

1961—2013年河南省极端降水事件时空变化特征

赵国永^{1,2,3}, 韩艳^{1,2}, 刘明华^{1,2}, 侯俊丽¹, 时海萍¹, 刘维真¹, 郭伊利¹, 乔强¹

(1. 信阳师范学院 地理科学学院, 河南 信阳 464000; 2. 信阳师范学院 气候与环境演变重点实验室, 河南 信阳 464000; 3. 信阳师范学院 南北过渡带研究中心, 河南 信阳 464000)

摘要:以1961—2013年河南省17个站点逐日降水量数据为研究对象,运用Sen's倾向估计、Mann-Kendall显著性检验和空间插值等方法,分析了河南省11个极端降水指数时间和空间变化特征及其影响因素。结果表明:(1)过去53年,河南省极端降水指数变化趋势不显著。(2)河南省区域内,东南部极端降水量、降水日数、降水强度大于西北部。过去53年,商丘和西华降水量、降水日数和降水强度显著增加,而安阳、新乡、孟津、三门峡等地显著减少。(3)将河南省极端降水指数与其他区域进行了比较表明,极端降水指数存在区域性差异。(4)极端降水指数与纬度因素之间相关性强于经度和海拔因素。(5)除CDD指数外,其余指数与年总降水量均具有较高相关性。其中,极端降水量(R95p)、年降水日数降水量(R10,R20和R25)对年总降水量贡献最大。

关键词:河南省; 极端降水指数; 时空变化

中图分类号:P426

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0115-05

Spatial-temporal Variation of Extreme Precipitation Events in Henan Province from 1961 to 2013

ZHAO Guoyong^{1,2,3}, HAN Yan^{1,2}, LIU Minghua^{1,2},

HOU Junli¹, SHI Haiping¹, LIU Weizhen¹, GUO Yili¹, QIAO Qiang¹

(1. School of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China; 2. Key Laboratory of Climate Change and Environmental Evolution, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China; 3. Research Center of North and South Transition Zone in China, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: Daily precipitation data of 17 meteorological stations in Henan Province during 1961—2013 were selected in this study. Some methods, including Sen's tendency estimation, Mann-Kendall test and spatial analysis, were applied to detect spatial and temporal characteristics of eleven indices of extreme precipitation across Henan Province and their impact factors. The results showed that: (1) extremes precipitation indices across Henan Province presented an indistinctive variation trend during the last 53 years; (2) the extreme precipitation, rainfall days and intensities of precipitation in southeastern Henan Province were stronger than in northwest; the extreme precipitation, rainfall days and intensities of Shangqiu and Xihua exhibited significant increasing trend during the recent 53 years, and presented the decreasing trend in Anyang, Xinxiang, Mengjin and Sanmenxia areas; (3) compared with other regions, variation trend of extreme precipitation indices in Henan Province was different from the results found in the other regions of China, which exhibited regional difference; (4) the correlation between extreme precipitation indices and latitudes was much more significant than those between longitudes and altitude factors; (5) except for CDD, indices had close correlations with annual precipitation amounts. The precipitation of R95p, R10, R20 and R25 mostly contributed to annual total precipitation amount.

Keywords: Henan Province; extreme precipitation indices; spatial-temporal variation

收稿日期: 2017-11-23

修回日期: 2018-02-08

资助项目: 国家自然科学基金(41602187); 河南省科技计划项目(162102310123); 河南省高等学校重点项目(17A170011); 信阳师范学院资助项目(0201306, 2015GGJS-01)

第一作者: 赵国永(1985—), 男, 河南开封人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化与环境演变研究。E-mail: zhaogy@xynu.edu.cn

通信作者: 韩艳(1985—), 女, 河南许昌人, 硕士, 讲师, 主要从事气候变化研究。E-mail: hanyan@xynu.edu.cn

随着全球变暖,极端气候事件发生的频率和强度急剧增加^[1]。相较于气候平均状况,极端气候事件带来不利影响更加严重^[2],引起各国政府和国际机构高度重视,已成为当前学术界关注的一个热点问题^[3]。极端降水事件是极端气候事件重要组成部分,国内外学者进行了大量研究。与极端气温事件相比,极端降水事件不具备全球一致性^[4-5],如一些地区总降水量减少或不变,但是极端降水的频率和强度具有增加趋势^[6]。我国不同地区极端降水事件变化趋势不一致,长江中下游地区、西北地区北部和西南地区西部年极端降水频数具有明显增加趋势,而华北地区呈现减少趋势^[2]。同时,学者对我国^[7]及不同区域极端气候事件进行研究,如:西藏^[8]、我国南方^[9]、西南地区^[10]、我国半干旱区^[11]、黄土高原^[12]、淮河流域^[13]、浏阳河流域^[14]、山东省^[15]等。

河南省位于黄河中下游,地势低平,是我国人口大省和农业大省,是我国粮食生产的核心产区。已有学者对河南省极端降水事件进行研究,1957—2005年,河南省暴雨日数和极端降水事件具有不显著增加趋势^[16]。1961—2006年,河南省汛期极端降水事件空间变化特征为:降水量南多北少,极端降水事件发生频次呈现北多南少;汛期极端降水事件发生频次存在南北差异^[17]。相较于其他区域极端降水事件研究,河南省研究程度较低,且已有河南省极端降水事件研究指数较少、研究时间尺度较短。

本文拟以 1961—2013 年河南省 17 个站点逐日降水量数据为研究对象,运用 Sen's 倾向估计、Mann-Kendall 显著性检验和空间插值等方法,分析河南省 11 个极端降水指数时间和空间变化特征及其影响因素。通过本文研究,有助于理解河南省极端降水事件变化特征,为决策部门提供参考,尽可能降低极端降水事件带来的影响和损失。

1 材料及方法

1.1 数据来源

本文研究数据由中国气象科学数据共享服务网提供,包括 1961—2013 年河南省 17 个站点逐日降水量,并经过极值检验、时间一致性检验和均一化检验等严格质量控制。运用 R 编辑器、RClimDex 软件对数据进行进一步质量控制,包括数据记录日期是否与现实一致、错误值及异常值的筛选等;且要求观测站连续观测时间段为 1961 年 1 月 1 日—2013 年 12 月 31 日。

1.2 极端降水指数定义

本研究对极端降水指数定义和计算采用世界气象组织气候委员会(WMO-CCL)和气候变化与可预测性计划(CLIVAR)气候变化检测、监测和指数专家组(ETCCDMI)确定的指数体系^[1],从中选取 11 个极端降水指数(表 1)。采用基于 R 语言 RClimDex 1.0 软件(来源于 <http://cccma.seos.uvi.ca/ETCCDMI>)进行极端降水指数计算。

1.3 研究方法

运用 Sen's 倾向估计分析 11 个极端降水指数变化趋势^[18]。运用 Mann-Kendall 方法进行变化趋势显著性检验^[19]。在 ArcGIS 10.0 环境下,通过反距离加权(Inverse Distance Weighting)插值绘制河南省 11 个极端降水指数及变化趋势空间分布图。

2 结果与分析

2.1 变化趋势

1961—2013 年,河南省 5 个极端降水指数(PRCPTOT, RX5day, R10, R20 和 CWD)具有减少趋势,且均没有通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验;6 个指数(RX1day, R95p, R99p, SD II, R25 和 CDD)具有升高趋势,只有 SD II 通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验。同时,11 个指数变化幅度不明显(表 2),共同说明河南省极端降水指数变化趋势不显著。其 PRCPTOT 变化趋势与韩艳等^[20]基于月观测数据研究结果一致。

2.2 空间序列变化特征

2.2.1 空间分布 自河南省东南部向西北部,10 个极端降水指数(PRCPTOT, RX1day, RX5day, R95p, R99p, SD II, R10, R20, R25, CWD)逐渐减少,而 CDD 逐渐增加,说明河南东南部降水量、降水日数、降水强度较大;西北部降水量、降水日数、降水强度较小。其原因是河南省东南部受东亚季风影响强度大于西北部。

2.2.2 变化趋势空间分布 近 53 a,河南省 17 个站点中 PRCPTOT 趋于减少站点占 76.4%,主要分布在河南南部和西北部,最大减幅为 21 mm/10 a;其余站点趋于增加,主要分布在商丘和西华等地,最大增幅为 21 mm/10 a(图 1A)。RX1day 趋于减少站点占 47.1%,主要分布在三门峡、孟津、新乡、驻马店、固始等地区;其余站点趋于增加(图 1B)。RX5day 趋于减少站点占 58.8%,主要分布在安阳、新乡、孟津、宝丰、许昌、固始等地,最大减幅为 8 mm/10 a;其余站点趋于增加,主要分布在西华、商丘等地区,最大增幅

为 12 mm/10 a。其中,西华变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验(图 1C),说明西华具有显著增加趋势。

R95p 趋于减少站点占 41.2%,主要分布在三门峡、孟津、郑州等地,最大减幅为 12 mm/10 a;其余站点趋于增加,主要分布在西华、南阳、许昌、商丘等地区(其中西华变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验),最大增幅为 30 mm/10 a(图 1D)。R99p 趋于减少站点

占 47.1%,主要分布在西峡、三门峡、孟津、安阳等地;其余站点趋于增加(图 1E)。SDⅡ 趋于减少站点占 29.4%,主要分布在河南省东南部和西北部,每 10 a 最大减幅为 0.2 mm/d;其余站点趋于增加,主要分布在西华、商丘等地,每 10 a 最大增幅为 0.6 mm/d。其中,西华和商丘变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验(图 1F),说明西华和商丘具有显著增加趋势。

表 1 极端降水指数定义

指数类型	项 目	缩写	定义
强度	最大 1 日降水量(mm)	RX1day	年内最大 1 日降水量
	最大 5 日降水量(mm)	RX5day	年内最大连续 5 日降水总量
	降水强度(mm/d)	SDⅡ	年总降水量除以降水日数
	日降水量 ≥ 10 mm 日数(d)	R10	日降水量大于等于 10 mm 日数
	日降水量 ≥ 20 mm 日数(d)	R20	日降水量大于等于 20 mm 日数
绝对	日降水量 ≥ 25 mm 日数(d)	R25	日降水量大于等于 25 mm 日数
	极端降水量(mm)	R95p	日降水量大于基准期内第 95%分位值的总降水量
持续性	极端强降水量(mm)	R99p	日降水量大于基准期内第 99%分位值的总降水量
	连续干旱日数(d)	CDD	日降水量小于 1 mm 持续日数的最大值
	连续湿润日数(d)	CWD	日降水量大于或等于 1 mm 持续日数的最大值
	年总降水量(mm)	PRCPTOT	年全部雨(雪)日降水量之和

表 2 1961—2013 年河南省极端降水指数变化趋势及显著性检验

指数	PRCPTOT/ mm	RX1day/ mm	RX5day/ mm	R95p/ mm	R99p/ mm	SDⅡ/ (mm·d ⁻¹)	R10/d	R20/d	R25/d	CDD/d	CWD/d
10 a 倾向率	-3.73	0.17	-0.75	1.89	2.08	0.17	-0.20	-0.04	0.01	0.13	-0.08
Z 值	-0.38	0.08	-0.53	0.39	0.71	1.80*	-0.61	-0.13	0.08	0.09	-1.14

注:* 表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验。

R10 趋于增加站点占 17.6%,主要分布在卢氏、西华和商丘,最大增幅为 0.2 d/10 a;其余站点均趋于减少,最大减幅为 1 d/10 a(图 1G)。R20 趋于减少站点占 41.2%,主要分布在信阳、固始、新乡等地区;其余站点趋于增加(图 1H)。R25 趋于减少站点占 41.2%,主要分布在信阳、新乡、安阳等地;其余站点趋于增加(图 1I)。

CDD 趋于减少站点占 41.2%,主要分布在安阳、商丘等地;其余站点趋于增加(图 1J)。CWD 趋于增加站点占 11.8%,主要分布在郑州和固始,最大增幅为 0.1 d/10 a;其余站点均趋于减少,最大减幅为 0.3 d/10 a(图 1K)。

过去 53 a,11 个极端降水指数中,商丘和西华 9 个指数 (PRCPTOT, RX5day, RX1day, R95p, R99p, SDⅡ, R10, R20 和 R25) 具有升高趋势,且增加幅度为每一个指数最大值;安阳、新乡、孟津和三门峡 9 个指数 (PRCPTOT, RX5day, RX1day, R95p, R99p, R10, R25, CDD 和 CWD) 均具有降低趋势,且降低幅度几乎为

每一个指数最大值。在河南省区域内,商丘和西华降水量、降水日数和降水强度显著增加;安阳、新乡、孟津、三门峡降水量、降水日数和降水强度显著减少。

3 讨论

3.1 极端降水指数变化趋势对比

与全球同期 7 个极端降水指数相比,河南省 4 个指数 (PRCPTOT, RX1day, RX5day 和 R10) 具有相反变化趋势,3 个指数 (SDⅡ, CDD 和 CWD) 具有相同变化趋势(表 3),说明河南省和全球极端降水指数变化趋势存在差异。

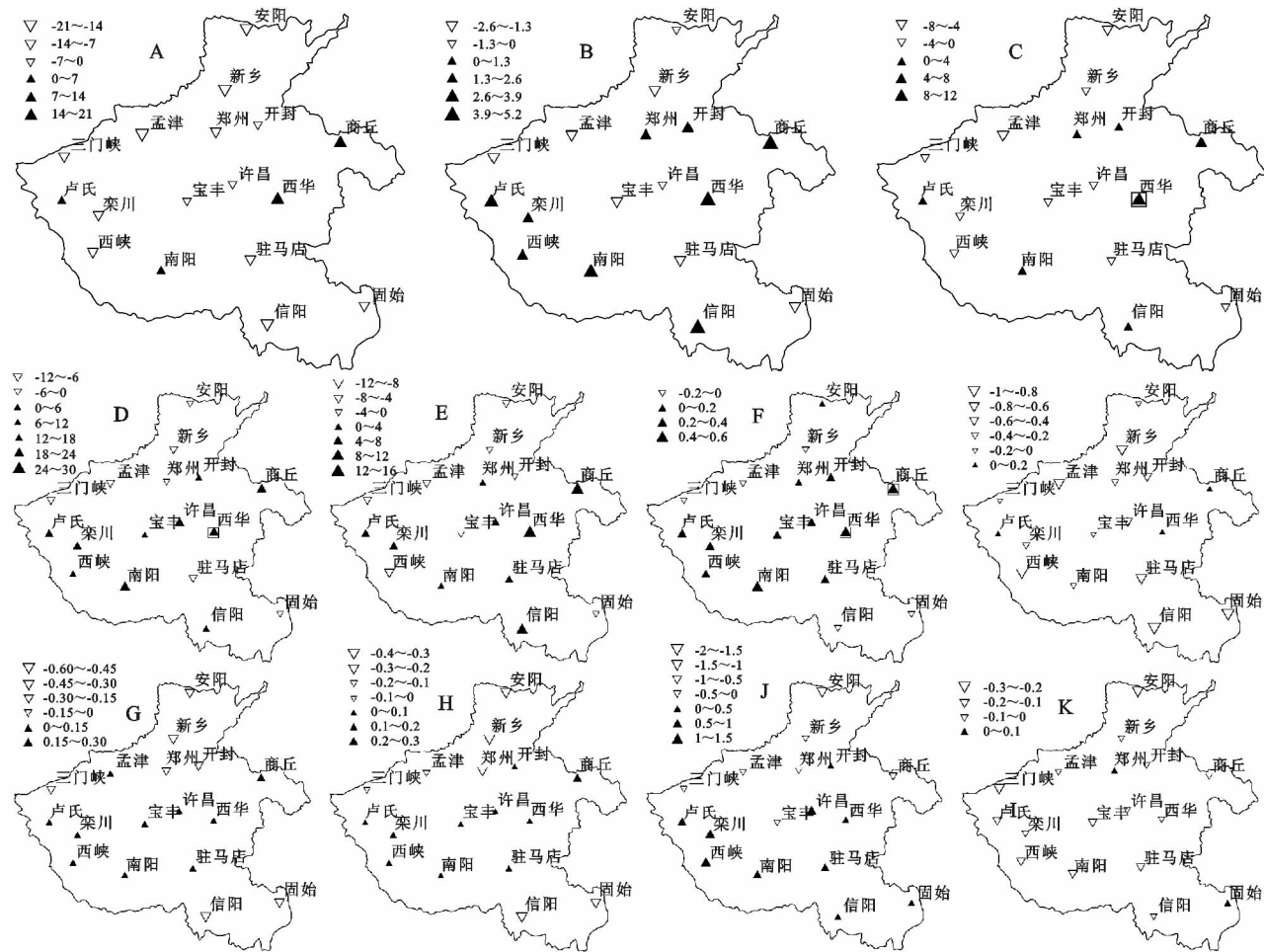
与我国其他区域同期指数相比。与西藏已有 9 个极端降水指数^[8] 均具有相同变化趋势,与我国南方已有 5 个指数中^[9] 4 个指数具有相同变化趋势,与我国半干旱区已有 7 个指数^[11] 中 3 个指数具有相同变化趋势(表 3),同时河南省降水强度变化幅度均大于我国南方、青藏高原和半干旱区,说明河南省极端降水指数变化特征与我国南方和青藏高原地区

相似,而与我国半干旱区不同,体现了极端降水指数区域性差异。

3.2 极端降水指数与经度、纬度和海拔因素之间关系

河南省 11 个极端降水指数与纬度相关性,8 个指数相关系数达到 0.8 以上,同时 10 个指数通过了

显著性检验(9 个 $\alpha=0.01$,1 个 $\alpha=0.05$ 显著性检验)(表 4),说明河南省极端降水指数与纬度密切相关。同时,10 个极端降水指数与纬度呈负相关,1 个指数(CDD)与纬度呈正相关(表 4),说明随着纬度增加(自南向北),河南省降水量、降水日数、降水强度逐渐减少,而连续干旱日数逐渐增加。



注:黑色方框表示变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验。

图 1 1961—2013 年河南省极端降水指数变化趋势空间变化分布

河南省 11 个极端降水指数与经度和海拔相关性,大部分指数相关系数均较高,说明河南省极端降水指数与经度和海拔具有较好相关性。极端降水指数与经度和海拔相关系数中,只有 3 个指数(RX1day, RX5day, SDII)通过显著性检验(表 4),说明河南省极端降水指数与经度和海拔密切程度低于纬度。同时,9 个极端降水指数与经度呈正相关,2 个指数(CDD, CWD)呈负相关且相关系数接近于 0;9 个极端降水指数与海拔呈负相关,2 个指数(R10, CWD)呈正相关,说明随着经度递减(自东向西)和海拔升高(自东向西),河南省极端降水指数均具有减少趋势。河南省降水量自东部向西部逐渐减少,与月观测数据记录结果一致。其原因是河南省处于东亚季

风区范围内,东部更加靠近海洋,东部受季风影响强于西部。

3.3 极端降水指数与年降水量之间关系

从表 5 可以看出,河南省 9 个极端降水指数与年总降水量呈正相关,1 个指数(CDD)呈负相关。正相关系数在 0.59 以上,最高达到 0.95,且均通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验,说明本文选取 11 个极端降水指数对河南省降水具有较好的指示作用,极端降水指数的增多/减少反映了降水量的增多和减少^[12]。同时,河南省每一个站点 4 个指数(R95p, R10, R20 和 R25)与年总降水量正相关系数均通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验,说明极端降水量(R95p)、年降水日数降水量(R10, R20 和 R25)对年总降水量贡献最大。

表 3 河南省极端降水指数变化趋势与其他区域对比

指数	单位	1961—2005 年		1961—2011 年		1961—2010 年		1961—2003 年	
		青藏高原	河南	我国南方	河南	半干旱区	河南	全球	河南
PRCPTOT	mm/10 a	6.66	3.93		3.94	−4.83	4.57	10.59	−3.27
RX1day	mm/10 a	0.27	0.51		0.31		0.68	0.85	−0.19
RX5day	mm/10 a	−0.08	−1.63	1.7	−0.78	−1.19**	−0.48	0.55	−2.87
R95p	mm/10 a	1.28	3.12	11.4	4.0	−3.23*	6.72		0.78
R99p	mm/10 a	1.09	3.56		2.0		2.93		2.45
SDⅡ	(mm/d)/10 a	0.03	0.21*	0.1**	0.22*	−0.02	0.24*	0.05	0.15
R10	d/10 a	0.23	0.02		0.04		−0.02	0.29	−0.12
R20	d/10 a		−0.07	0.2	0.1	−0.07	0.07		−0.18
R25	d/10 a		0		0.12		0.1		−0.1
CDD	d/10 a	−4.64*	−0.23		0.12	−2.05	−0.43	−0.55	−0.43
CWD	d/10 a	−0.07	−0.04	−0.5	−0.04	−0.04	−0.05	−0.02	−0.07

注：*，** 分别表示通过 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 显著性检验，青藏高原数据、全球数据来自于参考文献[8]，我国南方数据来自于文献[9]，我国北方半干旱区数据来自于文献[11]。

表 4 1961—2013 年河南省极端降水指数与纬度、经度和海拔相关系数

项目	RX1day	RX5day	R95p	R99p	PRCPTOT	SDⅡ	R10	R20	R25	CDD	CWD
纬度	−0.53*	−0.62**	−0.85**	−0.80**	−0.92**	−0.42	−0.93**	−0.89**	−0.85**	0.98**	−0.94**
经度	0.76**	0.69**	0.43	0.48	0.28	0.81**	0.13	0.34	0.40	−0.04	−0.07
海拔	−0.72**	−0.63**	−0.33	−0.39	−0.13	−0.75**	0.05	−0.22	−0.29	−0.05	0.18

注：*，** 分别表示通过 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 显著性检验。

表 5 1961—2013 年河南省极端降水指数与年总降水量相关系数

项目	RX1day	RX5day	R95p	R99p	SDⅡ	R10	R20	R25	CDD	CWD
PRCPTOT	0.63**	0.62**	0.86**	0.63**	0.73**	0.94**	0.95**	0.94**	−0.14	0.59**
SNo	29.4%	58.8	100%	35.3%	88.2%	100%	100%	100%	0	88.2%

注：** 表示通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验，SNo 表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验站点数占总站点数比例。

4 结 论

(1) 时间尺度上，河南省极端降水指数变化趋势不显著。(2) 空间尺度上，河南东南部降水量、降水日数、降水强度强于其西北部。过去 53 a，商丘和西华降水量、降水日数、降水强度显著增加，而安阳、新乡、孟津、三门峡显著减少。(3) 纬度因素对河南极端降水指数变化影响强于经度和海拔因素，极端降水量(R95p)、年降水日数降水量(R10,R20 和 R25)对年总降水量贡献最大。

参考文献：

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, United Kingdom:Cambridge University Press, 2013.

[2] 翟盘茂,王翠翠,李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展,2007,3(3):144-148.

[3] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因极其与气候变暖的关系[J]. 气象学报,2008,66(5):808-825.

[4] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extreme of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research, 2006,111(D05109):1-22.

[5] Choi G, Collins D, Ren G, et al. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955—2007[J]. International Journal of Climatology, 2009,29(13):1906-1925.

[6] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts [J]. Science, 2000,289(5487):2068-2074.

[7] 顾西辉,张强,孔冬冬. 中国年和季节极端降水时空特征及极值分布函数上尾部性质[J]. 地理科学,2017,37(6):929-937.

- [8] 杜军,路红亚,建军. 1961—2012 年西藏极端降水事件的变化[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 990-1002.
- [9] 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.
- [10] 袁文德,郑江坤,董奎. 1962—2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 766-772.
- [11] 王炳钦,江源,董满宇,等. 1961—2010 年北方半干旱区极端降水时空变化[J]. 干旱区研究, 2016, 33(5): 913-920.
- [12] 赵安周,朱秀芳,潘耀忠. 1965—2013 年黄土高原地区极端降水事件时空变化特征[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(1): 43-50.
- [13] 余敦先,夏军,张永勇,等. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化特征及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210.
- [14] 于泽兴,胡国华,陈肖,等. 近 45 年来浏阳河流域极端降水变化[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 139-143.
- [15] 李胜利,巩在武,石振彬. 近 50 年来山东省极端降水指数变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 120-127.
- [16] 余卫东,柳俊高,常军,等. 1957—2005 年河南省降水和温度极端事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 913-920.
- [17] 朱叶玉,顾万龙,王记芳,等. 河南省汛期极端降水事件分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 913-920.
- [18] Ghosh M, Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Publications of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [19] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scalling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3): 350-363.
- [20] 韩艳,赵国永,江蕾蕾,等. 1951—2013 年河南省降水量时空变化特征[J]. 中国农学通报, 2015, 31(25): 235-240.

~~~~~

(上接第 114 页)

- [6] 王建国,樊军,王全九,等. 黄土高原水蚀风蚀交错区植被地上生物量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 556-564.
- [7] 朱志辉. 自然植被净第一性生产力估计模型[J]. 科学通报, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [8] 李世华,牛铮,李壁成. 植被净第一性生产力遥感过程模型研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 126-128.
- [9] Yuan J, Zheng N, Wang C. Vegetation NPP distribution based on MODIS data and CASA model: A case study of northern Hebei Province[J]. Chinese Geographical Science, 2006, 16(4): 334-341.
- [10] 李登科,范建忠,王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [11] 王亚林,龚容,吴凤敏,等. 2001—2013 年中国灌木生态系统净初级生产力的时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(9): 925-937.
- [12] 谢军飞,李薇. 年均气温空间插值方法的比较分析: 以北京为例[J]. 生态科学, 2013, 32(6): 752-756.
- [13] 刘劲松,陈辉,杨彬云,等. 河北省年均降水量插值方法比较[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3493-3500.
- [14] 张莎,袁金国,张宇佳,等. 河北省 2001—2010 年植被 NPP 时空变化及与气候因子相关性分析[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2014, 34(5): 516-523.
- [15] 穆少杰,李建龙,杨红飞,等. 内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 6-15.
- [16] 吴楠,高吉喜,苏德毕力格,等. 长江上游植被净初级生产力年际变化规律及其对气候的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4): 389-396.