

基于ITA、ITA-CB法的安阳区域极端降水变化趋势研究

王建新^{1,2}, 李一凡^{1,2}, 竹磊磊^{1,3}, 孔海江^{1,4},
张璇^{1,2}, 胡孟然^{1,2}

(1. 中国气象局·河南省农业气象保障重点实验室, 郑州 450003;

2. 安阳国家气候观测台, 河南 安阳 455000;

3. 河南省气候中心, 郑州 455003; 4. 河南省气象台, 郑州 455003)

摘要: 为量化分析太行山东麓安阳区域极端降水的变化特征,采用创新趋势分析法(ITA)、改进的ITA法(ITA-CB)等方法,对安阳区域1958—2023年的极端降水指数进行站点和区域尺度的趋势变化和空间分布特征分析。结果表明:①ITA法与线性回归法及Mann-Kendall检验的趋势一致性分别为86.7%和78.8%,验证了ITA法在极端降水分析中的适用性,为水文气候趋势分析提供了有力的补充工具。②区域总降水量的变化主要受强降水事件驱动,极端降水总量主要集中在少数几场强度最大的降水事件中,凸显了极端事件在年际水量平衡中的决定性作用。③大多数极端降水指数的变化趋势表现出区域一致性,但不同站点间存在差异。丘陵与平原地带分别具有各自特殊的气候响应同步性,存在“旱涝交替”的气候特征。④丘陵区域极端降水事件强度及其对总降水的贡献率呈增加趋势,山区则呈相反变化。⑤极端降水事件的频率和总量表现为山区大于丘陵和平原,强度则是丘陵大于山地和平原。⑥区域内PRCPTOT和R95p在低值区和高值区均呈现上升趋势,在中值区则呈下降趋势,这种“两头增、中间减”的结构变化预示着未来区域内降水的两极分化趋势将可能进一步加剧,暗示着干旱事件和极端暴雨事件可能同时增加。

关键词: ITA法; ITA-CB法; 极端降水指数; Spearman秩相关系数

中图分类号: P468

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0185-13

Research on the Variation Trend of Regional Extreme Precipitation in Anyang Based on ITA and ITA-CB Methods

WANG Jianxin^{1,2}, LI Yifan^{1,2}, ZHU Leilei^{1,3}, KONG Haijiang^{1,4},
ZHANG Xuan^{1,2}, HU Mengran^{1,2}

(1. CMA·Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China;

2. Anyang National Climate Observatory, Anyang 455000, Henan China; 3. Henan Climate Center,

Zhengzhou 455003, China; 4. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 455003, China)

Abstract: To quantitatively analyze the changing characteristics of extreme precipitation in the Anyang area at the eastern foot of the Taihang Mountains, the innovative trend analysis method (ITA) and the improved ITA method

收稿日期: 2025-06-05

修回日期: 2025-11-20

接受日期: 2025-12-01

基金项目: 安阳市科技攻关项目(2023C01SF078); 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金项目(KY202342)

作者简介: 王建新(1967-),男,正研级高级工程师,主要研究方向为灾害性天气预报技术

通信作者: 竹磊磊(1979-),女,高级工程师,硕士,主要研究方向为气候预测与气候变化,Email: zhuleilei2005@163.com

引用格式: 王建新,李一凡,竹磊磊,等. 基于ITA、ITA-CB法的安阳区域极端降水变化趋势研究[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 185-197.

Wang J X, Li Y F, Zhu L L, et al. Research on the variation trend of regional extreme precipitation in Anyang based on ITA and ITA-CB methods[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 185-197.

(ITA-CB) were used to analyze the trend changes and spatial distribution characteristics of extreme precipitation indices in the Anyang area from 1958 to 2023 at both station and regional scales. The results show that: ①The trend consistency of the ITA method with the linear regression method and the Mann-Kendall test is 86.7% and 78.8% respectively, which verifies the applicability of the ITA method in extreme precipitation analysis and provides a powerful supplementary tool for hydro-climatic trend analysis. ②The change of regional total precipitation is mainly driven by heavy precipitation events, and the total amount of extreme precipitation is mainly concentrated in a few of the most intense precipitation events, which highlights the decisive role of extreme events in the annual water balance. ③The variation trends of most extreme precipitation indices show regional consistency, but there are differences between different stations. The hilly and plain areas have their own special climate response synchronicity, and there is a climate feature of “alternating drought and flood”. ④The intensity of extreme precipitation events and their contributions to total precipitation in the hilly area show an increasing trend, while the opposite change is true in the mountainous area. ⑤The frequency and total amount of extreme precipitation events in the mountainous area are greater than those in the hilly and plain areas, and the intensity of extreme precipitation events in the hilly area is greater than that in the mountainous and plain areas. ⑥In the region, PRCPTOT and R95p show an upward trend in the low-value and high-value areas, while a downward trend in the middle-value area. This structural feature of “increase at both ends and decrease in the middle” indicates that the polarization trend of precipitation in the region will intensify in the future, suggesting that both drought events and extreme rainstorm events may increase simultaneously.

Key words: ITA method; ITA-CB method; extreme precipitation index; Spearman rank correlation coefficient

0 引言

全球气候变化背景下,极端气候事件频发已成为威胁区域生态安全与可持续发展的重要因素。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出随着全球气温上升,复合型极端气候事件的发生频率、强度及空间异质性显著增加,对地形过渡带与生态脆弱区的影响尤为突出^[1-2]。河南北部太行山东麓地处华北平原与山地的过渡带,地形抬升作用明显,是极端降水等气象灾害的多发区。安阳作为该区域的典型代表,历史上多次遭遇特大暴雨引发的洪涝灾害,其气候变化敏感性与灾害风险亟需科学量化和精准评估^[3-6]。

传统极端气候趋势分析方法如线性回归法、滑动平均法和 Mann-Kendall 检验等,已在长时间序列的趋势预测中广泛应用,但这些方法要求时间序列够长、满足正态分布、内部数据具有独立性,但极端降水的时间序列往往具有非平稳性和显著的时空异质性,不能满足这些特征,于是一些专家提出预白化(Pre-whitening)处理方法,这种方法虽可消除序列的自相关影响,但容易丢失原始序列中潜在的重要趋势特征^[7-8]。为克服这一局限,近年来学者们对水文气象研究采用创新趋势分析法(Innovative Trend

Analysis, ITA)及其改进方法 ITA-CB (ITA-Change Boxes)^[9-15]。该方法无需数据分布假设,且能分解序列的整体与局部趋势,并量化趋势的相对变化率,但该方法在太行山东麓这一复杂地形区的气候趋势预测中缺乏应用及系统验证。

本文聚焦太行山东麓的安阳,基于1958—2023年逐日降水序列,利用 ITA 和 ITA-CB 法对极端降水指数进行趋势分析,将结果与线性回归、Mann-Kendall 检验法对比,从宏观与微观角度解析极端降水指数时间序列变化特征,并量化其变化程度,同时利用 Spearman 秩相关系数刻画站点内部与站点间极端降水指数间的相关关系,以期全面把握该区域极端降水的变化趋势。本研究主要解决以下关键问题: ①站点与区域尺度极端降水指数的变化趋势特征。 ②ITA 和 ITA-CB 与传统趋势预测方法在该区域极端降水指数评估中的一致性及适用性。

1 研究区概括与数据来源

1.1 研究区概况

安阳位于太行山东麓与华北平原的过渡地带,地理坐标 35°41'~36°21'N、113°38'~114°59'E。全域地势西高东低,呈阶梯状分布,平原、山地、丘陵和洼地分别占总面积的 53.8%、29.7%、10.8% 和 5.7%。

研究区内设有一个国家气候观象台(安阳站,海拔194.8 m)以及4个国家基本气象站(林州站,海拔414.4 m;汤阴站,海拔93.0 m;滑县站,海拔62.1 m;内黄站,海拔51.6 m)。该区域属温带季风气候,受季风环流与太行山地形抬升影响,1958—2023年年平均降水量616.8 mm,汛期(6—8月)降水量占全年降水总量的61.6%。

1.2 数据来源

本研究使用的逐日降水量数据来源于河南省气象局气象探测数据中心,选取时段为1958—2023年;区域数字高程模型(DEM)数据下载自地理空间数据云网站(www.gscloud.cn);区域行政区划数据引自规划云网站(datav.aliyun.com)。

2 研究方法

2.1 极端降水指数的定义

极端气候事件通常采用出现频率、强度及持续时间等指标衡量其主要特征。在国际气候变化监测和指标专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices,ETCCDI)对极端降水指数定义的基础上,本研究将ETCCDI推荐的极端大雨日数(R20)阈值由20 mm/d调整为25 mm/d,与《降水量等级》(GB/T 28592—2012)中“大雨”标准保持一致^[13],并将该指标记为R25。此外,鉴于安阳地处太行山东麓,地形对降水过程影响显著,为更全面地反映极端降水事件的变化特征,选取了极端降水强度(EPII)和极端降水贡献率(EPCR)等13个极端降水指数进行分析(表1)。

在计算安阳区域尺度的极端降水指数时,采用IDW(Inverse Distance Weighting)插值法^[11],取幂指数 $p=2$,设置网格为 $0.2^{\circ}\times0.2^{\circ}$,对安阳区域各站点的日降水量进行空间插值,从而得到区域每日平均雨量,通过计算该雨量的统计量得出区域尺度的极端降水指数。

2.2 评估方法

2.2.1 ITA法

ITA法是由Sen^[10]提出的非参数检验法,用于时间序列降水趋势分析,适用于非线性和不要求特定分布的时间序列。该方法的核心步骤是将时间序列从中点划分为前半序列和后半序列,并分别按降水量的升序排列,然后将前半序列为水平坐标、后半序列为垂直坐标的散点绘制在二维笛卡尔坐标系中,并用一条 45° 的直线将坐标轴划分为上下相等的两个三角形,根据散点图的分布情况确定序列的升降趋势。若散点主要聚集在 45° 直线上,表明该时间序列无明显趋势;若散点集中在上三角区域,表示序列呈上升趋势,位于下三角区域则表明下降趋势^[10-14]。

对于可能存在的非单调变化,可将样本分为低值、中值、高值三组详细分析,即考虑到序列随时间的变化关系,将序列按照 $x<X-S$ 、 $X-S<x<X+S$ 、 $x>X+S$ 确定降水低值、中值、高值区的范围(X 为前半序列的均值; S 为前半序列的标准差)^[15-16]。对于ITA法的降水趋势判断参数(D),因其数值较小,为与Mann-Kendall检验和线性回归分析结果保持同等量级,将 D 值乘以10后再进行比较和讨论。ITA法中降水趋势判断参数的计算公式如下:

表1 极端降水指数

Tab.1 Definition of extreme precipitation indices

分类	指数名称(代码)	定义	单位
频率指数	年降水日数(R1)	年日降水量 ≥ 1 mm的总日数	d
	中雨以上日数(R10)	年日降水量 ≥ 10 mm的总日数	d
	大雨以上日数(R25)	年日降水量 ≥ 25 mm的总日数	d
	持续干燥指数(CDD)	年日降水量 < 1 mm的最长连续日数	d
	持续湿润指数(CWD)	年日降水量 ≥ 1 mm的最大持续日数	d
强度指数	日降水强度(SDII)	年日降水量 ≥ 1 mm的总量与日数之比	mm/d
	最大1日降水量(RX1day)	年最大日降水量	mm
	最大5日降水量(RX5day)	年最大连续5日的降水量	mm
	极端降水强度(EPII)	极端降水量与极端降水日数之比	mm/d
	极端降水贡献率(EPCR)	极端降水量占年降水总量的百分比	%
总量指数	年降水总量(PRCPTOT)	日降水量 > 1 mm的年累积降水量	mm
	强降水总量(R95p)	日降水量 $> 95\%$ 分位值的年累积降水量	mm
	极端强降水总量(R99p)	日降水量 $> 99\%$ 分位值的年累积降水量	mm

$$D=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{10(y_i-x_i)}{\bar{x}}, \tag{1}$$

为检验降水趋势的显著性,计算ITA法的Z统计量。计算公式如下:

$$Z_{ITA}=\frac{s}{\sigma_s}, \tag{2}$$

$$s=\frac{2}{n}(\bar{y}-\bar{x}), \tag{3}$$

$$\sigma_s=\frac{2\sqrt{2}}{n\sqrt{n}}\sigma\sqrt{1-\rho_{12}}, \tag{4}$$

式中: n 为每个子序列的数据数量; x_i 为数据的前半序列; y_i 为数据的后半序列; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为前半和后半序列的算术平均值; Z_{ITA} 为趋势检验的Z统计量; s 为序列趋势线的斜率; σ_s 为 s 的标准差; σ 为原始序列的标准差; ρ_{12} 为前半序列与后半序列之间的相关系数。

降水趋势斜率的置信度极限 $CL_{(1-\alpha)}$ 可表示为:

$$CL_{(1-\alpha)}=\pm s_{seri}\sigma_s, \tag{5}$$

式中: s_{seri} 代表标准正态分布在给定显著性水平 α 下的双侧临界值。

2.2.2 ITA-CB法

ITA-CB法是在ITA基础上改进的,引入相对变化率量化分析降水序列的整体和局部变化趋势,将样本分为低值、中值、高值三组,获取每组数据的相对变化率后^[7,17],绘制箱形图以展示上边界、最小值线、最大值线以及均值线,并在箱形图中附加四分位距(IQR)^[18]的一半值线,可视化降水趋势的变化率。变化率均值>0,说明该组降水序列呈增加趋势;变化率均值<0,说明该组降水序列呈减少趋势。此外,IQR/2值线的位置提供了一个衡量标准,描述了四分位距中间50%数据的分布中心位置,同时也可看出该中心位置到最小值线或最大值线的距离。若箱形图显示变化率均值线>0,且高于(低于)IQR/2值线,说明均值线接近最大(小)值线,暗示降水变化趋势为正,且变化趋势加强(减缓);若箱形图显示变化率均值线<0,且低于(高于)IQR/2值线,说明均值线接近最小(大)值线,暗示变化趋势为负,且变化趋势加强(减缓)。

2.2.3 Spearman秩相关检验

Spearman秩相关检验是一种非参数检验法^[19],在水文气象领域应用广泛^[20-21],设有两个长度为 n 的序列,即 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 和 $Y=\{y_1,y_2,\cdots,y_n\}$ 。

对两个序列中的元素分别进行降序排列,排序后的序列记为 X' 和 Y' 。记 R_{x_i} 为原序列 X 中 x_i 在 X' 的排位, R_{y_i} 为原序列 Y 中 y_i 在 Y' 的排位(若存在重复数据则取平均排位),则可以得到 X 和 Y 对应的秩次序列为 $R_X=\{R_{x_1},R_{x_2},\cdots,R_{x_n}\}$ 和 $R_Y=\{R_{y_1},R_{y_2},\cdots,R_{y_n}\}$ 。进一步计算得到Spearman秩相关系数为:

$$r_s=1-\frac{6\sum_{i=1}^n(R_{x_i}-R_{y_i})^2}{n(n^2-1)}. \tag{6}$$

式中: r_s 的取值范围 $[-1,1]$,当 $|r_s|$ 越大时,表明两序列的相关性越强;反之越弱。 $r_s>0$,表明两序列正相关;反之,为负相关。

2.2.4 Mann-Kendall检验

Mann-Kendall检验是由Mann和Kendall分别提出和完善的一种非参数统计检验方法,以下简称M-K检验。该方法不对数据的分布进行假设,被广泛用于极端气候指数变化趋势的显著性检验^[22-24]。本文当检验参数 $|Z|\geq 1.64、1.96、2.58$ 时,分别表示通过了显著性水平为90%、95%、99%的检验。

3 结果与分析

3.1 站点尺度极端降水指数分析

3.1.1 极端降水指数的变化趋势

采用ITA法、M-K法与线性回归法^[16]对站点的极端降水指数变化趋势分别进行评估,结果汇总至表2。表中ITA法参数 D 值、M-K检验参数 Z 值与线性回归参数 b 值为正,代表降水呈增加趋势;否则,降水呈下降趋势。

在总量指数中,林州站PRCPTOT、R95p、R99p三种方法均显示极端降水为下降趋势;安阳站和汤阴站显示增加趋势;内黄站R99p显示下降趋势。在极端降水强度指数中,林州和内黄站的EPII和EPCR三种方法均显示下降趋势,安阳和汤阴站表现为增加趋势;SDII在安阳、汤阴和滑县站均呈增加趋势。RX1day和RX5day在汤阴站表现为一致的增加趋势。在频率指数中,所有站点的R1和CWD均显示一致的下降趋势,特别是林州、安阳和内黄站的CWD显著下降,反映出降水事件的发生频率和持续性在区域内普遍下降。安阳和汤阴站的R10表现为一致的增加趋势。汤阴、内黄和滑县站的R25均表现为增加趋势。林州站的CDD增加,其余各站则呈现一致的下降趋势。

表2 各站点极端降水指数评估结果

Tab.2 Evaluation results of extreme precipitation index at each station

指数	林州站			安阳站			汤阴站			内黄站			滑县站		
	<i>b</i>	<i>Z</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>Z</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>Z</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>Z</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>Z</i>	<i>D</i>
R1	-0.05	-0.61	-0.42	-0.03	-0.51	-0.43	-0.03	-0.61	-0.25	-0.02	-0.11	-0.12	-0.05	-0.68	-0.40
R10	0.00	-0.68	0.16	0.06*	1.28	1.23	0.01	0.01	0.23	-0.01	-0.61	0.04	-0.02	-1.05	-0.26
R25	0.00	-0.94	0.00	0.00	-0.11	-0.15	0.02	1.24	1.47	0.01	-0.02	0.25	0.00	0.09	0.24
CWD	-0.01	-1.02	-1.20*	-0.01	-0.78	-1.35*	-0.01	-0.88	-1.27	-0.02*	-1.63	-1.50*	-0.02	-1.75*	-1.09
CDD	0.01	0.21	0.02	-0.06	-0.43	-0.57	-0.07	-0.81	-0.57	-0.11	-1.21	-0.78	-0.07	-0.52	-0.53
SDII	0.00	-0.71	-0.06	0.03	0.61	1.03	0.03	1.62	1.00	0.00	-0.34	0.12	0.02	0.04	0.73
RX1day	0.05	-0.63	-0.24	0.35	-0.28	1.54	0.22	0.07	1.01	-0.37	-1.17	-0.64	-0.07	-0.65	0.06
RX5day	0.00	-0.46	-1.06	0.64	-0.07	0.96	0.46	0.67	0.58	-0.44	-0.29	-0.66	0.25	0.34	0.61
EPII	-0.08	-0.99	-0.66	0.19	0.30	0.98	0.17	0.64	0.89	-0.09	-0.75	-0.28	0.05	-0.10	0.51
EPCR	-0.02	-0.37	-0.21	0.02	0.47	0.18	0.02	0.00	0.03	-0.03	-0.09	-0.14	0.02	0.37	0.25
PRCPTOT	-0.68	-1.82*	-0.47	1.20	0.30	0.54	1.15	0.40	0.73	-0.27	-0.48	0.04	0.27	-0.72	0.28
R95p	-0.43	-1.20	-0.44	1.06	0.42	0.68	1.31	1.04	1.03	-0.23	-0.52	0.05	0.44	-0.39	0.49
R99p	-0.31	-0.99	-0.66	0.77	0.30	0.98	0.67	0.64	0.89	-0.30	-0.65	-0.15	0.20	-0.10	0.51

注:*和**分别表示通过了显著性水平为95%、99%的检验。

综合分析发现,处于丘陵地带的安阳站(海拔194.8 m)和汤阴站(海拔93.0 m)的极端降水总量指数PRCPTOT、R95p和R99p以及强度指数SDII、EPII和EPCR均显示为增加趋势,表现为极端降水事件的强度和全年降水贡献率的增加。然而,山区的林州站(海拔414.4 m)的相应指数显示出与丘陵区相反的趋势,与张金平和李香颜^[25]研究结果所指出的太行山沿线西部山区降水减少的趋势一致,但这种变化趋势的成因仍需进一步探讨。

3.1.2 极端降水指数的空间特征

将林州站作为太行山区的代表站,安阳站和汤阴站作为丘陵地带的代表站,内黄和滑县作为平原地带的代表站,基于安阳、林州、汤阴、内黄和滑县站

的13个极端降水指数,分别计算每对站点之间的Spearman秩相关系数,从而获得10组13×13的相关系数矩阵。相关关系特征统计结果见表3。

由表3可知,在95%显著性水平下,各指数显著相关的比例为60%~72%;在99%显著性水平下,比例为51%~64%,表明区域内极端降水事件存在明显的空间一致性。每对站点的正相关数量134~146个,负相关数量23~35个,表明区域内的极端降水指数变化趋势基本一致。强相关($|r|>0.7$)的数量在不同站点之间分布不均,比例0%~6%不等,反映出区域内极端降水的空间一致性存在差异。

进一步分析表3可知,安阳-汤阴站的强相关和95%显著性的比例为6%、68%,内黄-滑县为3%、

表3 站点对相关性统计量对比

Tab.3 Comparison of correlation statistics for sites

站点对	≥95%显著性		≥99%显著性		正相关数量/个	负相关数量/个	强相关数量/个	强相关比例/%
	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%				
林州-安阳	115	68	101	60	143	26	5	3
林州-汤阴	114	67	96	57	146	23	5	3
林州-内黄	102	60	87	51	138	31	0	0
林州-滑县	113	67	96	57	141	28	1	1
安阳-汤阴	115	68	103	61	146	23	10	6
安阳-内黄	112	66	90	53	136	33	4	2
安阳-滑县	115	68	99	59	146	23	2	1
汤阴-内黄	119	70	101	60	138	31	5	3
汤阴-滑县	120	71	101	60	141	28	4	2
内黄-滑县	122	72	108	64	134	35	5	3

注:强相关指相关系数 $|r|>0.7$ 。

72%,表明安阳-汤阴站所在的丘陵地带与内黄-滑县平原地带分别具有各自特殊的气候响应同步性;反之,林州-内黄站的强相关和95%显著性的比例为0%和60%,相关性为站点间最低,反映出太行山山区和平原之间降水过程的差异性,地形差异可能是导致林州与内黄站点相关性较弱的重要因素。康延臻^[26]研究指出,太行山山区和平原之间的降水过程存在显著差异,主要受地形、降水类型、降水强度和频次、时空分布以及天气系统的影响。

由图1可知,汤阴-滑县站持续干燥指数CDD的强相关性 $r=0.78$,揭示了丘陵与平原区域之间的干旱过程具有较强的空间一致性,同时,其持续干燥指数CDD与极端降水贡献率EPCR的正相关性 $r=0.39$,反映了丘陵和平原地带之间“旱涝交替”的气候特

征;同理,内黄-滑县站持续干燥指数CDD的强相关性 $r=0.80$,表示平原区域内部的干旱过程具有较强的空间一致性;同时,其持续干燥指数CDD与极端降水贡献率EPCR的正相关性 $r=0.23$,同样反映了平原区域内部“旱涝交替”的气候特征。这一发现为理解复杂地形背景下极端降水时空分布特征及区域防灾减灾提供了依据。

综上所述,从站点尺度分析,大多数极端降水指数变化趋势基本一致,极端降水事件存在明显的空间一致性,但不同站点间极端降水的空间一致性存在差异:安阳-汤阴站所在的丘陵地带与内黄-滑县平原地带分别具有特殊的气候响应同步性;太行山山区和平原之间降水过程也具有差异性;丘陵与平原区域之间、平原区域内部的干旱过程分别具有较强的空间一致性,且有“旱涝交替”的气候特征。

3.1.3 极端降水指数间的相关性

基于安阳、林州、汤阴、内黄和滑县五站的13个极端降水指数,分别计算各站点内部极端降水指数的Spearman秩相关系数,从而获得五组13×13的相关系数矩阵(图2)。各站点的年降水总量(PRCPTOT)与强降水总量(R95p)的相关系数均超过0.95,且与极端降水强度(EPII)的相关系数范围为0.78~0.87,反映出强降水事件在总量指标中所占的重要比重,表明总降水量变化主要受强降水事件驱动,与唐永兰等^[27]研究结果一致,即在华北特殊地形和天气系统作用下,暴雨过程中的小时强降水频发,致灾性尤为严重。

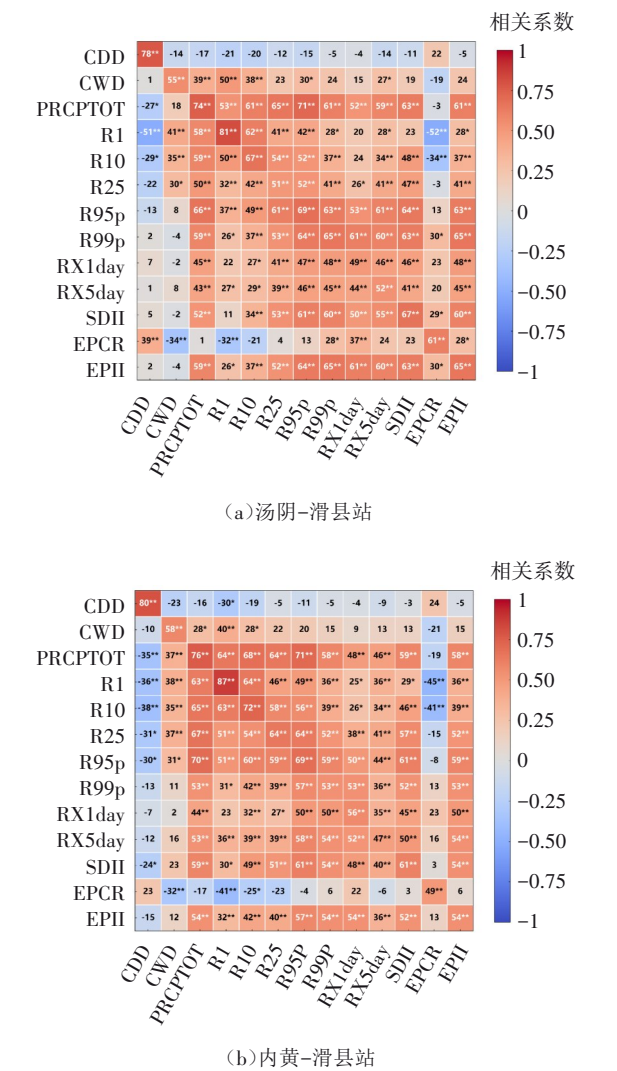
林州站的RX1day与R99p相关系数为0.93,高于RX1day与R99p的相关系数,其他站也有此特征。这一特殊结构表明,极端降水总量主要集中在少数几场强度最大的降水事件中。

滑县站的PRCPTOT与EPII以及EPCR指数间的相关性差异大(分别为0.87和-0.02),其他站也有此特征,揭示降水总量增加主要表现为极端降水强度的增加,而非贡献率的提升。

3.2 区域尺度极端降水指数分析

3.2.1 极端降水指数的变化趋势

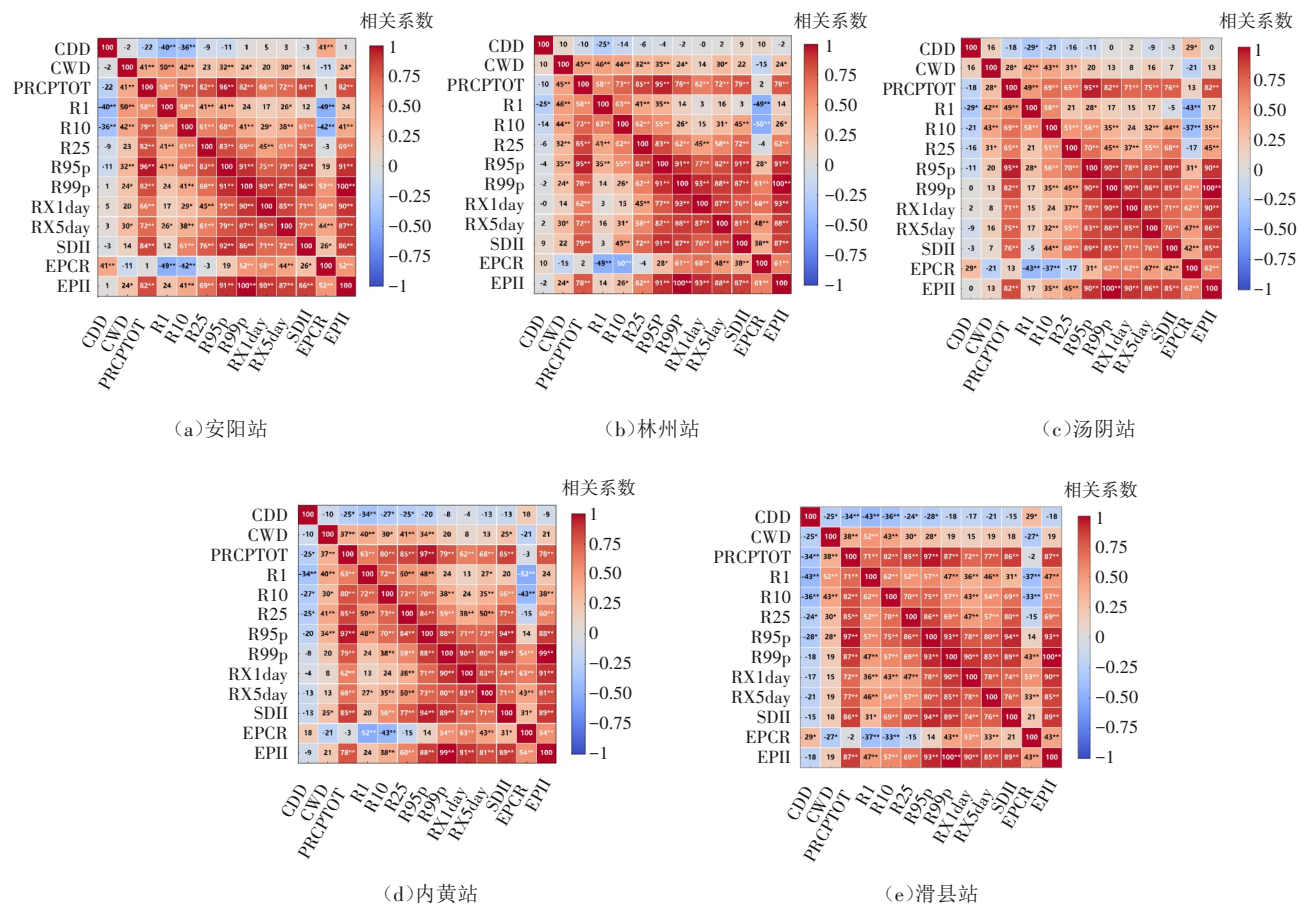
采用IDW(Inverse Distance Weighting)方法将站点数据插值到格点上,可得到区域极端降水指数。将区域极端降水变化趋势的评估结果汇总得到表4。由表可见,频率指数R1、CWD、CDD以及强度指数EPCR均表现出一致的负趋势,同时,强度指数SDII与频率指数R25呈现一致的增加趋势,表



注:图中*和** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。

图1 站点间极端降水指数的相关关系

Fig.1 Correlation of extreme precipitation indices among stations



注:图中*和** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。

图2 站点内极端降水指数之间的相关关系

Fig.2 Correlation of extreme precipitation indices within the station

表4 区域尺度极端降水指数评估结果

Tab.4 Evaluation results of extreme precipitation index at regional scale

参数	频率指数					强度指数					总量指数		
	R1	R10	R25	CWD	CDD	SDII	RX1day	RX5day	EPII	EPCR	PRCPTOT	R95p	R99p
b	-0.05	0.02	0.01	-0.01	-0.07	0.01	0.13	0.26	0.02	-0.01	0.33	0.47	0.08
Z	-0.73	-0.07	0.12	-0.51	-0.54	0.38	-0.66	-0.02	-0.69	-0.14	-0.65	-0.26	-0.69
D	-0.32	0.69	0.61	-1.38*	-0.44	0.52	1.06	0.31	0.14	-0.16	0.21	0.39	0.14

注:*和**分别表示95%和99%显著性水平。

明降水日数整体呈现减少的区域性特征,与何雪莉等^[28]的研究结果一致,即太行山地区降水日数减少尤为明显,特别是中小雨日数。ITA、线性回归在总量指数 PRCPTOT、R95p、R99p 以及强度指数 RX1day、RX5day、EPII 和频率指数 R10 均表现出正趋势,而 M-K 检验为负趋势。吴国栋等^[7]的研究指出,现有文献中使用的 Mann-Kendall 等方法除了受序列自相关影响可能产生不准确的结论外,其结论还往往停留在整体和宏观层面。本文用 ITA 和 ITA-CB 法,将 PRCPTOT 等指标基于时间序列分为前后

两部分,依据前半部分的均值和标准差确定低值区、中值区和高值区,计算各区及整体序列的趋势变化率,并统计各区和整体的最小值、均值和最大值,依次输出散点图和箱形图,以期更详尽地探究安阳区域极端降水指数的趋势变化。图3~图6展示了评估存在差异的部分极端降水指数的 ITA 和 ITA-CB 法评估结果,包括总量指数 PRCPTOT、R95p、频率指数 R10、强度指数 RX1day。

图3(a)显示,PRCPTOT 在低值区($<434.3\text{ mm}$)呈上升趋势,中值区($434.3\sim757.8\text{ mm}$)呈下降趋势,

在高值区(>757.8 mm)呈上升趋势;图3(b)中,低、中、高值区与整体的平均趋势变化率分别为13.8%、-2.3%、16.8%和1.8%;低值区、高值区平均趋势变化率的均值线位于IQR/2值线之上,更接近最大值线,因此其在低值区和高值区展示出加强的上升趋势,中值区均值线位于IQR/2值线之下,更接近最小值线,呈加强的下降趋势,整体为减缓的上升趋势。图4(a)显示,R95p在低值区(<318.3 mm)呈上升趋势,中值区($318.3\sim 557.1$ mm)呈下降趋势,高值区(>557.1 mm)呈上升趋势;图4(b)低、中、高值区与整体的平均趋势变化率分别为13.8%、-1.9%、17.8%和3.4%;低值区均值线接近最大值线,表明在低值区呈加强的上升趋势,另外,中值区呈加强的下降趋势,高值区则呈减缓的上升趋势,整体为减缓的

上升趋势。图5(a)显示,R10在低值区(<12.4 d)、中值区($12.4\sim 22$ d)、高值区(>22 d)均呈上升趋势;图5(b)低、中、高值区与整体平均趋势变化率分别为27.3%、3.6%、9%和8%;低值区、高值区均值线远离最大值线,因此呈减缓的上升趋势,而中值区呈加强的上升趋势,整体为减缓的上升趋势。图6(a)显示,RX1day在低值区(<42.3 mm)、中值区($42.3\sim 97.3$ mm)、高值区(>97.3 mm)均呈上升趋势;图6(b)中,低、中、高值区与整体的平均趋势变化率分别为17.4%、2.6%、30.9%和7.0%;三区均值线均低于IQR/2值线,呈减缓的上升趋势,因此整体也表现为上升但趋势减缓。

综合来看,频率指数R1、CWD、CDD以及强度指数EPCR均表现出一致的负趋势,同时,强度指数

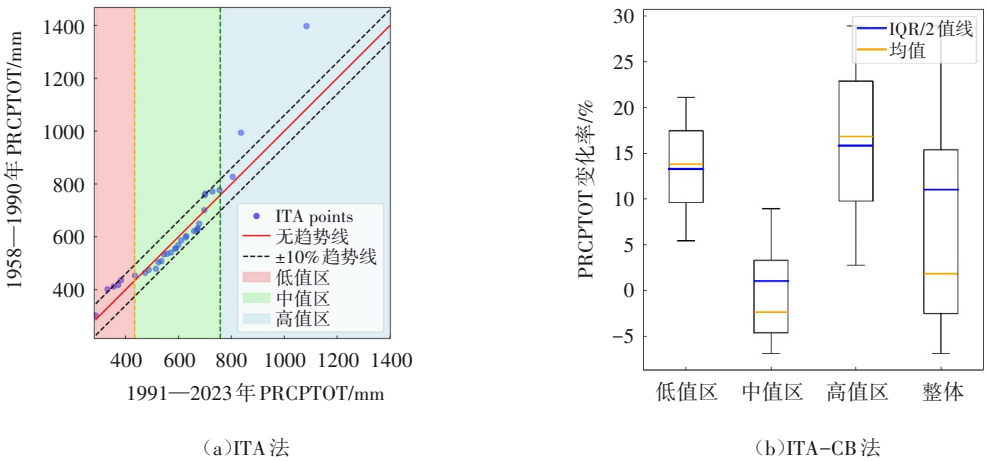


图3 安阳区域极端降水指数 PRCPTOT 趋势分析
Fig.3 Trend analysis of extreme precipitation indices PRCPTOT in anyang area

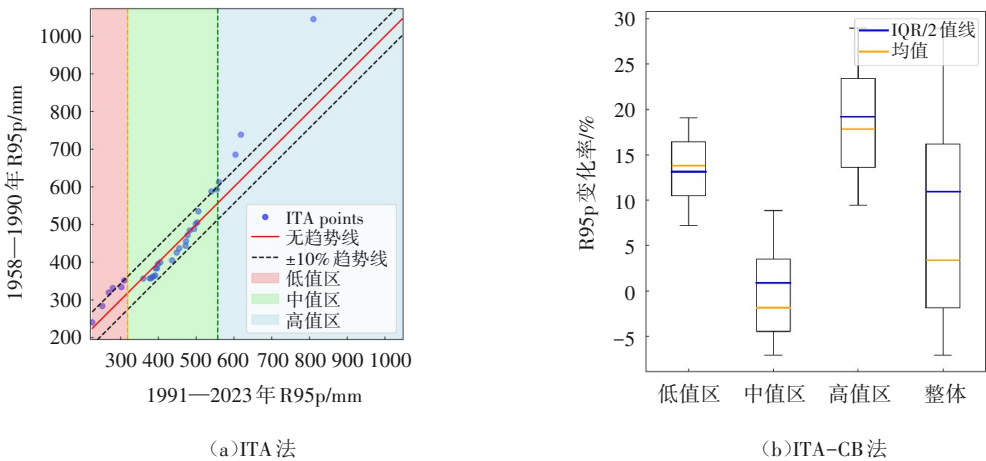


图4 安阳区域极端降水指数 R95p 趋势分析
Fig.4 Trend analysis of extreme precipitation index R95p in Anyang area

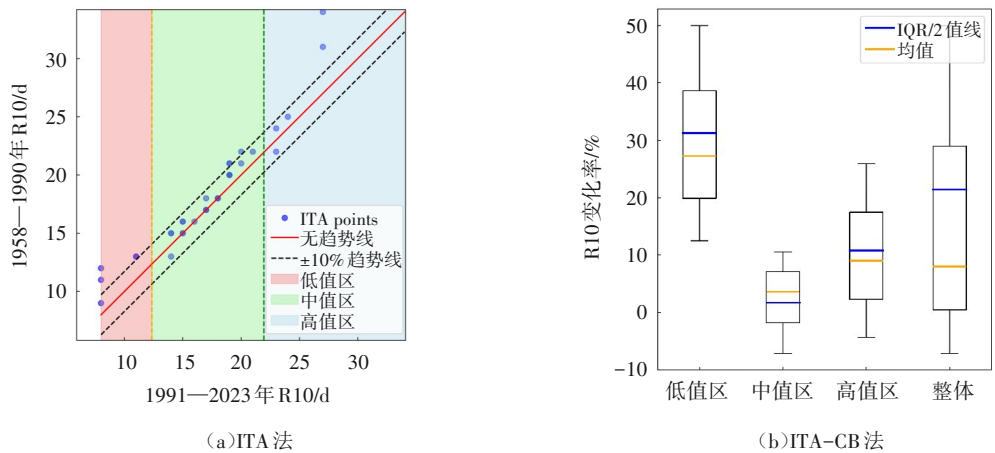


图5 安阳区域极端降水指数R10趋势分析

Fig.5 Trend analysis of extreme precipitation index R10 in Anyang area

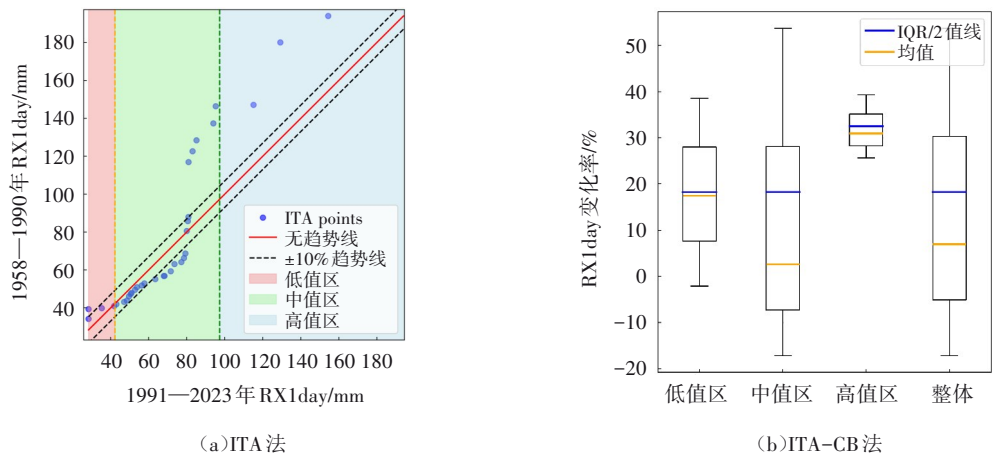


图6 安阳区域极端降水指数RX1day趋势分析

Fig.6 Trend analysis of extreme precipitation index RX1day in Anyang area

SDII 与频率指数 R25 呈现一致的增加趋势,表明降水日数整体呈现减少的区域性特征。PRCPTOT 在低值区和高值区展示出加强的上升趋势,中值区则呈加强的下降趋势,整体为减缓的上升趋势。R95p 低值区为加强的上升趋势,高值区呈现减缓的上升趋势,中值区呈加强的下降趋势,整体为减缓的上升趋势。R10 低值区、高值区呈现减缓的上升趋势,中值区呈加强的上升趋势,整体为减缓的上升趋势。RX1day 在低值区、中值区、高值区均呈现减缓的上升趋势,即整体表现为上升但趋势减缓。

3.2.2 极端降水指数的空间分布

为探究区域极端降水的空间分布特征,绘制了各指数的空间分布图,结果如图7~图9所示。频率指数(R1、R10、R25、CWD)、强度指数RX5day 值及总量指数(PRCPTOT、R95p),在空间上显示由西北

山区到中部丘陵再到东部平原逐渐递减分布,表明极端降水的频率和总量山区大于丘陵和平原。频率指数 CDD 的值总体区别不大,强度指数 SDII 和 EPCR 的值在空间呈现西北山区到中部丘陵再到东部平原的逐渐增强趋势;强度指数 RX1day 和 EPII 的值与总量指数 R99p 呈中部丘陵地带高、山地和平原地带低的分布特征,表明极端降水事件的强度丘陵地带大于山地和平原。

3.3 ITA 法与线性回归法、M-K 法的一致性分析

ITA 法与线性回归法和 M-K 法在原理和检验步骤上存在差异,导致它们的检验结果也有所不同。图10绘制了三种方法13种极端降水指数的统计变量分布散点图,展示了ITA法的参数D值与线性回归的参数b值、M-K检验的参数Z值之间的相关性。落入第1和第3象限的点数量,在D与b、D与Z的散

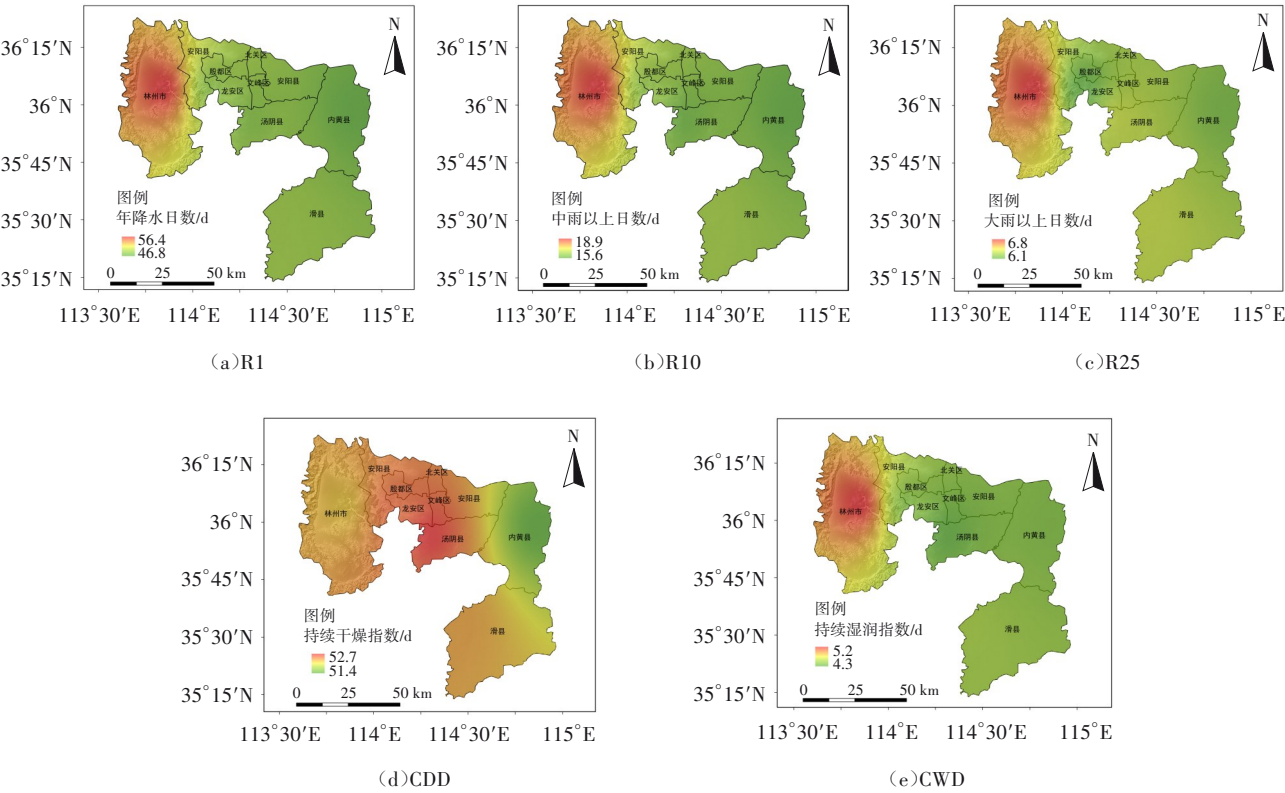


图7 安阳区域极端降水指数(频率指数)空间分布

Fig.7 Spatial distribution of extreme precipitation indices(frequency indices) in Anyang area

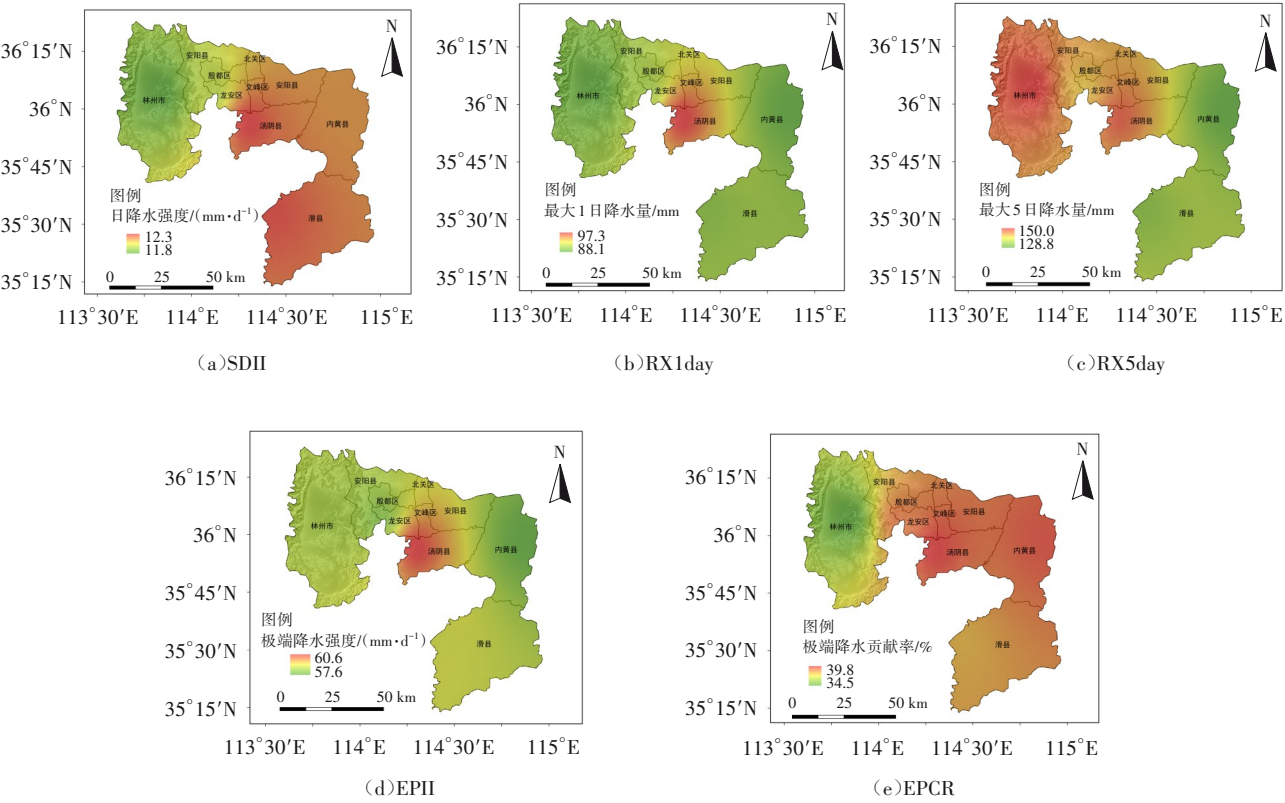


图8 安阳区域极端降水指数(强度指数)空间分布

Fig.8 Spatial distribution of extreme precipitation indices(intensity indices) in Anyang area

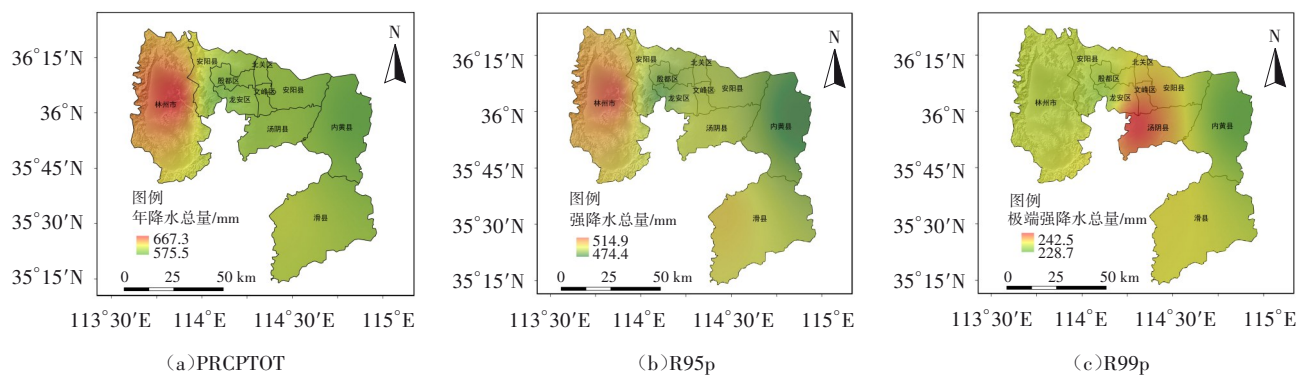


图9 安阳区域极端降水指数(总量指数)空间分布

Fig.9 Spatial distribution of extreme precipitation indices(total amount indices) in Anyang area

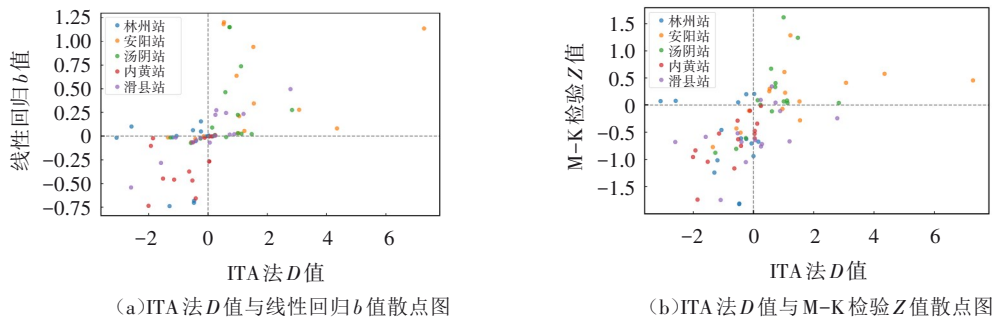


图10 3种趋势方法极端降水指数评估结果统计值分布

Fig.10 Statistical value distribution of the assessment results of the extreme precipitation indices by three trend methods

点图中分别为86.7%和78.8%,表明ITA法在对极端降水指数趋势的评估中,与线性回归法和M-K检验的一致性分别为86.7%和78.8%,验证了ITA方法在极端降水指数分析中的适用性。

4 结论

基于1958–2023年太行山东麓安阳区域一个国家气候观象台和四个国家基本气象站的日降水数据,运用ITA、ITA-CB以及Spearman秩相关系数方法对站点与区域的13个极端降水指数的变化趋势与空间特征进行了量化分析,同时对ITA法与Mann-Kendall检验、线性回归法的趋势分析一致性进行了统计,主要结论如下:

1)安阳丘陵区域(安阳站、汤阴站)的极端降水总量指数PRCPTOT、R95p和R99p,以及极端降水强度指数SDII、EPII和EPCR均呈现上升趋势,表明极端降水事件强度和贡献率在增加。而山区(林州站)的相应指数则显示下降趋势,反映出极端降水事件强度和贡献率减弱。

2)总降水量变化主要受强降水事件驱动。极端降水总量主要集中在少数几场强度最大的降水事件

中。降水总量增加主要表现为极端降水强度的增加,而非贡献率的提升。

3)从极端降水站点尺度来看,大多数极端降水指数变化趋势基本一致,极端降水事件存在明显的空间一致性,但不同站点间极端降水的空间一致性存在差异:安阳-汤阴站所在的丘陵地带与内黄-滑县平原地带分别具有特殊的气候响应同步性;太行山区和平原之间降水过程也有差异性;丘陵与平原区域之间、平原区域内部的干旱过程分别具有较强的空间一致性,且有“旱涝交替”的气候特征。

4)区域极端降水频率指数CWD、R1、R10、R25、强度指数RX5day值及总量指数PRCPTOT、R95p在空间上由西北山区到中部丘陵再到东部平原逐渐递减分布,表明极端降水的频率和总量山区大于丘陵和平原。极端降水频率指数CDD的值总体区别不大,强度指数SDII、EPCR的值在空间呈现西北山区到中部丘陵再到东部平原的逐渐增强趋势;强度指数RX1day、EPII的值与总量指数R99p呈现中部丘陵地带高、山地和平原地带低的分布特征,表明极端降水事件的强度丘陵地带大于山地和平原。

5)极端降水频率指数R1、CWD、CDD以及极端

降水强度指数EPCR均表现出一致的负趋势,同时,强度指数SDII与频率指数R25呈现一致的增加趋势,表明降水日数整体呈现减少的区域性特征。PRCPTOT在低值区和高值区展示出加强的上升趋势,中值区则呈加强的下降趋势,整体为减缓的上升趋势。R95p低值区呈现加强的上升趋势,高值区为减缓的上升趋势,中值区呈加强的下降趋势,整体为减缓的上升趋势。这种两头增、中间减的结构特征预示着未来区域降水的两极分化趋势将加剧,干旱和暴雨事件可能同时增加。R10、RX1day在低值区、中值区、高值区均呈现减缓的上升趋势,即整体表现为上升但趋势减缓。

6)ITA法与线性回归法、M-K法在原理和检验步骤上存在差异,导致检验结果也有所不同。ITA法在对极端降水指数趋势的评估中,与线性回归法和M-K检验的一致性分别为86.7%和78.8%,验证了ITA方法在极端降水指数分析中的适用性。

参考文献:

- [1] 赵晓雪,张慧慧,杨丽祯,等.黄河流域极端降水的时空演变特征[J].鲁东大学学报(自然科学版),2025,41(1):39-50.
Zhao X X,Zhang H H,Yang L Z,et al. Temporal and spatial evolution characteristics of extreme precipitation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition),2025,41(1):39-50.
- [2] 周波涛,钱进. IPCC AR6报告解读:极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展,2021,17(6):713-718.
Zhou B T, Qian J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021,17(6):713-718.
- [3] 刘姝,周煜,王福侠,等.太行山地形与水汽特征对“23·7”河北中部极端降水形成的影响机制[J]. 气候与环境研究,2025,30(1):24-38.
Liu S,Zhou Y,Wang F X,et al. Influence mechanism of Taihang Mountain topography and water vapor characteristics on the formation of “23·7” extreme precipitation event in central Hebei[J]. Climatic and Environmental Research,2025,30(1):24-38.
- [4] 钱维宏,孔海江,赵培娟,等.河南“21·7”特大暴雨常规与扰动天气形势分析[J]. 地球物理学报,2022,65(11):4208-4224.
Qian W H,Kong H J,Zhao Peijuan,et al. Anomaly-based versus full-field-based weather analysis on the extraordinary storm in Henan Province in July 2021[J]. Chinese Journal of Geophysics,2022,65(11):4208-4224.
- [5] 张智煜,黄安宁,黄丹青,等.从气候学角度理解“21·

- 7”河南特大暴雨的形成机理[J]. 大气科学学报,2024,47(5):681-700.
Zhang Z Y,Huang A N,Huang D Q,et al. Understanding the formation mechanism of the “21·7” extreme heavy rainfall event in Henan, China from a climatic perspective[J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2024,47(5):681-700.
- [6] 李国翠,铃伟妙,车少静,等.“21·7”特大暴雨系统北上引发太行山中段区域大暴雨成因分析[J]. 高原气象,2023,42(5):1260-1270.
Li G C,Qian W M,Che S J,et al. Characteristics and synoptic analysis of a regional heavy rain in middle part of Taihang Mountains caused by “21·7” torrential rain system moving northward[J]. Plateau Meteorology,2023,42(5):1260-1270.
- [7] 吴国栋,薛河儒,刘廷玺. 1961—2016年锡林河流域降水及平均气温变化特征及趋势[J]. 干旱区地理,2021,44(3):769-777.
Wu G D,Xue H R,Liu T X. Change characteristics and trends of precipitation and average temperature in the Xilinhe River Basin from 1961 to 2016[J]. Arid Land Geography,2021,44(3):769-777.
- [8] 张逸飞,曾建军. 疏勒河流域气候变化的时空分布特征分析[J]. 水利发展研究,2024,24(10):126-136.
Zhang Y F,Zeng J J. Temporal and spatial distribution of climate change in Shule River Basin[J]. Water Resources Development Research,2024,24(10):126-136.
- [9] 吴国栋,刘廷玺,薛河儒. 一种基于ITA改进的水文气象序列趋势分析法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):1-6.
Wu G D,Liu T X,Xue H R. An improved trend analysis method for hydro-meteorological time series based on ITA[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):1-6.
- [10] Sen Z. Innovative trend analysis methodology[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2012,17(9):1042-1046.
- [11] Sen Z. Trend identification simulation and application[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2014,19(3):635-642.
- [12] Sen Z. Innovative trend significance test and applications[J]. Theoretical and Applied Climatology,2017,127(3):939-947.
- [13] 张姣,胡庆芳,黄璟胜,等. 基于ITA法和Mann-Kendall法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):15-22.
Zhang J,Hu Q F,Huang J S,et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):15-22.
- [14] 黄丹,刘再斌,蒋勤明. 应用非参数的MK和ITA方法分析地下水水质参数变化特征——以新三矿含水层为

- 例[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):7-13.
- Huang D, Liu Z B, Jiang Q M. Application of non-parametric Mann-Kendall and innovative trend method analysis to groundwater quality parameters variation: A case study from aquifers in Xinsankuang Coal mine[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(3): 7-13.
- [15] 姚海坤,侍克斌,孔选昭,等. 渭干河上游流域近60年的入库水沙变化特征及趋势分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 121-129.
- Yao H K, Shi K B, Kong X Z, et al. Analysis of the characteristics and trend of runoff and sediment of reservoir in the upper reaches of the Weigan River in the past 60 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 121-129.
- [16] 刘利轲,赵超,沈凯琦,等. ITA法在极端气候趋势分析中的适用性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(5): 562-570.
- Liu L K, Zhao C, Shen K Q, et al. Application of innovative trend analysis method in extreme climate trend analysis[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(5): 562-570.
- [17] 肖晰文,张芸露,刘春红,等. 1961—2016年西昌气候干湿演变趋势研究[J]. 人民珠江, 2022, 43(10): 1-9.
- Xiao X W, Zhang Y L, Liu C H, et al. Evolution of dry/wet climate in Xichang from 1961 to 2016[J]. Pearl River, 2022, 43(10): 1-9.
- [18] 孙向东,刘拥军,陈雯雯,等. 箱线图法在动物卫生数据异常值检验中的运用[J]. 中国动物检疫, 2010, 27(7): 66-68.
- Sun X D, Liu Y J, Chen W W, et al. Application of box diagram method in abnormal value test of animal health data[J]. Chinese Journal of Animal Health Inspection, 2010, 27(7): 66-68.
- [19] 刘万新,刘洋,王瑶. 南水北调中线受水区2001—2023年水资源量与用水量变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 18-25.
- Liu W X, Liu Y, Wang Y. Changes in water resources and water consumption in receiving areas along the middle route of the South-to-North Water Diversion Project from 2001 to 2023[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5): 18-25.
- [20] 陈旭,韩瑞光. 基于水文分区的海河流域洪水演变影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(11): 69-77.
- Chen X, Han R G. An analysis of the influencing factors of flood evolution in Haihe River Basin based on hydrologic regionalizations[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(11): 69-77.
- [21] 竹磊磊,王纪军,李凤秀,等. 南水北调中线工程代表站降水极值的概率分布特征研究[J]. 河南科学, 2023, 41(9): 1300-1308.
- Zhu L L, Wang J J, Li F X, et al. Probability distribution characteristics of extreme precipitation at representative stations of the middle route of south-to-north water diversion project[J]. Henan Science, 2023, 41(9): 1300-1308.
- [22] 张志高,冯森,苗运玲,等. 1961—2018年安阳市大气降水资源变化特征分析[J]. 河南科学, 2019, 37(12): 1993-2001.
- Zhang Z G, Feng S, Miao Y L, et al. The change characteristics of atmospheric precipitation resources in Anyang City during 1961—2018[J]. Henan Science, 2019, 37(12): 1993-2001.
- [23] Wan L L, Bento V A, Qu Y P, et al. Drought characteristics and dominant factors across China: Insights from high-resolution daily SPEI dataset between 1979 and 2018[J]. Science of the Total Environment, 2023, 901: 166362.
- [24] Zhu Q, Zhang H. Groundwater drought characteristics and its influencing factors with corresponding quantitative contribution over the two largest catchments in China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127759.
- [25] 张金平,李香颜. 豫北地区气温、降水变化的时空分布特征[J]. 气象科技, 2016, 44(6): 985-990.
- Zhang J P, Li X Y. Temporal-spatial distribution characteristics of temperature and precipitation in northern Henan[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(6): 985-990.
- [26] 康延臻. 太行山及以东邻近地区典型强降水过程的成因和中尺度特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- Kang Y Z. Study on the causes and mesoscale characteristics of typical heavy precipitation processes in the Taihang Mountains and adjacent eastern regions [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [27] 唐永兰,徐桂荣,唐国瑛,等. “23·7”华北特大暴雨过程小时强降水时空分布特征[J]. 大气科学学报, 2024, 47(5): 778-788.
- Tang Y L, Xu G R, Tang G Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of hourly heavy rainfall of the “23·7” heavy rainstorm event in North China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024, 47(5): 778-788.
- [28] 何雪莉,李亚男,石天宇,等. 1961—2018年太行山东西侧降水变化[J]. 山地学报, 2022, 40(1): 43-55.
- He X L, Li Y N, Shi T Y, et al. Precipitation changes to the eastern and western sides of the Taihang Mountains from 1961 to 2018 [J]. Mountain Research, 2022, 40(1): 43-55

(编辑 孟兰琳)