

1970~2014 年长江流域极端降水过程的时空变化研究

时光训^{1,2,3}, 刘 健^{1,2}, 马 力³, 李兰晖⁴, 陈 倩³, 张华敏³

(1.虚拟地理环境教育部重点实验室,江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点,江苏 南京 210023;

2.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023;

3.江西师范大学鄱阳湖湿地与流域教育部重点实验室/地理与环境学院,江西 南昌 330022;

4.中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室,北京 100101)

摘 要:基于长江流域 131 个气象站数据,利用 Mann-Kendall 非参数检验、主成分分析及 R/S 分析等方法分析了长江流域极端降水的时空变化特征。结果表明:①主要强降水指数变化均呈现增加趋势。20 世纪 70 年代主要极端降水指数呈持续下降趋势,20 世纪 80 年代、90 年代和 2000 年以后降水指数变化趋势年代差异增大,稳定性差。②强降水在太湖流域、鄱阳湖流域大部分地区和洞庭湖流域的下游地区呈显著增加。③除了弱降水指数外,各极端降水指数之间具有显著的相关性。④长江流域降水的主要特点在于弱降水变化不显著,强降水变化幅度较大,降水过程不稳定,容易发生洪涝灾害。

关键词:长江流域;极端降水;变化趋势;时空特征

中图分类号:TV122

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)04-0077-09

1 引言

极端降水事件对农业、生态环境及基础设施极易造成危害,甚至威胁到人类的生命安全^[1]。IPCC(2013)第一工作组第五次评估报告指出,最近的 3 个 10 年比 1850 年以来的任何一个 10 年都偏暖,在北半球,1983~2012 年可能是过去 1400 年中最暖的 30 年^[2]。全球气候变暖导致降水的时空特征也发生明显变化。有研究表明,温室气体过度排放导致地表温度连年升高,使降水量时空分布发生显著变异^[3]。观测研究也表明,我国的极端强降水平均强度有增加的趋势,极端强降水事件也趋于增多^[4-6]。

极端降水事件频发,已引起越来越多学者的关注^[7-9]。众多学者对我国不同区域的极端降水进行了分析:发现西北地区^[10]、秦岭-淮河南北^[11]、珠江流域^[12]、黄河流域^[13]均发现极端降水量、降水频数均存在明显的地域分异特征。此外,除黄河流域极端降水量、降水频数和降水强度呈下降趋势外,其余研究区域,极端降

水量、降水频数和降水强度在空间上均呈上升趋势。杨金虎等^[5]从全国尺度上进行研究,发现中国年极端降水事件的时间变化存在着空间差异性,东北、西北部、华北表现为减少趋势,而西北西部、长江中下游、华南及青藏高原表现为增加趋势,中国各分区年极端降水事件的周期振荡不完全一致。以上研究均表明,随着全球气候变暖,我国的降水变化存在明显的地域分异特征,加强区域及流域降水特征的研究,对于气候灾害的监测和预防具有非常重要的意义。

极端降水的频率和强度的变化是导致洪涝灾害发生的两个重要指标^[14-15]。我国深受东亚季风活动影响,东部地区极易发生大范围洪涝灾害,尤以江淮流域最为突出^[16]。当出现丰梅和厄尔尼诺时,长江流域极易出现区域性大洪水^[17-18]。不仅如此,长江流域的川渝等地区还深受西南季风的影响,秋雨盛行。整个流域除川西高原和长江源头等一些高海拔地区外,大部分地区属于亚热带季风气候,降水变率大,暴雨是该区域夏半年较为多发的灾害性天气。平凡等^[19]研究

收稿日期:2016-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41420104002,41371209);国家重点研发计划项目(2016YFA0600401);江苏省高校自然科学研究重大项目(14KJA170002);江苏高校优势学科建设项目(164320H116)

作者简介:时光训(1989-),男,黑龙江穆棱人,博士研究生,主要从事气候模拟和全球变化研究工作。E-mail:Shi7guang@163.com

通讯作者:刘健(1966-),女,四川合江人,教授,博导,主要从事气候模拟和全球变化研究工作。E-mail:jliu@njnu.com.cn

发现 20 世纪 90 年代以来长江流域汛期的降水量明显增多。姜彤等^[20]研究认为,在未来气候变暖条件下,长江流域降水极值重现期出现的这种变化趋势将出现增加趋势。进入 21 世纪以来,长江流域夏季多雨带频繁出现,2007 年、2010 年和 2012 年长江流域出现了区域性的大洪水,给该地区人民的生命财产和社会经济带来重大的损失^[21~23]。虽然有学者已经对长江流域极端降水做了一定研究,但研究时段较早,缺乏近 10 年的变化特征,且分析的指标相对较少。因此,有必要对长江流域开展更为详尽的极端降水特征分析。

2 研究区域概况

长江流域(90°33′~122°25′E,24°30′~35°45′N)(图1)是指长江干流和支流流经的广大区域,占中国国土面积的 18.8%,流域地形起伏较大,西高东低,呈三级阶梯状。除川西高原和长江源头等一些高海拔地区外,流域大部分地区属于中、北亚热带季风气候。流域降水主要受东南和西南季风的影响,年内降水分布不均,受江淮准静止锋、西太平洋副热带高压等天气系统的综合影响,降水时空变化特征复杂^[24]。长江流域是中国经济发展的主驱动轴,长江经济带已同东部沿海共同构成中国倒“T”型经济的主轴,在我国社会经济发展中具有极其重要的战略地位^[25]。不仅如此,流域内有六大商品粮基地,对我国粮食安全保障发挥着重要作用。

3 数据与研究方法

3.1 数据来源及预处理

本研究选取流域内 131 个气象站点 1970~2014

年逐日降水实测数(图 1)。各站点资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),对于极个别缺失站点原则要求对一个月内缺测数据少于 7 天的站点进行插补^[26]。

3.2 研究方法

本文选取世界气象组织(WMO)气象学委员会(CCL)及气候变化和可预报性研究计划(CLLVAR)所推荐的 14 个极端降水指数^[14,26~27](表 1)。该方法已被广泛应用于极端气候事件研究中。利用 Mann-Kendall 非参数检验法^[28]分析研究区各极端降水指数的变化趋势,并且设置显著性水平为 $P<0.05$ 。为了了解研究区极端降水事件与总降水量之间的关系,验证极端降水指数是否对总降水量有指示作用,文中对降水指数与年降水量进行了主成分分析与相关性分析^[4,29]。在探讨流域未来极端降水指数的变化趋势时,采用了 R/S 分析,该方法是一种处理时间序列的分型结构分析方法:①当 $H=0.5$ 时,各项指标完全独立;②当

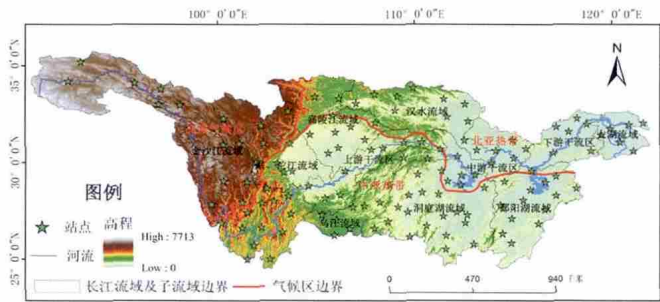


图 1 研究区地形特征及气象站点分布图
Fig.1 The topographic feature and spatial distribution of the meteorological stations in the study area.

表1 14个极端降水指数定义
Table1 The definition of the 14 extreme precipitation indices.

定义(简称)	单位
年内日降水量连续低于 1mm 的日数最大值(CDD)	d
年内日降水量连续≥1mm 的日数最大值(CWD)	d
年内日降水量连续≥25mm 降水日数(R25)	d
月内 1 日降水量最大值(Rx1day)	mm
年内日降水量≥1mm 的降水量之和(PRCPTOT)	mm
年内 4~9 月(生长季节)降水量之和(GPRCP)	mm
年内日降水量高于标准时段日降水量序列第 95 百分位值的日数之和(R95)	d
年内日降水量高于标准时段日降水量序列第 95 百分位值的降水量之和(R95P)	mm
年内日降水量高于标准时段日降水量序列第 99 百分位值的降水量之和(R99P)	mm
年内日降水量高于标准时段日降水量序列第 99 百分位值的日数之和(R99)	d
年内日降水量≥1mm 的日数(RR1)	d
年内日降水量≥5mm 的日数(RR5)	d
年内日降水量≥10mm 的日数(RR10)	d
年内日降水量之和与日降水量≥1mm 的日数之比(SDII)	mm/d

0.5<H<1 时,表征未来的趋势与过去一致,即过程具有持续性和长期相关性,H 越接近 1, 表征持续越强;③当 0<H<0.5 时,表征未来趋势与过去相反,出现均值回复过程^[30],越接近 0,反持续性越强。

4 结果分析

4.1 长江流域极端降水时间序列变化特征

长江流域极端降水指数年际、代际变化差异明显(表 2)。1970~2014 年,CDD、R25、Rx1day、R95、R95P、R99P、R99 和 SDII 呈现增加趋势。其中,Rx1day、SDII 分别以 1.85 (mm/10a)、0.18 (mm/d/10a) 增加,均通过置信度 $P<0.05$ 显著性水平检验;CWD、PRCPTOT、GPRCP、RR1、RR5、RR10 呈减少趋势,CWD、RR1 分别以-0.2、-2.32(d/10a)下降,均通过 $P<0.05$ 显著性水平检验。

由表 2 可知,20 世纪 70~80 年代绝大多数极端降水指数呈下降趋势,区域降水减少。20 世纪 90 年代绝大部分极端降水指数增加趋势显著,原因可能是 20 世纪 90 年代青藏高原冬、春季积雪偏多,中东部气温偏低,导致海陆间热力差异减弱^[31-32],同时赤道中东太平洋春夏季海温在 20 世纪 90 年代出现了一次显著升高。高原热源的减弱和海温的增加共同导致东亚地区的海陆热力差异减小,而这直接影响了亚洲夏季风强度的偏弱^[33]。弱的东亚夏季风环流致使中国东部夏季

降水在华北和华南减小,而在长江中下游地区增加^[31]。2000 年以后降水指数除 CWD、R25、Rx1day、R95、R95P、R99P、R99、SDII 持续上升以外,其余以下降趋势为主。

4.2 极端降水指数的变化的空间分布

4.2.1 干旱或湿润指数变化的空间分布

CDD、CWD 和 RR1、RR5、RR10 分别能够表征干旱和湿润状态,其变化具有明显的空间差异性(图 2)。具体而言,流域内有 65 个站点 CDD 呈下降趋势,空间上主要集中分布在乌江流域、洞庭湖流域的下游地区、下游干流区、太湖流域,其中,有 3 个站点通过了显著性水平检验 ($P<0.05$);有 66 个站点 CDD 呈上升趋势,在金沙江流域的南部、上游干流区、汉水流域的上游、洞庭湖流域和鄱阳湖流域上游地区 CDD 整体上升趋势明显,其中,有 5 站点通过显著性水平检验 ($P<0.05$)。流域内有 105 个气象站点 CWD 呈下降趋势,变化幅度主要集中在-0.5~0d/10a 之间,其中有 19 个站点下降趋势明显,通过显著性水平检验 ($P<0.05$)。流域内分别有 96 个站点的 RR1、RR5、RR10 呈下降趋势,且通过显著性水平检验的站点分别为 47、19、19 个($P<0.05$)。增加地区主要集中分布在金沙江流域的上游地区,其余绝大部分地区呈下降趋势。就下降幅度来看,表现出 $RR1>RR5>RR10$,呈下降地区的分布范围大小也表现出 $RR1>RR5>RR10$ 。

表2 1970~2014年长江流域14个极端降水指数检验
Table2 The 14 extreme precipitation indices of Mann-Kendall test for the Yangtze River basin during 1970-2014

指数	M-K 趋势值				
	年代				年际
	70s	80s	90s	2000s	1970~2014
CDD(d/10a)	4.30	0.46	0.84	2.60	0.23
CWD(d/10a)	-0.93	-0.73	-0.43	-0.23	-0.20**
R25(d/10a)	-0.75	-1.30	2.32	0.15	0.03
Rx1day(mm/10a)	-3.82	-5.83	20.08	2.83	1.85*
PRCPTOT(mm/10a)	-68.70	-129.51	107.74	-30.30	-7.89
GPRCP(mm/10a)	-77.50	-46.58	191.16	11.01	-8.73
R95(d/10a)	-1.13	-1.20	0.94	0.27	0.05
R95P(mm/10a)	-41.23	-34.35	134.29	25.98	7.15
R99P(mm/10a)	-0.31	0.28	1.03	0.54	0.09
R99(d/10a)	-16.60	18.78	125.18	37.80	7.66
RR1(d/10a)	-8.63	-8.46	-4.48	-6.89	-2.32**
RR5(d/10a)	-3.46	-5.67	-0.60	-3.59	-0.90
RR10(d/10a)	-2.52	-3.54	-0.02	-1.08	-0.52
SDII(mm/d/10a)	0.33	0.48	1.22	0.42	0.18**

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$

4.2.2 中等强度及较强降水指数的空间分布

R25 和 Rx1day 能够表征中等强度及较强降水特征,其变化趋势特征在流域内具有明显的地区差异性(图3)。流域内 62 个站点 R25 呈下降趋势,下降地区主要集中在上游干流区和乌江流域,整体下降幅度超过 0.37d/10a;流域内有 69 个站点 R25 呈上升趋势,集中分布在鄱阳湖流域中游地区和洞庭湖流域下游的绝大部分地区,整体上升幅度在 0.36d/10a 以上。流域内有 90 个站点 Rx1day 呈增加趋势,其中有 11 个站点通过 $P<0.05$ 的显著性检验。主要分布在太湖流域、鄱阳

湖流域、洞庭湖流域的下游地区;其余 41 个站点 Rx1day 呈下降趋势,主要分布在汉水流域的中游地区,大巴山西侧一线、洞庭湖流域内凯里-道县-郴州一带,整体下降幅度达到 $-3.2\text{mm}/10\text{a}$ 以上。

4.2.3 强降水指数变化的空间特征布

PRCPTOT、GPRCP、R95、R95P、R99 和 R99P 为表征强降水过程的指数,其变化具有明显的空间差异性(图4)。流域内有 76 个站点 PRCPTOT 和 GPRCP 呈下降趋势,主要分在布乌江流域、上游干流区、云贵高原的部分地区以及洞庭湖上游地区和鄱阳湖的上游地

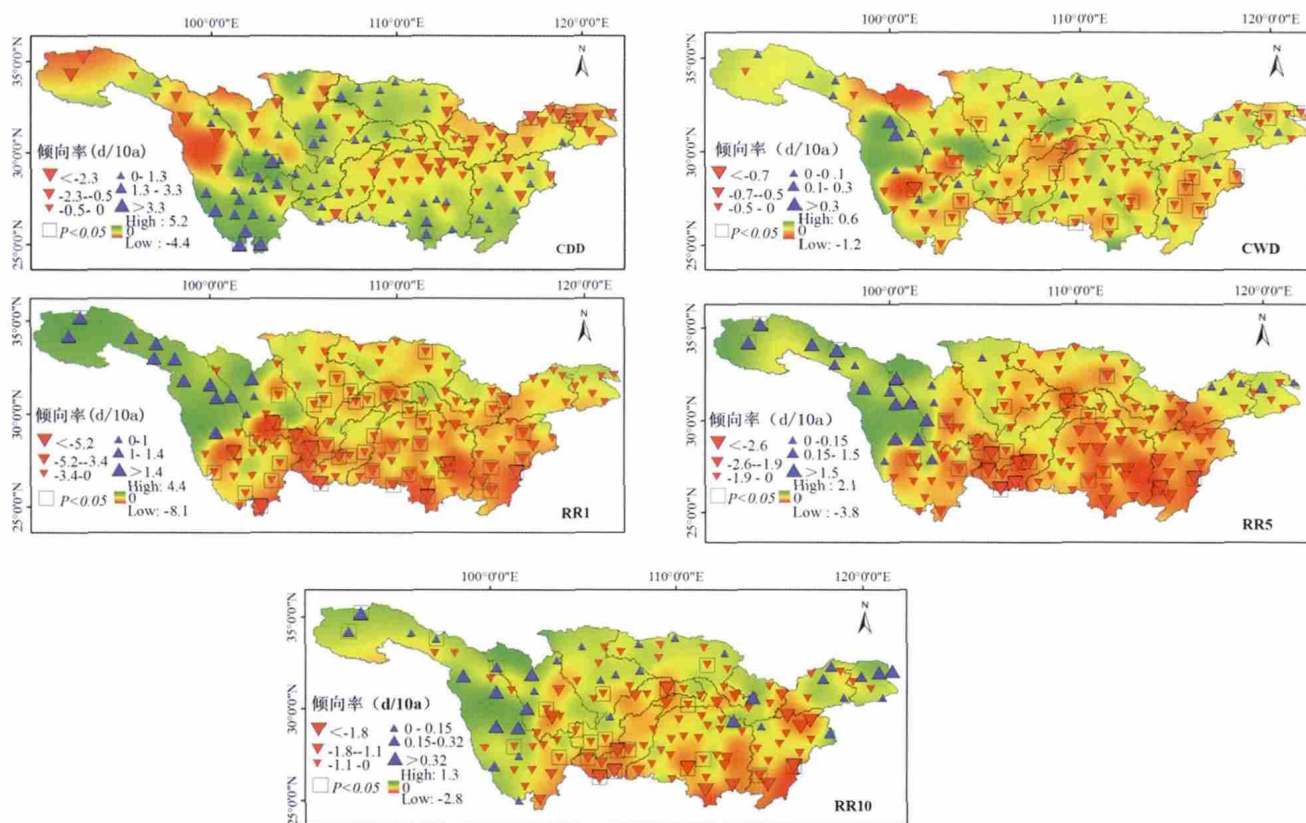


图2 干旱或湿润指数变化的空间分布及显著性水平

Fig.2 The space distribution of the drought or wetness indices with significance tests

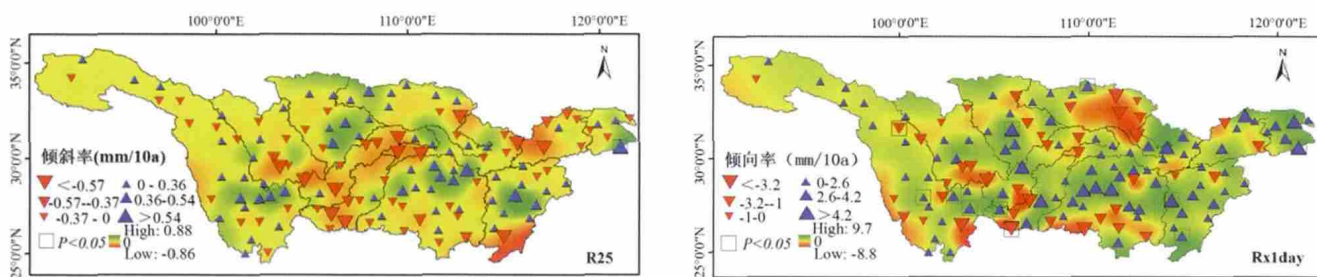


图3 中等强度及较强降水指数的空间分布及显著性水平

Fig.3 The space distribution of the medium intensity and strong precipitation indices with significance tests

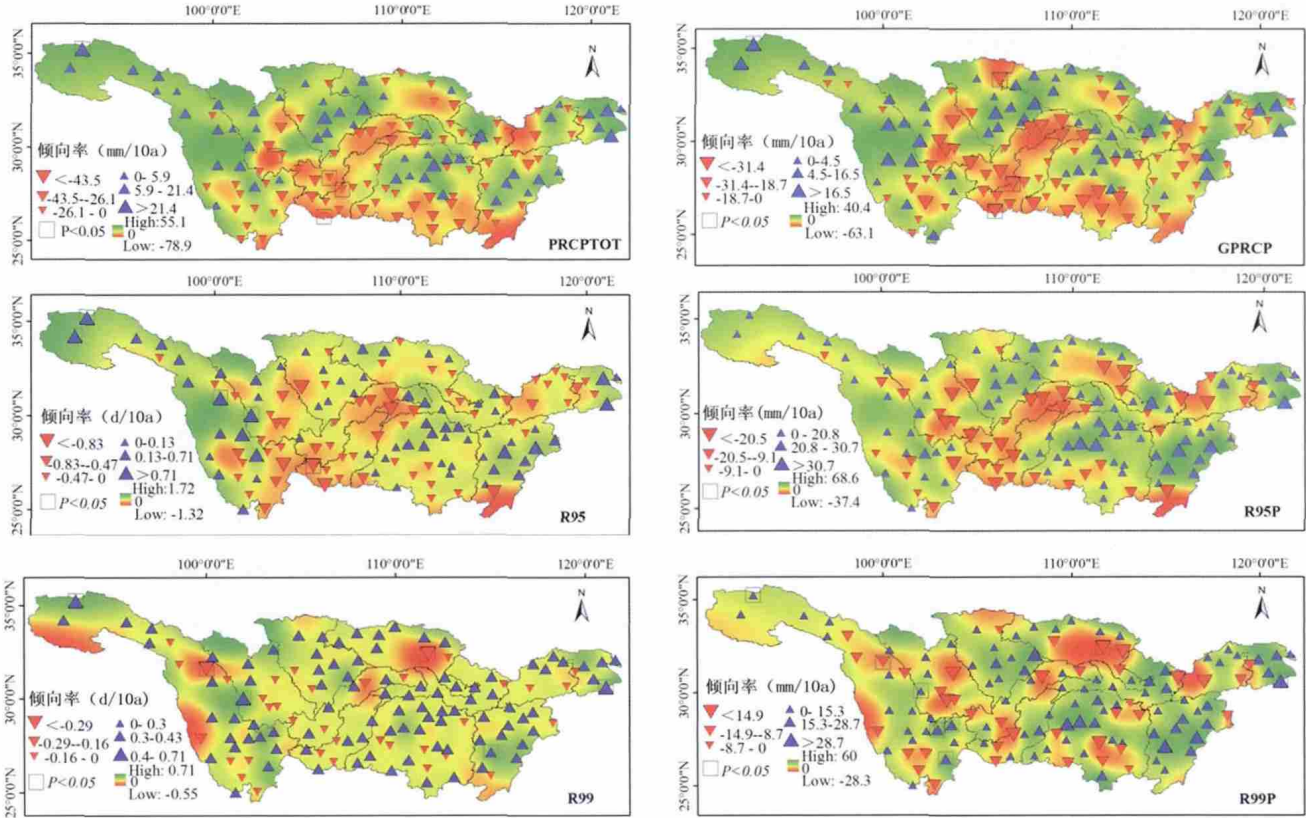


图 4 强降水指数变化的空间特征布及显著性检验

Fig.4 The space distribution of the strong precipitation indices with significance tests

区;其余站点呈上升趋势,主要分布在太湖流域的大部分地区、金沙江的中部和洞庭湖流域的下游地区。R95 和 R95P 呈上升趋势的站点分别占总站点的 51.9% 和 64.9%, 主要分布在太湖流域的绝大部分地区、鄱阳湖流域中下游和洞庭湖流域下游以及川西高原和云贵高原的部分地区;其余站点呈下降趋势,空间上主要集中在乌江流域和上游干流区的大部分地区。整个研究区内,有 70.2% 的站点 R99 和 R99P 呈增加趋势,空间上分布于太湖和鄱阳湖流域绝大部分地区、洞庭湖流域的下游地区;下降地区分布比较零散,主要位于汉水流域的中部和岷、沱江流域的南部地区。

4.2.4 降水强度指数的空间分布

整个研究区内有 83.2% 站点的 SDII 呈上升趋势 (图 5), 其中, 有 15 个站点通过显著性水平检验 ($P < 0.05$), 空间上主要分布在鄱阳湖流域, 太湖流域、下游干流区及云贵高原的大部分地区, 岷、沱江流域的南部以及秦岭一带。其余站点 SDII 呈下降趋势, 其主要分布在汉水流域的中部、乌江流域和上游干流区的大部分地区。

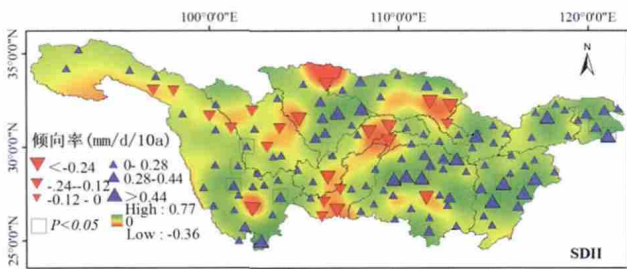


图 5 SDII 变化的空间特征布及显著性检验

Fig.5 The space distribution of SDII with significance tests

4.3 极端降水指数的一致性检验

极端降水指数与总降水量之间具有很好的相关性。主成分分析表明(表 3), 第一和第二主成分累积贡献率达到了 86.39%。其中, 第一主成分的贡献率为 67.17%, 除 CDD 和 CWD 较差之外, 其他各极端降水指数的载荷值都比较高。第二因子高载荷的有 CDD、Rx1day、GPRCP、R95P、R99P、R99、SDII 分别达到了 0.66、0.49、0.06、0.16、0.43、0.42、0.63, 占方差贡献率的 19.22%。PRCPTOT、GPRCP、R95、R95P、R99、R99P、R99、RR10、R25 与年降水总量的相关性最好, 相关系

数都达到了 0.70 以上(表 4),已有研究得出一日最大降水强度、R99、R95、R99P、R95P 与年总降水量具有较高相关性^[34-35]。由此表明,文中所选择的极端降水指数对我国长江流域的降水均有很好的指示作用。

研究时段内,各极端降水指数的稳定性差异明显(图 6)。由图 6 可知,RR1、RR5、RR10、CDD 和 CWD 分别具有表征干旱或湿润状态的指数,各指数数据分布相对集中,稳定性较好。Rx1day、R25 表示中等或较强降水过程指数,数据分布较集中,相对较为稳定。PRCPTOT、R95、R99、R95P、R99P、GPRCP 表征强降水指数,其中,R95P、R99P 中位数和平均值均大于 0,趋势系数为正值,表现出上升趋势,数据比较分散,上升趋势增大,不稳定性增大。R/S 分析也表明,R95P、R99P 强降水指数在未来一段时间呈持续增加趋势,因此长江流域发生旱涝灾害的风险显著增大。

5 讨论和结论

5.1 讨论

我国是世界上洪涝灾害非常严重的国家之一,而长江流域是我国发生洪涝灾害的最集中地区。本文主要分析了长江流域的 14 个极端降水指标。研究中,PRCPTOT、GPRCP、Rx1day、R95P、R99P 指数数据比较分散,不稳定性增大(图 6),对区域水资源的影响较大。其中,强降水指数 R95P、R99P 在未来一段时间呈持续增加趋势(表 5 和表 6)。伴随着全球变暖,长江流域水循环加快,降水增加,河流径流增大。长江流域是我国经济发展的一条轴线,也是洪水灾害高发地区。加上该区域城市化等人为因素造成的共同影响下,未来一段时期内必然会导致极为严重的洪水灾害。沿江沿河地区城市容易发生城市内涝,造成重大的社会经济损失。与此同时,极端降水的增加,对该区农业生产

表3 1970~2014年长江流域极端降水指数的因子载荷与解释方差

Table3 The factor loadings and explained variances in precipitation indices in the Yangtze River basin during 1970-2014.

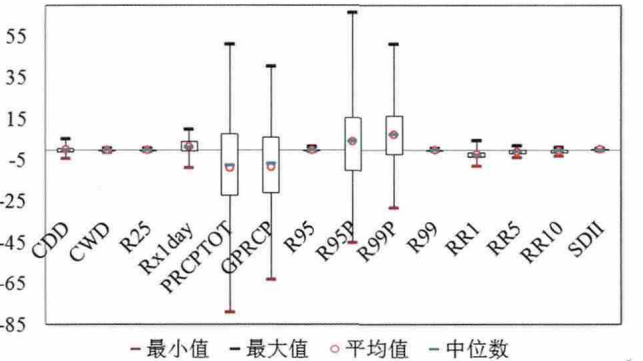
因子	Total P	CDD	CWD	R25	Rx1day	PRCPTOT	GPRCP	R95	R95P	R99P	R99	RR1	RR5	RR10	SDII	贡献率 /%
1	0.8	0.09	0.34	0.97	0.76	0.98	0.94	0.97	0.98	0.87	0.85	0.59	0.77	0.88	0.73	67.17
2	-0.20	0.66	-0.48	0.02	0.49	-0.19	0.06	-0.04	0.16	0.43	0.42	-0.76	-0.59	-0.42	0.63	19.22

表4 1970~2014年长江流域极端降水指数的相关分析

Table4 The correlation coefficients of the precipitation indices in the Yangtze River basin during 1970-2014

	Total P	CDD	CWD	R25	Rx1day	PRCPTOT	GPRCP	R95	R95P	R99P	R99	RR1	RR5	RR10	SDII
Total P	1.00														
CDD	-0.04	1.00													
CWD	0.38*	-0.05	1.00												
R25	0.95*	0.05	0.28*	1.00											
Rx1day	0.64*	0.26*	0.01	0.71*	1.00										
PRCPTOT	1.00*	-0.04	0.37*	0.95*	0.65*	1.00									
GPRCP	0.90*	0.24*	0.33*	0.88*	0.73*	0.90*	1.00								
R95	0.95*	0.06	0.33*	0.95*	0.67*	0.95*	0.89*	1.00							
R95P	0.93*	0.16	0.24*	0.97*	0.81*	0.93*	0.91*	0.96*	1.00						
R99P	0.77*	0.29*	0.11	0.84*	0.91*	0.77*	0.83*	0.80*	0.93*	1.00					
R99	0.74*	0.30*	0.10	0.81*	0.85*	0.75*	0.81*	0.80*	0.90*	0.98*	1.00				
RR1	0.74*	-0.39*	0.51*	0.53*	0.10	0.73*	0.54*	0.57*	0.45*	0.22*	0.21*	1.00			
RR5	0.88*	-0.26*	0.45*	0.72*	0.27*	0.88*	0.70*	0.78*	0.65*	0.40*	0.39*	0.92*	1.00		
RR10	0.95*	-0.15	0.44*	0.85*	0.41*	0.95*	0.80*	0.89*	0.79*	0.55*	0.54*	0.82*	0.96*	1.00	
SDII	0.59*	0.43*	-0.04*	0.74*	0.83*	0.60*	0.68*	0.72*	0.83*	0.88*	0.86*	-0.10*	0.19	0.40	1.00

注:* 表示通过 $P<0.05$ 显著性水平检验



注:箱型图顶端为序列下四分位值,底端为上四分位值。单位:CDD、CWD、R25、R99、R95、RR1、RR5、RR10 (d/10a),Rx1day、R95P、R99P、PRCPTOT、GPRCP(mm/10a),SDII(mm/d/10a)。

图6 1970~2014 年长江流域极端降水指数统计特征
Fig.6 The statistical properties of the extreme precipitation indices in the Yangtze River basin during 1970–2014.

表5 2个极端降水指数序列的R/S分析
Table5 The results of R/S analysis of the extreme precipitation indices

极端降水指数	<i>H</i>	<i>R</i> ²
R95P	0.5976	0.9213
R99P	0.5988	0.9187

表6 2个极端降水指数降水量的未来趋势判断
Table6 The trends of the 4 extreme precipitation indices

极端降水指数	历史变化趋势	<i>H</i>	未来变化趋势
R95P	增加	0.5976	增加
R99P	增加	0.5988	增加

造成很大的影响,长江流域是我国重要的商品粮基地,但近年来农业的基础地位受到削弱^[36],除了耕地和农作物播种面积不断减少这个原因之外,气候变化引起的江河水量和水资源的供需变化以及旱涝灾害频发均对该区农业生产产生重要影响^[37–38]。

因此,必须充分认识极端降水影响的严峻性,在全球变化的背景下,加强对区域水循环过程影响的定位监测和研究。针对未来强降水增加的基础上,详细制定特大洪水防洪预案,防患于未然。同时也要加强中上游地区地质灾害监测与预估。

5.2 结论

本研究基于长江流域 131 个气象站的逐日降水数

据,分析了该区域 1970~2014 年极端降水事件的时空变化特征,主要结论如下:

(1)1970~2014 年,极端降水指数 CDD、Rx1day($P<0.05$)、R95、R95P、R99P、R99、R25 和 SDII($P<0.01$)呈现增加趋势。CWD($P<0.01$)、PRCPTOT、GPRCP、RR1($P<0.01$)、RR5 和 RR10 呈减少趋势。从变化过程来看,20 世纪 70 年代和 80 年代大多数降水指数呈下降趋势,区域降水减少,20 世纪 90 年代急剧增大,2000 年以后,除 Rx1day、R99P、R99、CDD 和 SDII 呈增加态势外,其余均呈下降趋势。

(2)乌江流域和上游干流区的大部分地区除 CDD 增加外,其它指数均呈减少趋势,区域内发生干旱灾害可能性增大。弱降水指数(RR1、RR5、RR10)除在金沙江流域的上游地区,岷、沱江流域的西北部呈增加以外,其他地区呈减少趋势;极端降水指数(R99P、R99、95P、R95)在太湖和鄱阳湖流域大部分地区、洞庭湖流域的下游地区增加趋势较明显,发生区域洪水的可能性较大,而在汉江流域的中部、岷、沱江流域的南部呈现明显减少趋势。

(3)主成分及相关分析表明,除 CDD、CWD、RR1 和 SDII 外,各极端降水指数之间具有很好的相关性($P<0.05$)。

(4)长江流域极端降水年际变化的主要特征为:弱降水变化不显著,中等强度降水相对稳定,强降水变化幅度大,降水过程不稳定,容易发生洪涝灾害。针对未来强降水增加的基础上,详细制定特大洪水防洪预案,防患于未然。

参考文献:

[1] Zhang Y, Ge Q, Liu M. Extreme precipitation changes in the semiarid region of Xinjiang, northwest China [J]. Advances in Meteorology, 2015,2015:1–7.

[2] Working group 1 contribution to the IPCC fifth assessment report climate change 2013: the physical science basis final draft underlying scientific–technical assessment [R]. Stockholm: IPPC, 2013:5–6.

[3] Watterson I G. Simulated changes due to global warming in the variability of precipitation, and their interpretation using a gamma-distributed stochastic model [J]. Advances in Water Resources, 2005,28(12):1368–1381.

[4] 任正果,张明军,王圣杰,等. 1961–2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 2014,69(5):640–649. (REN Zhengguo, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Changes in precipitation extremes in south China during 1961–2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(5):640–649. (in Chinese))

[5] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等. 中国年极端降水事件的时空分布特

- 征[J]. 气候与环境研究, 2008,13(1):75-83. (YANG Jinhui, JIANG Zhihong, WANG Pengxiang, et al. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2008,13(1):75-83. (in Chinese))
- [6] Zhang D, Yan D, Wang Y, et al. Changes in extreme precipitation in the Huang-Huai-Hai River basin of China during 1960-2010 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015,120(1-2):195-209.
- [7] Guan Y, Zheng F, Zhang P, et al. Spatial and temporal changes of meteorological disasters in China during 1950 - 2013 [J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2607-2623.
- [8] Huang J, Sun S, Xue Y, et al. Spatial and temporal variability of precipitation indices during 1961 - 2010 in Hunan province, central south China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014,118(3): 581-595.
- [9] Liu R, Liu S C, Cicerone R J, et al. Trends of extreme precipitation in eastern China and their possible causes [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015,32(8):1027-1037.
- [10] 汪宝龙,张明军,魏军林,等. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征 [J]. 自然资源学报, 2012,(10):1720-1733. (WANG Baolong, ZHANG Mingjun, WEI Junlin, et al. The change in extreme event of temperature and precipitation over northwest China in recent 50 years [J]. Journal of Natural Resources, 2012,(10): 1720-1733. (in Chinese))
- [11] 李双双,杨赛霓,刘宪锋. 1960-2013 年秦岭—淮南北极降水时空变化特征及其影响因素 [J]. 地理科学进展, 2015,(3):354-363. (LI Shuangshuang, YANG Saini, LIU Xianfeng. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in north and South of the Qinling-Huaihe region and influencing factors during 1960-2013 [J]. Progress in Geography, 2015,(3):354-363. (in Chinese))
- [12] 黄强,陈子燊. 全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究 [J]. 地球科学进展, 2014,(8):956-967. (HUANG Qiang, CHEN Zishen. Regional study on the trends of extreme temperature and precipitation events in the Pearl River basin [J]. Advances in Earth Science, 2014,(8):956-967. (in Chinese))
- [13] 贺振,贺俊平. 1960 年至 2012 年黄河流域极端降水时空变化[J]. 资源科学, 2014,(3):490-501. (HE Zhen, HE Junping. Temporal and spatial variation of extreme precipitation in the Yellow River basin from 1960 to 2012 [J]. Resources Science. 2014,(3):490-501. (in Chinese))
- [14] 慈晖,张强,张江辉,等. 1961-2010 年新疆极端降水过程时空特征[J]. 地理研究, 2014,(10):1881-1891. (CI Hui, ZHANG Qiang, ZHANG Jianghui, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events within Xinjiang during 1961-2010 [J]. 2014,(10): 1881-1891. (in Chinese))
- [15] Bennett K E, Walsh J E. Spatial and temporal changes in indices of extreme precipitation and temperature for Alaska [J]. International Journal of Climatology, 2015,35(7):1434-1452.
- [16] 蔡敏,丁裕国,江志红. 我国东部极端降水时空分布及其概率特征 [J]. 高原气象, 2007,(2):309-318. (CAI Min, DING Yuguo, JIANG Zhihong. Extreme precipitation experimentation over eastern China based on L-moment estimation [J]. Plateau Meteorology, 2007,(2):309-318. (in Chinese))
- [17] 骆高远. 我国对厄尔尼诺、拉尼娜研究综述 [J]. 地理科学, 2000, (3):264-269. (LUO Gaoyuan. A general survey of the studies on El Niño and La Niña in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000,(3):264-269. (in Chinese))
- [18] 梁萍,丁一汇,何金海,等. 江淮区域梅雨的划分指标研究[J]. 大气科学, 2010,(2):418-428. (LIANG Ping, DING Yihui, HE Jinhai, et al. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010,(2):418-428. (in Chinese))
- [19] 平凡,罗哲贤,琚建华. 长江流域汛期降水年代际和年际尺度变化影响因子的差异 [J]. 科学通报, 2006,(1):104-109. (PING Fan, LUO Zhexian, JU Jianhua. Variation of Interdecadal and interannual scale variations of flood season precipitation in the Yangtze River basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2006,(1):104-109. (in Chinese))
- [20] 姜彤,苏布达,Marco Gemmer. 长江流域降水极值的变化趋势[J]. 水科学进展, 2008,(5):650-655. (JIANG Tong, SU Buda, Gemmer Marco. Trends in precipitation extremes over the Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2008,(5):650-655. (in Chinese))
- [21] 中国气象灾害年鉴,2007 年 [Z]. (China's Meteorological Disaster Yearbook, 2007 [Z]. (in Chinese))
- [22] 中国气象灾害年鉴,2011 年 [Z]. (China's Meteorological Disaster Yearbook, 2011 [Z]. (in Chinese))
- [23] 中国气象灾害年鉴,2012 年 [Z]. (China's Meteorological Disaster Yearbook, 2012 [Z]. (in Chinese))
- [24] 黄志萍,任广成,夏军. 盛夏副高东西位置异常变化对我国气候的影响及预测研究[J]. 海洋预报, 2012,(3):53-61. (HUANG Zhiping, REN Guangcheng, XIA Jun. Impact of anomalous latitudinal position of western Pacific subtropical high on climate change in midsummer in China [J]. Marine Forecasts, 2012,(3):53-61. (in Chinese))
- [25] 王成新,解晓南,姚士谋. 循环经济,长江流域可持续发展的必由之路 [J]. 长江流域资源与环境, 2003,(6):503-508. (WANG Chengxin, XIE Xiaonan, YAO Shimou. Cycle economy: the only way to sustainable development in the Yangtze basin [J]. 2003,(6):503-508. (in Chinese))
- [26] Zhang Q, Singh V P, Li J, et al. Analysis of the periods of maximum consecutive wet days in China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116(D23):n/a-n/a.
- [27] Sohrabi M M, Ryu J H, Abatzoglou J, et al. Climate extreme and its linkage to regional drought over Idaho, USA [J]. Natural Hazards, 2013,65(1):653-681.
- [28] Pranab Kumar. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau Author(s) [J] Journal of the American Statistical Association, 1968,324:1379-1389.

- [29] 约翰逊. 实用多元统计分析(第四版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. (Johnson. Applied Multivariate Statistical Analysis (the fourth edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese))
- [30] 陈昭,梁静溪. 赫斯特指数的分析与应用[J]. 中国软科学, 2005,(3): 134–138. (CHEN Zhao, LIANG Jingxi. The analysis and application Hurst exponent [J]. China Soft Science, 2005,(3):134–138. (in Chinese))
- [31] 宋燕,张菁,李智才,等. 青藏高原冬季积雪年代际变化及对中国夏季降水的影响[J]. 高原气象, 2011,(4):843–851. (SONG Yan, ZHANG Jing, LI Zhicai, et al. Interdecadal change of winter snow depth on Tibetan plateau and its effect on summer precipitation in China [J]. Plateau Meteorology, 2011,(4):843–851. (in Chinese))
- [32] 朱玉祥,丁一汇,徐怀刚. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系 [J]. 气象学报, 2007,(6):946–958. (ZHU Yuxiang, DING Yihui, XU Huaigang. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan plateau and rainfall in east China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007,(6):946–958. (in Chinese))
- [33] 王遵娅. 中国夏季降水的气候变率及其可能机制研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007. (WANG Zunya. Climate Variability of Summer Rainfalls in China and the Possible Mechanism [D]. Beijing, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))
- [34] Wang B, Zhang M, Wei J, et al. Changes in extreme precipitation over northeast China, 1960 – 2011 [J]. Quaternary International, 2013,298:177–186.
- [35] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961 – 2003 [J]. Climate Dynamics, 2011,36(11–12):2399–2417.
- [36] 刘兆德,虞孝感. 长江流域新世纪可持续发展的重大问题[J]. 经济地理, 2006,(2):304–307. (LIU Zhaode, YU Xiaogan. New century significant problems of the Yangtze basin's sustainable development [J]. Economic Geography, 2006,(2):304–307. (in Chinese))
- [37] 肖国举,张强,王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007,18(8):1877–1885. (XIAO Guojun, ZHANG Qiang, WANG Jing. Impact of global climate change on agro-ecosystem: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007,18(8):1877–1885. (in Chinese))
- [38] 刘彦随,刘玉,郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略 [J]. 中国生态农业学报, 2010,(4):905–910. (LIU Yansui, LIU Yu, GUO Liying. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010,(4):905–910. (in Chinese))

Spatio-temporal Variations of Extreme Precipitation Events in Yangtze River Basin during 1970–2014

SHI Guangxun^{1,2,3}, LIU Jian^{1,2}, MA Li³, LI Lanhui⁴, CHEN Qian³, ZHANG Huamin³

(1. Key Laboratory for Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Jiangsu Cultivation Base of State Key Laboratory of Geographical Environment Evolution, Nanjing 210023, China; 2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 4. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the data from the 131 meteorology stations in the Yangtze River Basin, the study was conducted by using the Mann–Kendall nonparametric test, principal component analysis and R/S analysis, to reveal the spatial and temporal variation characteristics of the extreme precipitation in the Yangtze River Basin. The results indicate: (1) The main extreme precipitation indices showed a trend of increase during 1970–2014, the main extreme precipitation index showed a lasting trend of decline after the 1970s while bigger and more unstable decade-on-decade variations should be noted since the 1980s. (2) The most part Poyang Lake Basin and the downstream area of the Dongting Lake face the increased heavy precipitation. (3) Also there is a good correlation between the extreme precipitation index which all pass the 0.05 significance level test, except for the weak precipitation indices. (4) The main characteristics of the Yangtze River Basin precipitation is the barely noticeable change of weak precipitation, vast change for extreme precipitation change, unstable precipitation process and the high risk of flood.

Key words: Yangtze River Basin; extreme precipitation; variation tendency; spatial characteristics