 余世鹏,杨劲松,刘广明.易盐渍区黏土夹层对土壤水盐运动的影响特征[J].水科学进展,2011,22(4):495-501.

[14] 赵宇龙,李明思,陈绍民,等.滴灌条件下层状土壤滞盐作用的试验研究[J].灌溉排水学报,2015,34(6):29-34.

[15] 彭振阳,伍靖伟,黄介生.应用连续混合器模型模拟非饱和土壤盐分淋洗过程[J].水科学进展,2015,26(4):550-559.

[16] 孙程鹏,赵文智,杨淇越.绿洲边缘夹粘沙丘持水特性[J].生态学报,2018,38(11):3879-3888.

[17] 柴成武,徐先英,唐卫东,等.石羊河流域荒漠区主要固沙植物根系研究[J].西北林学院学报,2009,24(4):21-26.

[18] Huang M, Barbour S L, Elshorbagy A, et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils[J]. Can. J. Soil Sci, 2011,91(2):169-183.

[19] 贾宝全,慈龙骏,蔡体久,等.绿洲—荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究[J].植物生态学报,2002,26(2):203-208.

[20] Zhou H, Zhao W Z, Yang Q Y. Root biomass distribution of planted *haloxylon ammodendron* in a duplex soil in an oasis: desert boundary area [J]. Ecological Research, 2016,31(5):673-681.

[21] 王兵,崔向慧,白秀兰,等.荒漠化地区土壤水分时空格局及其动态规律研究[J].林业科学研究,2002,15(2):143-149.

[22] 郑颖,赵文智,张格非.基于 V-Hegyí 竞争指数的绿洲边缘人工固沙植被梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的种群竞争[J].中国沙漠,2017,37(6):1127-1134.

[23] 徐燕,易卫东,卓国文.基于信号波形幅度检测放大技术的电容式土壤水分传感器研究[J].传感技术学报,2013,26(6):779-784.