

李智才, 宋燕, 丁德平. 2010. 山西省主汛期极端降水变化特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 433-442. Li Zhicai, Song Yan, Ding Deping. 2010. Variation characteristics of the extreme precipitation event during the main flood period in Shanxi Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 433-442.

山西省主汛期极端降水变化特征

李智才^{1,2} 宋燕¹ 丁德平³

1 中国气象局培训中心, 北京 100081

2 山西省气候中心, 太原 030006

3 北京市气象局, 北京 100089

摘要 利用 NCAR/NCEP 再分析日资料计算了影响山西省区域的季风强度指数, 并以山西省 1960~2005 年逐日降水资料为基础, 采用线性趋势分析、小波分析等数理统计方法, 分析了 46 年来山西省主汛期极端降水的变化特征。结果表明: 考虑到季风在山西建立和撤退的多年平均日期, 山西省的主汛期定为 7 月上旬到 8 月中旬更为恰当; 山西省大部分地区主汛期降水量均呈下降趋势, 但日降水大于 30 mm 和 50 mm 降水量却有所增加, 尤以中部地区增多为主; 20 世纪 60 年代以来全山西省主汛期小雨日数明显减少; 进入 21 世纪后, 山西省主汛期降水虽然在减少, 但极端强降水的次数有所增加, 主要表现在中部地区大于 30 mm、大于 50 mm 降水的日数和强度均有增加或增强的趋势。在多暴雨年份, 500 hPa 位势高度异常场上在乌拉尔山附近地区易产生稳定的、强大的高压形势或阻塞形势, 贝加尔湖至巴尔喀什湖一带有强低压槽, 西太平洋副热带高压加强且北抬西伸, 山西处于强低压槽的东南侧与副高西北侧的交汇带, 且 850 hPa 风场异常显示华北地区被一致的偏南气流控制, 且与蒙古异常气旋南部的异常西风相遇, 极有利于山西产生极端强降水。

关键词 山西省 主汛期 极端强降水 夏季风指数

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0433-10 **中图分类号** P463.1 **文献标识码** A

Variation Characteristics of the Extreme Precipitation Event during the Main Flood Period in Shanxi Province

LI Zhicai^{1,2}, SONG Yan¹, and DING Deping³

1 *China Meteorological Administration Training Center, Beijing* 100081

2 *Shanxi Climate Center, Taiyuan* 030006

3 *Beijing Meteorological Bureau, Beijing* 100089

Abstract By using NCAR/NCEP reanalysis daily data, the monsoon intensity index affecting Shanxi Province is calculated. Based on daily precipitation data of the stations in Shanxi Province for 1960-2005, the characteristics of the extreme precipitation in Shanxi main flood period for recent 46 years are studied by using linear trend analysis, wavelet analysis, and composite analysis. The results show that the dates of the main flood period in Shanxi Province should be from the first ten days in July to the second ten days in August, due to the climatological average on-

收稿日期 2010-03-15 收到, 2010-05-25 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2007BAC03A01、2007BAC29B02 和山西省气象局 2009 重点课题“统计降尺度技术在山西月降水、气温预测中的应用研究”

作者简介 李智才, 男, 1962 年出生, 学士, 高级工程师, 主要从事气候预测及气候变化研究。E-mail: lizhic@126.com

通讯作者 宋燕, E-mail: songyan@cma.gov.cn

set and retreat of the summer monsoon in Shanxi Province. The rainfall in the main flood period over the most areas in Shanxi Province has a declining trend, but the rainfalls more than 30 mm and 50 mm have increasing trends, especially in the middle areas of Shanxi. The number of sprinkle (less than 1 mm) days has declined remarkably since the 1960s. Although the rainfall in the main flood period has still reduced, the number of rainstorms has increased since 2000. That is the number and intensity of rainfall more than 30 mm and 50 mm over the middle areas of Shanxi Province have increasing trends. In the rich rainstorm years, Shanxi Province is located in the convergent belt of the southeast part of the strong anomalous low pressure and the northwest part of the subtropical high in the 500-hPa potential height difference field, and North China is controlled by the strong south wind anomalies in 850-hPa wind difference field, which encounter with the anomalous west flow in the south of anomalous Mongolian cyclone, that is in very favor of strong rainstorm in Shanxi Province.

Key words Shanxi Province, main flood period, extreme precipitation, summer monsoon index

1 引言

汛期是一年中降水最集中、降水强度最大的时期，也是洪涝灾害多发时期，因此，历来是气象学者重点研究探讨的对象（冯明等，2000）。长期以来，人们多以月、旬、候降水资料研究汛期的降水气候特征（张启龙等，2001；张春林等，2008；张焱等，2008；王燕等，2009）。通常又把汛期中雨量高度集中、大雨以上降水出现概率最高的时段定义为主汛期。关于主汛期的确定有一些相应的研究（张秀丽等，2002；郝润全等，2005；王琳莉和陈星，2006）。

山西地处华北地区西部的黄土高原，也是东亚夏季风的北部边缘地带，降水主要集中在夏季，夏季降水的多寡决定了全年的旱涝情况。20世纪80年代以前，用5月下旬到10月上旬逐旬多年平均降水量占这一期间降水总量的比率来确定汛期，以此确定山西主汛期为7月下旬到8月上旬（山西省气象局，1989），即所谓“七下八上”。

20世纪70年代中后期华北进入一个暖而降水少的干旱时段（马柱国，2007），山西夏季降水也发生了一些变化，夏季降水的年际和年代际变化均十分明显（李智才等，2008；宋燕等，2008）。在这种情况下，原来确定的“七下八上”是否仍能代表山西的主汛期？由于夏季风的强弱会直接影响到山西夏季降水的多少（李智才等，2010），夏季风在山西区域的建立和撤退与山西的主汛期有什么联系？山西主汛期的降水尤其是极端降水事件的频率和强度有什么变化特征？大

气环流有哪些改变？这些问题目前还没有给出清晰回答。

在以往对极端气候事件的研究中，多集中于对平均状况如月平均气温和月降水量等资料的分析，它不容易反映出这些要素值的时空非均匀分布特点。近年来出现了不少以逐日资料为基础的相关研究工作（刘小宁，1999；翟盘茂等，1999；Zhai et al., 2005；孙凤华等，2007；王小玲和翟盘茂，2008）。在这些研究中，限于资料的选取，没有细致的刻划山西极端降水的时空变化特征，对山西主汛期极端降水事件的频率和强度的变化特征更是缺乏了解。因此，深入研究全球气候变暖背景下山西主汛期极端降水事件的变化特征并探讨其成因是非常必要的。

2 资料和方法

本文所使用的资料主要有两部分，一部分是1960~2005年山西省65站逐日降水资料，另一部分是NCEP/NCAR再分析逐月资料中的500 hPa高度场、850 hPa经向风资料、NCEP/NCAR再分析逐日温度、比湿等资料。

利用逐日的850 hPa温度、比湿资料计算了逐日假相当位温(θ_{sc})，将逐日 θ_{sc} 和850 hPa经向风作候平均，取25~54候的 θ_{sc} 和经向风资料，在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 作 θ_{sc} 和经向风沿 112.5°E 的时间—纬度剖面图，将某年候平均的 $\theta_{sc}=340\text{ K}$ 和候平均经向风为南风且南风风速 $\geq 2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等值线同时通过 35°N （山西省最南部边缘的纬度）后， $\theta_{sc}\geq 340\text{ K}$ 的持续候数与平均持续候数相比的标准化值定义为沿 112.5°E 东亚夏季风在 35°N 建立的夏

季风强度指数

$$I = \frac{S_j - \bar{S}}{\sqrt{\sum \frac{(S_j - \bar{S})^2}{n}}}$$

其中 $S_j = h_j / \bar{h}$, h_j 为第 j 年东亚季风建立后 $\theta_{sc} = 340 \text{ K}$ 越过 35°N 持续的候数; \bar{h} 为 1948~2007 年 $\theta_{sc} = 340 \text{ K}$ 越过 35°N 平均持续的候数; S_j 为第 j 年 35°N $\theta_{sc} \geq 340 \text{ K}$ 的持续候数与平均持续候数的比值; n 为总年数, 本文为 60; \bar{S} 为 60 年 S_j 的平均值。

3 结果与分析

3.1 主汛期的确定

利用第 2 节中的方法, 计算了历年夏季风在山西省建立和撤退的日期。经过计算, 1948~2007 年夏季风在山西省建立的气候平均日期为 37 候 (7 月上旬), 撤退的平均日期在 46.6 候 (8 月下旬) ($\theta_{sc} = 340 \text{ K}$ 等值线永久撤出 35°N 的候为季风撤退日期)。在季风建立 (撤退) 后, 山西的降水量均有明显的变化 (李智才等, 2010)。

利用 1960~2005 年山西 65 站的逐日降水资料, 计算了各旬的多年平均降水量、各旬降水量与夏季降水量的比值及各旬暴雨出现频次。

从图 1 中可以看出, 山西省各旬的多年平均降水量、各旬降水量与夏季降水量的比值及各旬

暴雨出现频次的变化趋势基本一致。6 月上旬、中旬及下旬的旬降水量、各旬降水量与夏季降水量的比值、暴雨出现的频次与 7、8 月各旬值相比均为低值。7 月上旬, 暴雨频次、旬降水量及与夏季降水量的比值同时出现跃增, 为夏季的第二高值; 7 月下旬, 降水及暴雨频次均为夏季的最高值。与 7 月上旬相比 7 月中旬降水量及暴雨频次虽然有所回落, 但从量级上看, 与 8 月上旬和中旬一致。

结合季风在山西的建立和撤退平均日期分析, 确定 7 月上旬至 8 月中旬为山西的主汛期。

从图 2 可以看出, 两者关系对应非常好, 并呈现明显的正相关, 当季风强度指数较高 (低) 时, 山西省主汛期暴雨频次偏多 (少)。夏季风强度指数与山西主汛期暴雨频次的相关系数为 0.4964, 通过了 0.001 的显著性检验。这说明山西省主汛期暴雨的发生与影响山西省的季风强度有极大的关系。

3.2 主汛期降水量的特征和趋势分析

山西省主汛期降水量 (图略) 在 147~255 mm 之间, 降水量由东南向西北减少, 等值线呈东北西南向分布。

山西区域主汛期平均降水量有明显的年际及年代际变化特征 (图 3a), 1982 年以前多为正距平, 1991 年后多为负距平, 表明 20 世纪 80 年代以来山西主汛期进入少雨期, 其线性趋势为

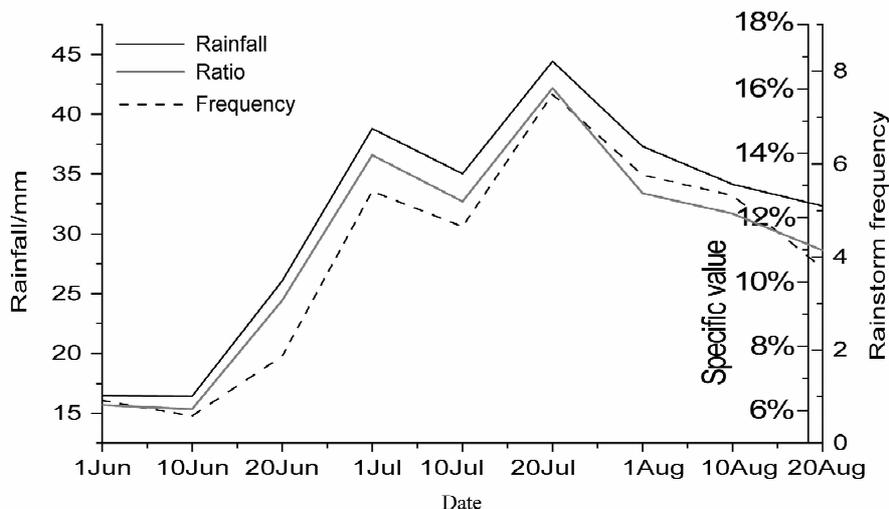


图 1 山西省 65 站 1960~2005 年夏季逐旬平均降水量及其 (共) 占夏季降水的比例与暴雨频数

Fig. 1 10-day rainfall and its ratio in the total summer rainfall, and the rainstorm frequency of 65 observation stations in Shanxi Province from 1960 to 2005

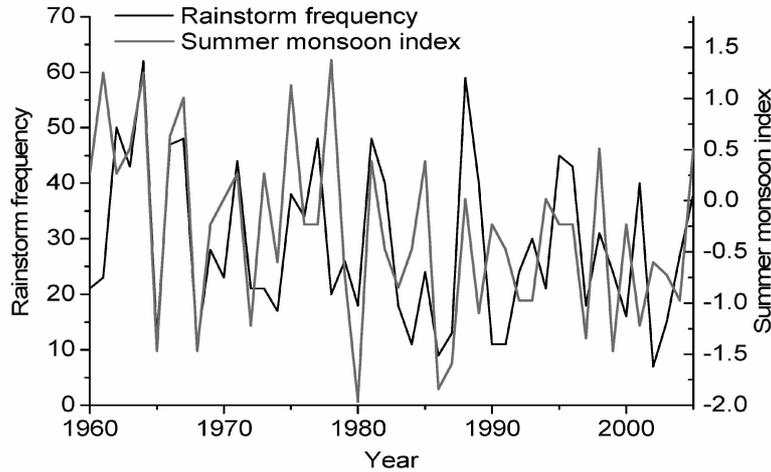


图2 夏季风强度指数与山西主汛期暴雨频次的曲线图

Fig. 2 Summer monsoon index and the rainstorm frequency during the main flood period in Shanxi Province

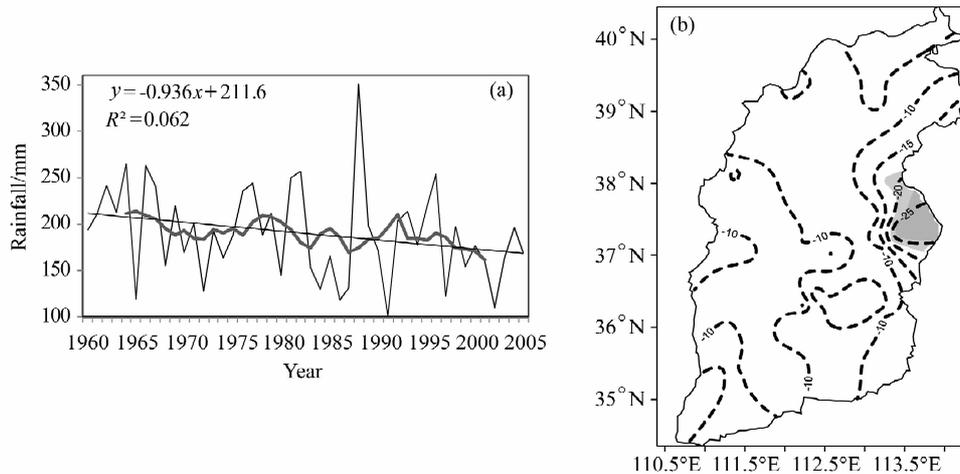


图3 山西省主汛期降水量的 (a) 年际变化 (深灰色曲线为9年滑动平均, 斜直线为线性拟合) 和 (b) 线性趋势 [单位: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 浅色和深色阴影分别通过 0.05 和 0.01 的显著性检验]

Fig. 3 (a) Interannual variation of rainfall (dark grey solid line denotes 9-year running mean, oblique solid line denotes linear fitting) and (b) linear trend [units: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, light and dark shaded areas are above 0.05 and 0.01 significance levels, respectively] during the main flood period in Shanxi Province

—9.4。这与马柱国 (2007) 的研究结果是相符的, 但与《山西天气预报手册》(山西省气象局, 1989) 及 (任国玉等, 2000) 有不一致的地方。Zhai et al. (2005) 的研究结果表明, 山西夏季降水是呈现正的趋势, 分析其原因这可能是二者分析的时段、站点数不同造成的。

图 3b 计算了各站主汛期降水量的线性趋势系数, 其线性趋势系数在 $0.1 \sim -30 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间, 除个别站的变化趋势不明显以外, 大部分站的主汛期降水量都呈下降趋势, 其中, 中部的东

部部分地区通过了 0.05 的显著性检验, 为显著性下降趋势。

3.3 山西主汛期极端降水的变化特征

为了分析山西省主汛期极端降水的变化特征, 计算了 1960~2005 年各站在主汛期期间各级降水量 (日降水量在 1 mm 以下、10 mm 以下、10 mm 以上、30 mm 以上、50 mm 以上) 的降水日数, 不同量级 (日降水量在 10 mm 以下、10 mm 以上、30 mm 以上、50 mm 以上) 的累积雨量及其与主汛期降水量的比值, 并利用各级降水量的

累积雨量与降水日数计算出各级降水量（日降水量在 10 mm 以下、10 mm 以上、30 mm 以上、50 mm 以上）的降水强度。

3.3.1 主汛期各级降水日数的变化特征

山西主汛期 1 mm 以下降水日数（图 4a）的线性趋势系数在 $-0.9 \sim 0.5 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间。南部和西部的部分地区呈现增加的趋势，北部大部分和南部地区为减少趋势，其中最北部地区和最南部的局部地区为显著性减少的趋势。

10 mm 以下降水日数（图 4b）的线性趋势系数在 $-1.7 \sim 0.3 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。山西省为一致的减少趋势，其中北部的大部分地区和南部的部分地区为显著性减少的趋势，显著性减少的区域多于 1 mm 以下降水日数显著性减少的区域。

10 mm 以上降水日数（图 4c）的线性趋势系数在 $-0.9 \sim 0.3 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。山西大部分地区仍然为减少趋势，其中东部的局部地区为显著性减少的区域，最北部和最南部的局部地区出现了降水日数增加的趋势。

山西 30 mm 以上降水日数（图 4d）的线性趋势系数在 $-0.3 \sim 0.2 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，50 mm 以上降水日数（图 4e）的线性趋势系数在 $-0.2 \sim 0.1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。二者的变化趋势分布基本一致，中北部的大部分地区为增加的趋势，南部地区为明显减少的趋势，但通过显著性检验的区域非常小。在全省降水普遍减小的情况下，强降水日数在中北部地区的增加说明这个地区极端强降水有所增加。

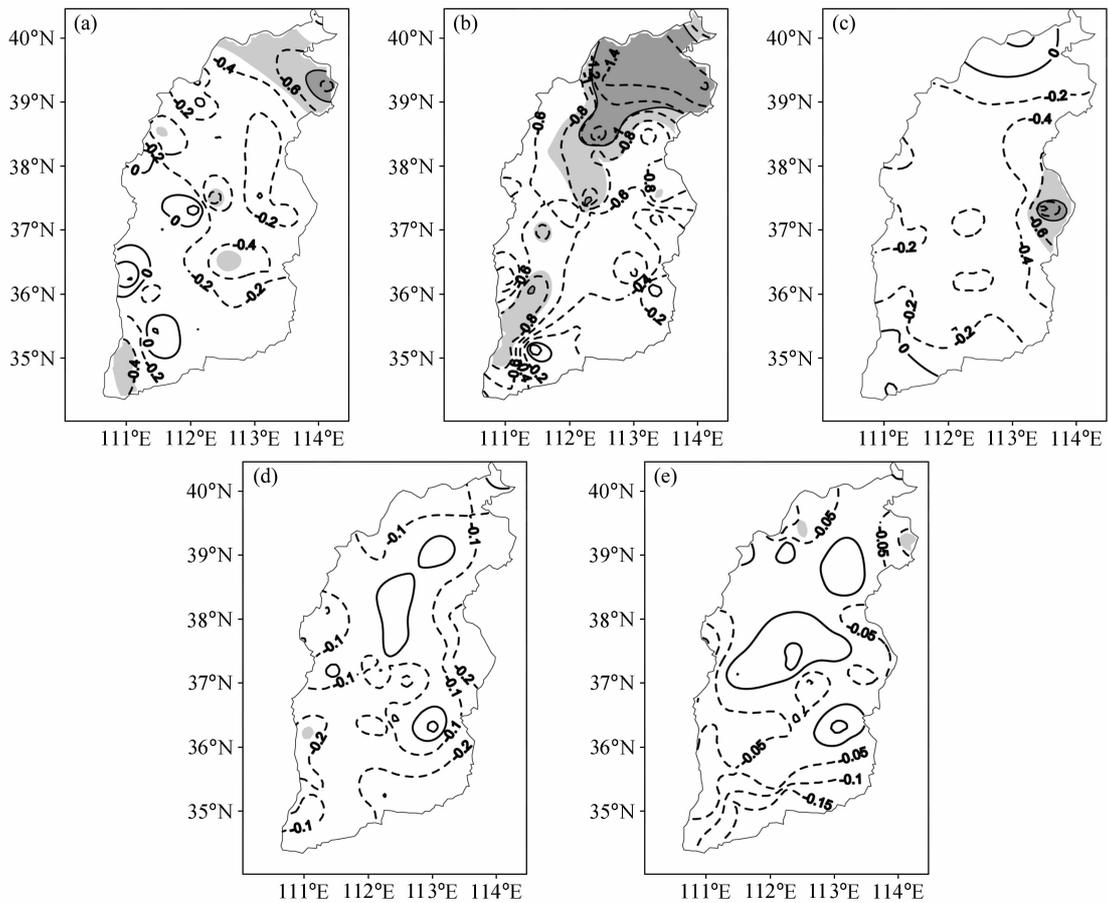


图 4 山西主汛期各级降水量的降水日数线性趋势 [单位: $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]: (a) $< 1 \text{ mm}$; (b) $< 10 \text{ mm}$; (c) $> 10 \text{ mm}$; (d) $> 30 \text{ mm}$; (e) $> 50 \text{ mm}$ 。浅色和深色阴影分别通过 0.05 和 0.01 的显著性检验
Fig. 4 Linear trends of the precipitation days during the main flood period in Shanxi Province [units: $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]: (a) $< 1 \text{ mm}$; (b) $< 10 \text{ mm}$; (c) $> 10 \text{ mm}$; (d) $> 30 \text{ mm}$; (e) $> 50 \text{ mm}$. Light and dark shaded areas are above 0.05 and 0.01 significance levels, respectively

3.3.2 主汛期各级降水强度的变化特征

从图 5 可以看出, 10 mm 以下降水强度 (图 5a) 的线性趋势系数在 $-0.2 \sim 0.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。除西部和西北部地区为明显减弱趋势以外, 其余地区为增强的趋势, 但没有通过显著性检验的区域。

10 mm 以上降水强度 (图 5b) 的线性趋势系数在 $-2.7 \sim 1.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。山西中部大部分地区为增强的趋势, 其余地区为减弱的区域, 其中南部的局部地区为显著性减弱。

山西省 30 mm 以上降水强度 (图 5c) 的线性趋势系数为 $-6.1 \sim 5.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、50 mm 以上降水日数 (图 5d) 的线性趋势系数为 $-10.3 \sim 5.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。二者的变化趋势分布也基本一致, 中北部的部分地区为增强的趋势 (50 mm 降水强度增加趋势的范围大于 30 mm 降水强度增加趋势的范围), 其余地区为减弱

的趋势, 南部减弱明显, 局部地区通过了显著性检验。

从以上分析可以看出, 无论是极端强降水日数还是强度, 在山西省中北部地区都有增加的趋势, 其他地区减小。

从近 20 年来各级降水强度的变化分布图上也表现出了与图 5 相同的分布特征, 即中部的降水强度增强, 南部和北部的强度在减弱。

3.3.3 主汛期各级降水的累积雨量与总降水量的比值的变化特征

山西省主汛期总降水量呈一致的减少趋势, 而各级降水量的降水日数和降水强度变化的分布则表现不一, 为了考察主汛期各级降水的相对变化特征, 图 6 给出了各级降水的累积雨量与总降水量的比值 (以下简称降水比值) 的变化分布。

从图 6 可以看出, 10 mm 以下降水比值 (图 6a) 的线性趋势系数在 $-3.3\% \sim 2.5\% (10 \text{ a})^{-1}$,

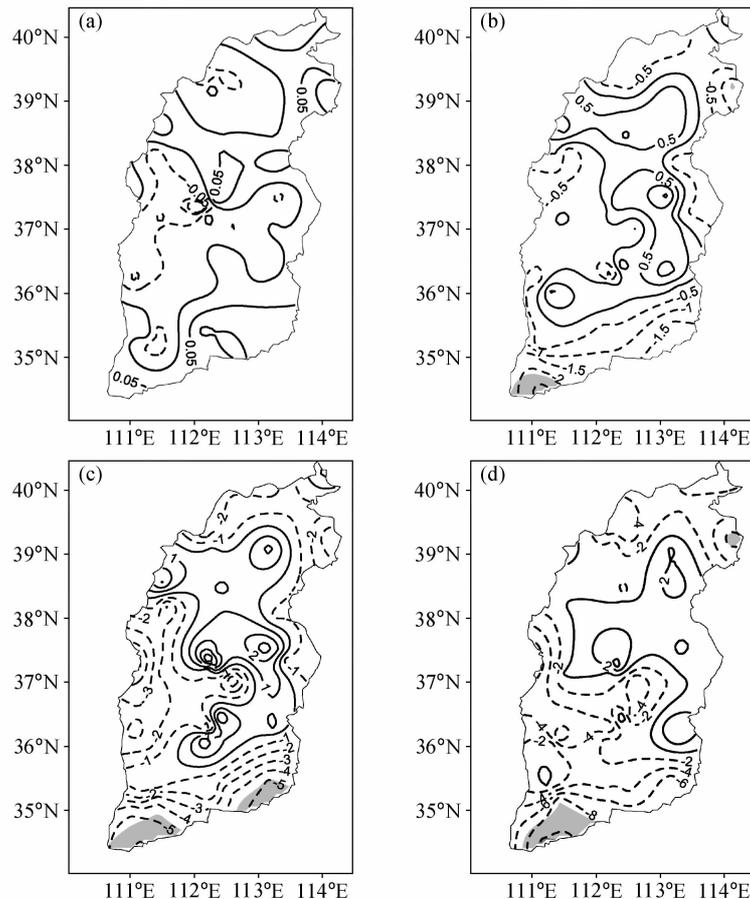


图 5 同图 4, 但为降水强度 [单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]: (a) $<10 \text{ mm}$; (b) $>10 \text{ mm}$; (c) $>30 \text{ mm}$; (d) $>50 \text{ mm}$

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the rainfall intensity [units: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]: (a) $<10 \text{ mm}$; (b) $>10 \text{ mm}$; (c) $>30 \text{ mm}$; (d) $>50 \text{ mm}$

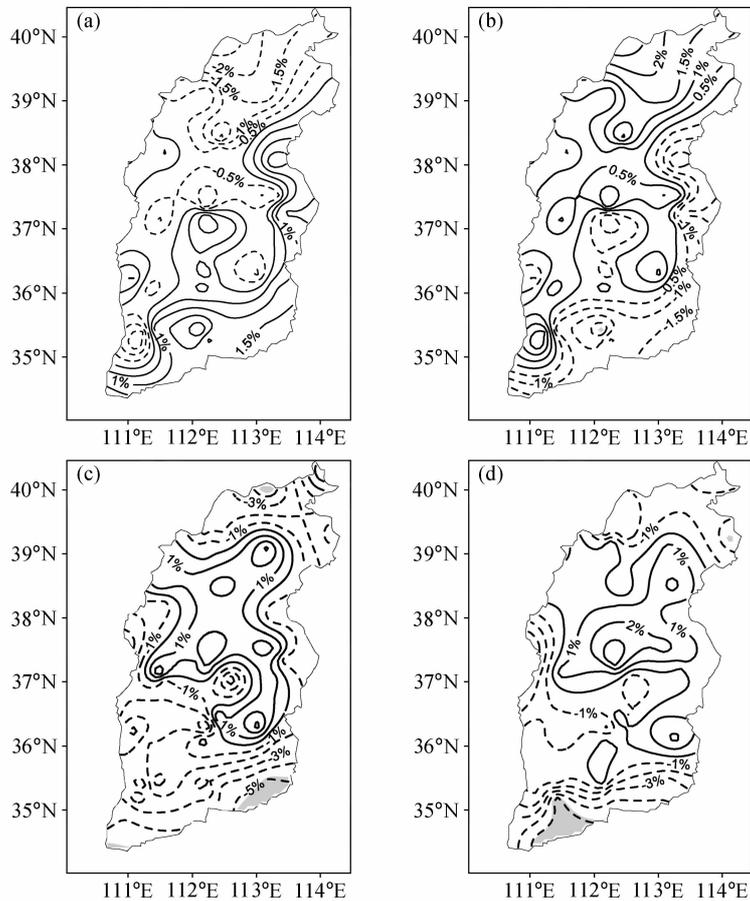


图6 山西省主汛期各级降水的累积雨量与总降水量的比值的线性趋势 [单位: $(10 \text{ a})^{-1}$]: (a) $<10 \text{ mm}$; (b) $>10 \text{ mm}$; (c) $>30 \text{ mm}$; (d) $>50 \text{ mm}$ 。阴影通过0.05的显著性检验

Fig. 6 Linear trends of the ratio of the accumulative rainfall to the total rainfall during the main flood period in Shanxi Province [units: $(10 \text{ a})^{-1}$]; (a) $<10 \text{ mm}$; (b) $>10 \text{ mm}$; (c) $>30 \text{ mm}$; (d) $>50 \text{ mm}$. Shaded areas are above 0.05 significance level

10 mm 以上降水比值 (图 6b) 的线性趋势系数在 $-2.5\% \sim 3.3\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。二者呈相反分布特征, 10 mm 以下 (以上) 降水比值在中北部地区为减少 (增加) 的趋势, 南部和中部小部分地区为增加 (减少) 的趋势。

30 mm 以上降水比值 (图 6c) 的线性趋势系数在 $-5.1\% \sim 3.6\% (10 \text{ a})^{-1}$ 、50 mm 以上降水比值 (图 6d) 的线性趋势系数在 $-5.5\% \sim 3.1\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。二者的变化趋势与该级降水强度变化趋势的分布 (图 5c 和 5d) 一致: 中北部的部分地区为增加的趋势 (50 mm 降水比值增加趋势的范围大于 30 mm 降水比值增加趋势的范围, 说明极端强降水趋势增加), 其余地区为减少的趋势, 南部减弱明显, 局部地区通过了显著性检验, 在这些区域极端强降水趋势减小。

3.3.4 主汛期暴雨的年代际变化特征

从图 7 可以看出, 山西暴雨 (日降水量大于 50 mm) 有明显的年代际变化特征。1965~1972 年、1982~1991 年为暴雨明显偏少期, 2000 年以后主汛期降水虽然仍在减少, 但从十年尺度以上周期看, 暴雨的次数有所增加, 这从山西省主汛期降水量及暴雨站·次数的 11 年滑动曲线 (图略) 中也可以看出。这说明山西的降水量虽然趋于减少, 但极端降水事件有增多的趋势。而且, 根据前面的分析, 以中北部地区增多为主。

从图 8 可以看出, 山西主汛期暴雨累积雨量所占降水总量的比值有明显的年代际变化, 在总体趋势下降的情况下, 20 世纪 90 年代初期, 比值呈现上升趋势, 说明山西主汛期极端降水事件有增多的趋势。

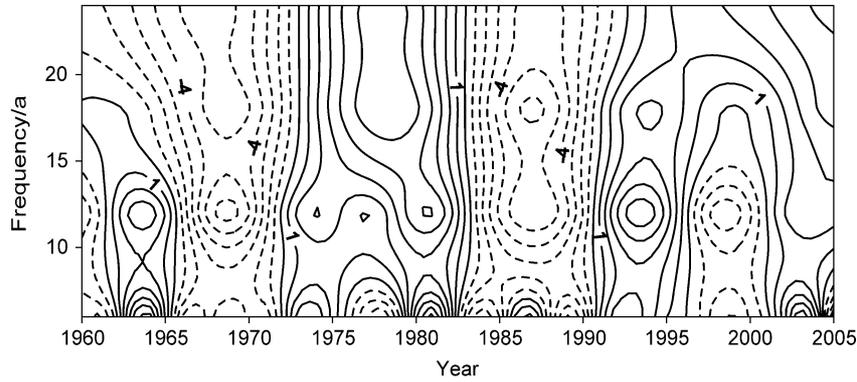


图7 山西主汛期暴雨频次的小波分析

Fig. 7 Wavelet analysis of rainstorm frequency during the main flood period in Shanxi Province

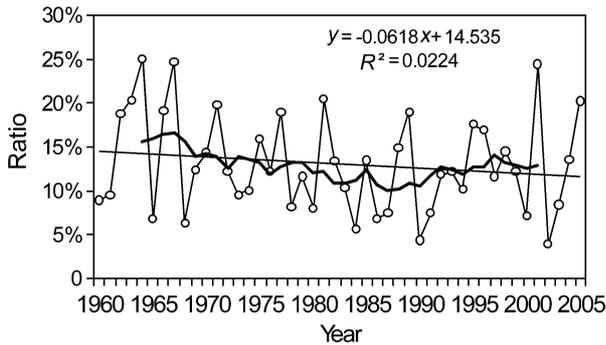


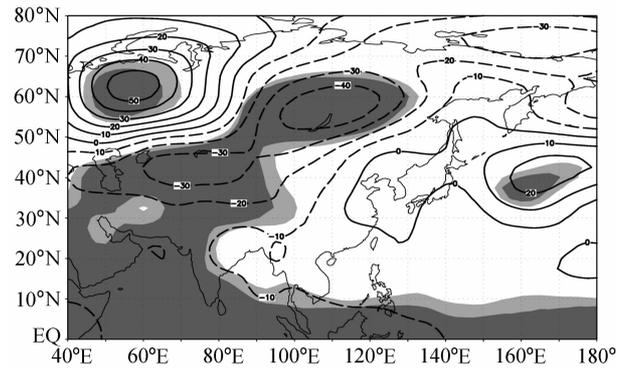
图8 山西主汛期暴雨的累积雨量与总降水量比值的年际及年代际变化(粗实线为11年滑动平均,细实线为线性拟合)

Fig. 8 Interannual and interdecadal variations of the ratio of the accumulative rainfall to the total rainfall during the main flood period in Shanxi Province (thick solid line denotes 11-year running mean, thin solid line denotes linear fitting)

4 山西主汛期暴雨的环流特征

根据主汛期暴雨站日数选取多暴雨年:1962、1964、1966、1967、1977、1981和1988年共7年,选取少暴雨年:1968、1984、1986、1990、1991和2002年共6年。

从500 hPa位势高度场暴雨出现多年减暴雨出现少年的差值场及 t 检验(图9)中可以看出,乌拉尔山附近、贝加尔湖至巴尔喀什湖一带、西北太平洋区均为异常大值区,且均有大片的区域通过了0.10或0.05的显著性检验,表明在主汛期乌拉尔山附近地区为显著的正异常、蒙古上空为显著的负异常,西北太平洋上空为显著的正异常,也就是中高纬度500 hPa呈现“+、-、+”

图9 多暴雨年与少暴雨年500 hPa位势高度场差值及 t 检验(浅色和深色阴影分别通过0.10和0.05的显著性检验)Fig. 9 The difference of 500-hPa geopotential height between the rich and poor rainstorm years and t -test (light and dark shaded areas are above 0.10 and 0.05 significance levels, respectively)

的分布特征时,这种正、负异常的分布一般表现为在乌拉尔山附近地区有稳定的高压形势或阻塞形势、在贝加尔湖至巴尔喀什湖一带有低压槽加强、西太平洋副高加强且北抬西伸,山西处于低槽的东南侧与副高西北侧的交汇带,因而容易产生极端强降水。

图10给出了山西主汛期多暴雨年减少暴雨年850 hPa风场差值场,在贝加尔湖以南及蒙古上空有一个气旋式环流异常,其南侧偏西气流异常与偏南气流异常在山西地区附近相遇,加强了这个地区的辐合,有利于产生极端降水事件。另外,强的西南季风异常从南海地区一直深入我国东部大陆直达东北地区,我国东部地区处在强季风控之下,华北地区也被一致的偏南气流覆盖,有

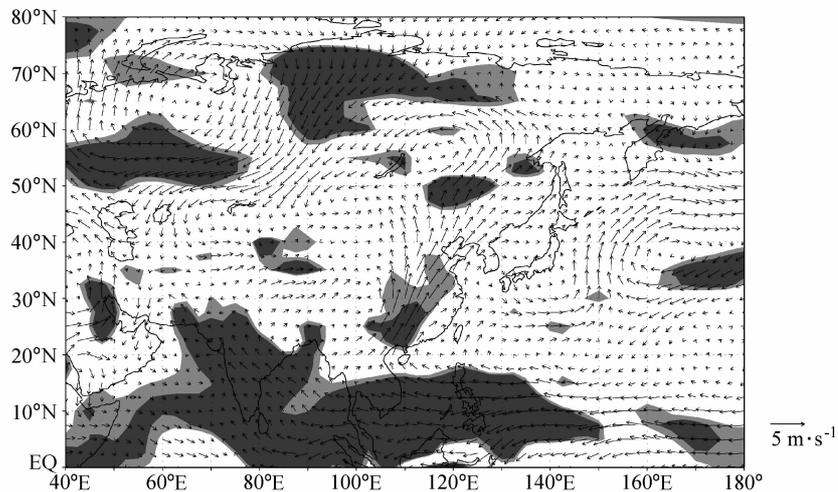


图 10 多暴雨年与少暴雨年 850 hPa 风场差值及 t 检验 (浅色和深色阴影分别通过 0.05 和 0.001 的显著性检验)

Fig. 10 Difference of 850-hPa wind between the rich and poor rainstorm years and t -test (light and dark shaded areas are above 0.05 and 0.001 significance levels, respectively)

利于水汽的输送。西北太平洋有反气旋环流异常，表明副高偏北、偏西且较强。

5 结论

(1) 根据山西各旬的多年平均降水量、各旬降水量与夏季降水量的比值及各旬暴雨出现频次的变化特征，以及夏季风在山西的建立和撤退平均日期分析，提出 7 月上旬至 8 月中旬为山西的主汛期。

(2) 山西大部分地区主汛期降水量均呈下降趋势，极个别地区趋势不明显，其中，中部的东部部分地区为显著下降趋势，通过了 0.05 的显著性检验。

(3) 20 世纪 60 年代以来山西省主汛期小雨日数明显减少，全省呈现一致的下降趋势，与全国小雨日数变化基本一致，表现为 1 mm 以下降水日数大部分地区为下降趋势，小于 10 mm 日数则呈现一致下降趋势。近 20 年山西西部地区小于 10 mm 降水强度明显减弱。

(4) 主汛期大于 10 mm 降水日数大部分地区也为减少趋势。近 20 年中部地区大于 10 mm 降水强度明显加强，而南部和北部地区明显下降。

(5) 20 世纪 90 年代初期，山西主汛期暴雨累积雨量所占降水总量的比重开始呈现上升趋势，进入 21 世纪以后，降水虽然仍在减少，但大雨和

暴雨的次数有所增加，主要表现在中部地区大于 30 mm、大于 50 mm 降水的日数和强度均有增加或增强的趋势，说明山西主汛期极端降水事件有增多的趋势。

(6) 多暴雨年份 500 hPa 位势高度场上，乌拉尔山附近地区易产生稳定的强大高压形势或阻塞形势，在贝加尔湖至巴尔喀什湖一带易有低压槽加强，而西太平洋副高加强且北抬西伸，山西处于低槽的东南侧与副高西北侧的交汇带；850 hPa 风场华北地区被一致的强偏南气流控制，有利于山西产生极端强降水。

致谢 感谢国家气候中心任国玉研究员具有指导意义的讨论。

参考文献 (References)

- 冯明, 王保家, 熊守权. 2000. 1998 年长江大洪水与大气环流和海温异常分析 [J]. 长江流域资源与环境, 9 (1): 112-117.
- Feng Ming, Wang Baojia, Xing Shouquan. 2000. Analysis on the abnormality of general circulation and sea temperature in relation to the flood water of Yangtze River in 1998 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 9 (1): 112-117.
- 郝润全, 高建国, 赵煜. 2005. 降水主要集中时段即主汛期划分方法初探 [J]. 内蒙古气象, (2): 21-24.
- Hao Ruiquan, Gao Jianguo, Zhao Yi. 2005. Primary study on the partition of main rainy season [J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia (in Chi-

- nese), (2): 21-24.
- 李智才, 宋燕, 朱临洪, 等. 2008. 山西省夏季年际气候异常研究 1. 山西省一致多雨或少雨 [J]. 气象, 34 (1): 86-93. Li Zhicai, Song Yan, Zhu Linhong, et al. On Shanxi summer inter-annual climate change I. Concurrent rich/seldom rainfall pattern [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (1): 86-93.
- 李智才, 宋燕, 武永利. 2010. 夏季风对山西省夏季降水的影响研究 [J]. 气候与环境研究, (待发表). Li Zhicai, Song Yan, Wu Yongli. 2010. Study on the effect of East Asian summer monsoon on summer precipitation in Shanxi Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), (in press).
- 刘小宁. 1999. 我国暴雨极端事件的气候变化特征 [J]. 灾害学, 14 (1): 54-59. Liu Xiaoning. 1999. Climatic characteristics of extreme rainstorm events in China [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 14 (1): 54-59.
- 马柱国. 2007. 华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 科学通报, 52 (10): 1199-1206. Ma Zhuguo. 2007. The relationship of drought trend/transition change and interdecadal variation over the Pacific [J]. Science Bulletin (in Chinese), 52 (10): 1199-1206.
- 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 2000. 我国降水变化趋势的空间特征 [J]. 应用气象学报, 11: 322-330. Ren Guoyu, Wu Hong, Chen Zhenghong. 2000. Spatial patterns of change trend in rainfall of China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 11: 322-330.
- 孙凤华, 杨素英, 任国玉. 2007. 东北地区降水日数、强度和持续时间的年代际变化 [J]. 应用气象学报, 18 (5): 610-618. Sun Fenghua, Yang Suying, Ren Guoyu. 2007. Decade variations of precipitation event frequency, intensity and duration in the northeast China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 18 (5): 610-618.
- 山西省气象局. 1989. 山西天气预报手册 [G]. 北京: 气象出版社, 5-7. Shanxi Provincial Meteorological Bureau. 1989. Shanxi Weather Forecast Handbook [G] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 5-7.
- 宋燕, 李智才, 朱临洪, 等. 2008. 山西省夏季年际气候异常研究 2. 北少(多)南多(少)雨型 [J]. 气象, 34 (2): 61-68. Song Yan, Li Zhicai, Zhu Linhong, et al. 2008. On Shanxi summer inter-annual climate anomalies; 2. Seldom/rich rainfall in north/south and rich/seldom rainfall in north/south pattern [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (2): 61-68.
- 王琳莉, 陈星. 2006. 一种新的汛期降水集中期划分方法 [J]. 长江流域资源与环境, 15 (3): 352-355. Wang Linli, Chen Xing. 2006. A new method for the partition of precipitation concentration period in flood season [J]. Resources and Environment in the Yangtza Basin (in Chinese), 15 (3): 352-355.
- 王小玲, 翟盘茂. 2008. 1957~2004 年中国不同强度级别降水的变化趋势特征 [J]. 热带气象学报, 24 (5): 459-466. Wang Xiaoling, Zhai Panmao. 2008. Changes in China's precipitation in various categories during 1957-2004 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (5): 459-466.
- 王燕, 王润元, 王毅荣, 等. 2009. 近 37 年甘肃省降水特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 23 (4): 94-99. Wang Yan, Wang Runyuan, Wang Yirong, et al. 2009. Study on the precipitation characteristics in Gansu Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 23 (4): 94-99.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18: 1096-1108.
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 57 (2): 208-216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (2): 208-216.
- 张春林, 赵景波, 牛俊杰. 2008. 山西黄土高原近 50 年来气候暖干化研究 [J]. 干旱区资源与环境, 22 (4): 70-74. Zhang Chunlin, Zhao Jingbo, Niu Junjie. 2008. Study on warming and drying climate of Shanxi Loess Plateau in recent 50 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 22 (4): 70-74.
- 张秀丽, 郑祚芳, 何金海. 2002. 近百年武汉市主汛期降水特征研究 [J]. 气象科学, (22): 379-386. Zhang Xiuli, Zheng Zuofang, He Jinhai. 2002. The character of summer rainfall variation of Wuhan city during recent 95 years [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), (22): 379-386.
- 张启龙, 翁学传, 程明华. 2001. 我国华北地区汛期降水变化趋势的初步预测 [J]. 高原气象, 20 (2): 121-126. Zhang Qilong, Weng Xuechuan, Cheng Minghua. 2001. Primary forecast for precipitation trend in rainy season in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (2): 121-126.
- 张焱, 韩军青, 郭刚. 2008. 晋西黄土高原地区近 47 年降水量的统计分析 [J]. 干旱区资源与环境, 22 (1): 89-91. Zhang Yan, Han Junqing, Guo Gang. 2008. Statistical analysis on precipitation in Jinxibe region during the last 47 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 22 (1): 89-91.