

DOI:10.14188/j.1671-8836.2017.04.014

黄河流域极端降水时空分布特征及其影响因素

杨沛羽¹, 张 强^{2,3,4†}, 史培军^{2,3,4}, 顾西辉¹, 李 勤¹

(1. 中山大学 水资源与环境系, 广东 广州 510275; 2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4. 北京师范大学 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘 要: 利用黄河流域 77 个气象站点 1957—2014 年日降水数据, 基于超阈值(POT)的极端降水事件抽样、变异分析、趋势分析等方法分析了黄河流域极端降水的量级、频率和发生时间及夏季气温的时空分布特征及其影响因素。结果表明: 黄河流域极端降水量级存在显著变异特征, 但不存在显著趋势变化; 极端降水频率呈逐年上升或显著上升趋势, 表明黄河流域发生极端降水的次数增加, 但降水量减少; 黄河流域南部极端降水发生时间有推迟的趋势。该流域夏季温度存在显著变异特征, 变异时间大部分在 1980 年以后, 大部分站点的夏季温度呈上升或显著上升趋势, 对极端降水的频率有重要的正相关影响; 流域西北部极端降水频率在夏季温度转折点后有明显增高趋势, 流域内大部分站点极端降水发生时间在夏季温度转折前后都呈上升趋势。

关 键 词: 极端降水; 超阈值抽样; 分段回归法; 非平稳性; 夏季温度; 黄河流域

中图分类号: P 339

文献标识码: A

文章编号: 1671-8836(2017)04-0368-09

Spatiotemporal Distribution of Precipitation Extremes and Related Implications Across the Yellow River Basin, China

YANG Peiyu¹, ZHANG Qiang^{2,3,4†}, SHI Peijun^{2,3,4}, GU Xihui¹, LI Qin¹

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the daily precipitation and temperature data at 77 stations from 1957 to 2014 over the Yellow River Basin, spatiotemporal patterns of precipitation extremes were characterized in terms of magnitude, frequency and occurrence timing as well as the influence of summer temperature. Precipitation extremes in this study were defined based on Peak over Threshold (POT) sampling method and changing properties were quantified using change point analysis, trend analysis. The results indicated that the magnitude of extreme precipitation is subject to evident alterations without significant trends. Frequency of precipitation extremes is subject to adverse this, and it exists increasing or significant increasing trends which implies that the frequency of extreme precipitation is rising while the amount of precipitation is decreasing. The occurrence timing of extreme precipitation in the southern part of the Yellow River Basin follows significant increasing or increasing trends, implying that occurrence of precipitation extremes comes to be later or delayed. The summer temperature exists evident alterations and most happened after 1980, and most part of the basin follows increasing or significant increasing trends, which has a significant positive correlation with the frequency of the extreme precipitation. The extreme precipitation frequency in the northwestern part of the basin has a tendency to increase after the turning point of summer temperature, and the occurrence timing of extreme precipitation in most sites of the basin is delaying before and after the summer temperature change.

收稿日期: 2017-02-20 † 通信联系人 E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51425903)

作者简介: 杨沛羽, 男, 硕士生, 现从事气象水文学研究. E-mail: yangpy3@mail2.sysu.edu.cn

Key words: precipitation extremes; POT-based resampling; piece-wise regression method; non-stationarity; summer temperature; the Yellow River Basin

0 引言

全球变暖及由其导致的极端气象水文事件频发,给社会、经济与生态环境系统造成巨大影响。其中,极端降水易引发城市内涝、山洪和滑坡泥石流等自然灾害,给生命财产造成严重威胁。由于极端降水事件的严重性及其形成的灾害链,有关其变化特征、成因及影响的研究受到广泛关注。

近几年,有关黄河流域极端降水的研究较多。Zhang等^[1]通过对黄河流域17个降水指数的分析,发现该流域降水量在时间上呈下降趋势,秋冬季更可能发生干旱等结论;贺振等^[2]通过趋势分析法、小波分析法和Mann-Kendall法(M-K法)突变分析法,得出黄河流域极端降水指数均存在28 a和17 a两个主振荡周期,且极端降水频率指数在流域西部和北部地区有增加态势;赵翠平等^[3]采用M-K趋势检测法和线性回归分析法研究了黄河流域极端降水指数在年和季节尺度上的时空变化特征,指出极端降水指数总体呈非显著下降趋势,且黄河流域降水量呈逐年减小趋势,极端降水指数的变化存在时空差异。闵岫等^[4]通过对不同地区极端降水阈值的分类研究,认为黄河中下游地区秋季极端降水的区域性和持续性较好,连续出现极端降水的频率相对较大,秋季发生洪涝灾害的可能性较大。

已有研究^[2, 3, 5]多关注降水频率、降水指数及降水量,不利于人们全面了解黄河流域极端降水多方面特征。基于此,本文采用超阈值(POT)抽样(阈值为95%),以降水量、降水频率以及发生时间等多方面全面分析极端降水过程,探求黄河流域极端降水的量级、次数、发生时间的变异和趋势的时空分布特征,以及夏季气温对黄河流域极端降水的影响。

1 研究区域及数据来源

黄河发源于青海省巴颜喀拉山,流经青海、四川等9省,在山东垦利注入渤海^[6]。黄河流域东西跨越23个经度(96°E~119°E),南北跨越10个纬度(32°N~42°N)^[2],流域面积75.2万km²,干流河道长5464 km;流域气候大致分为干旱、半干旱和半湿润3个气候区,年均气温-4~14℃,整体上西部干旱,全流域多年平均降水量466 mm,其中6~10月降水量占全年的65%~85%,大暴雨多发生在

7~8月,降水总体由东南向西北递减,降水最多的是流域东南部湿润、半湿润地区。由于该流域处于中纬度地带,受大气环流和季风环流影响情况比较复杂,因此,流域内不同地区气候的差异显著,气候要素的年、季变化大^[7]。

本文所分析数据为黄河流域77个雨量站点(分布见图1)1957—2014年共58 a的逐日降水和气温序列,数据从国家气候中心(<http://data.cma.cn>)下载,用双累计曲线法检验数据的一致性。缺测数据采用Zhang等提出的差值方法^[8]进行处理。从图1中可以看出,站点的分布较为均匀,覆盖了整个黄河流域。

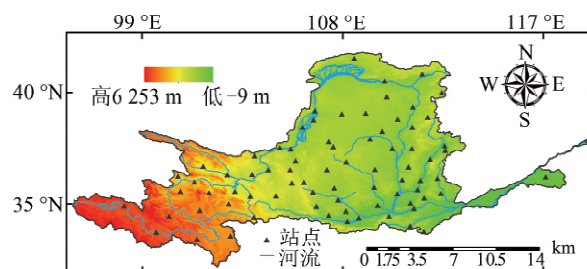


图1 黄河流域77个站点的分布图

Fig. 1 The 77 locations of precipitation stations in the Yellow River Basin

2 研究方法

POT抽样^[9, 10]是研究极端降水的常用方法,设定某个阈值,抽样检测每次极端降水发生的时间和量级,以及每年发生极端降水的次数,将各站点降水序列中超过该阈值的降水过程重组成为一个新的极端降水序列^[9]。本文77个站点极端降水以95%分位数作为阈值的空间分布如图2所示。

变异点(change points, CP)是水文序列急剧变化的标志^[11],本文采用“突变点”法和分段回归法进行突变分析:1)采用“突变点”检测方法^[9, 12],检测

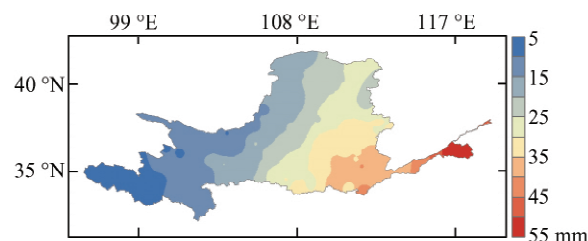


图2 黄河流域极端降水以95%分位数作为阈值的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of precipitation extremes defined by 95% percentile in the Yellow River Basin

连续型时间序列(黄河流域极端降水量级和发生时间)的单变异点;2)采用分段回归法^[9],检测离散型时间序列(黄河流域极端降水发生次数)变异点,达到 0.1 显著水平视为显著变异。

趋势分析采用 M-K 法和 Poisson 回归判别法:

1)采用 M-K 法^[13]检测连续型时间序列(极端降水量级和发生时间)的趋势;2)采用 Poisson 回归判别法^[9, 14]检测离散型时间序列(极端降水年发生次数)时间趋势。本文在 95%置信水平下进行趋势的显著性检验,当统计值 Z 的绝对值大于 1.96 时即达到显著趋势。在趋势分析中,以变异点为分割点,把时间序列分为变异前、变异后两个子序列。分割的原则是:1)变异点前时间序列和变异点后时间序列的长度都不少于 10 a;2)如果同时存在均值变异点和方差变异点,则最终变异点为均值变异点。

3 结果与讨论

3.1 极端降水量级非平稳特征

图 3 为黄河流域极端降水量级发生变异的时间点。可知,极端降水量级存在显著的变异特征,共有

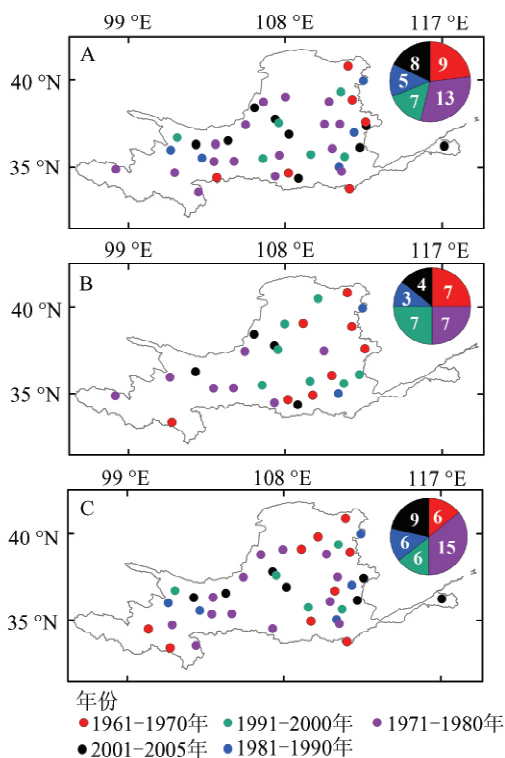


图 3 黄河流域极端降水量级变异时空分布

A: 均值变异; B: 方差变异; C: 最终变异

Fig. 1 Spatiotemporal distribution of CP in the magnitude of extreme precipitation across the Yellow River Basin. Significance level is defined as 0.1

A: CP in mean; B: CP in variance; C: final CP

42 个站点的均值发生显著变异(图 3A, 约占总数的 54.5%);有 28 个站点的方差发生显著变异(图 3B, 约占总数的 36.4%);最终确定变异站点 42 个(图 3C, 约占总数的 54.5%)。从发生变异的空間上看,均值变异和方差变异的分布有 18 个重叠,具有较高的一致性,表明这些站点极端降水的均值和方差都发生了变化。发生变异的时间上看,均值变异和最终变异都在 1971~1981 年的突变点最多,分别有 13、15 个,表明极端降水在这 10 a 的变化比较频繁。

图 4 为极端降水量级趋势的空间分布。所有站点趋势(图 4A)极端降水量级呈下降趋势的站点共 46 个,呈显著下降趋势的站点共 7 个,表明流域内降水强度减小的站点较多;从空间分布上看,流域西部和北部极端降水量级呈下降或显著下降趋势的较

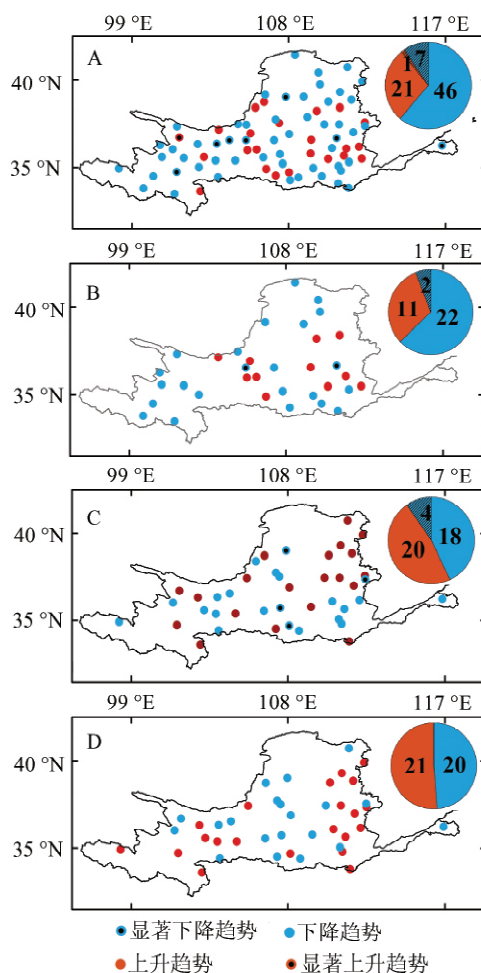


图 4 黄河流域极端降水量级趋势空间分布

A: 所有站点序列; B: 无变异站点序列; C: 变异点前序列; D: 变异点后序列

Fig. 4 Spatial distribution of trends in the magnitude of extreme precipitation with consideration of change points across the Yellow River Basin

A: all stations; B: no CP; C: before CP; D: after CP

多.无变异点的35个站点(图4B)也以下降趋势为主,有2个站点呈下降趋势,20个站点呈下降趋势;从空间分布上看,流域西部和北部大多数站点呈下降趋势,和所有站点时间趋势大体一致.在变异点前(图4C),有4个站点呈显著下降趋势,分布在流域东部,且流域东北部呈上升趋势;变异点后(图4D),共20个站点呈下降趋势,主要分布在流域中部,共21个站点呈上升趋势,主要分布在东部和西部.

3.2 极端降水频率非平稳特征

图5所示的是黄河流域极端降水频率的变异特征.77个站点之中,只有4个站点极端降水频率显著性水平达到0.1,这4个站点的发生频率变异时间分别为1963年、1974年、1982年和1996年.其他站点发生次数变异的特征并不显著,但发生转折的时间多数在1990年以后.

图6所示为黄河流域极端降水频率的趋势特征,所有站点趋势从时间上看(图6A),有19个站点呈上升趋势(约占总数的24.7%),30个站点呈显著上升趋势(约占总数的38.9%),15个站点呈下降趋势(约占总数的19.5%),13个站点呈显著下降趋势

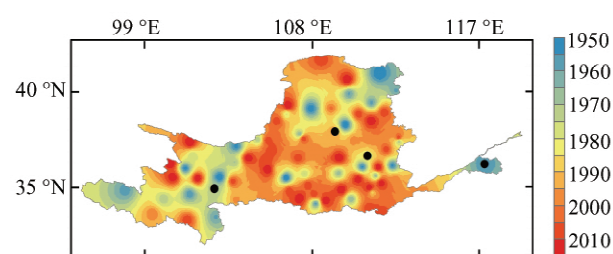


图5 黄河流域极端降水发生次数变异时空分布

Fig. 5 Spatiotemporal distribution of CP in the occurrence rate of extreme precipitation across the Yellow River Basin.

Significance level is defined as 0.1

(约占总数的16.9%);从空间分布上看,西部和北部大多数站点呈显著上升趋势,表明这些地区一年中发生极端降水的次数在上升.由于发生变异的站点少,无变异点在时间上的趋势(图6B)和整体序列基本保持一致.在发生变异的4个站点中,全部是变异前为显著下降趋势(图6C),变异后转为显著上升趋势(图6D),表明发生变异时,这些站点一年中发生极端降水的次数最少,接着明显增多.从总体上看,黄河流域极端降水发生的频率有增加的趋势.

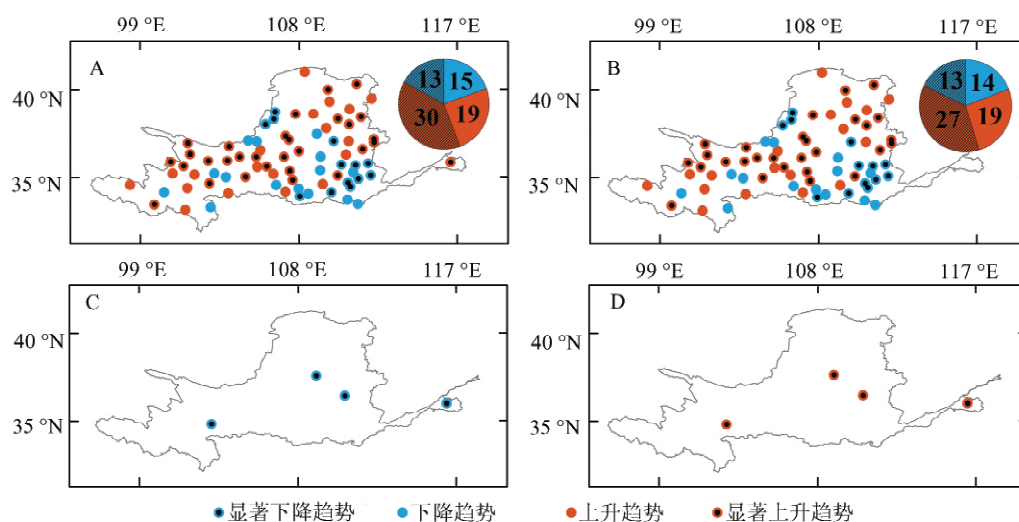


图6 黄河流域极端降水发生次数趋势空间分布

A: 所有站点序列; B: 无变异站点序列; C: 变异点前序列; D: 变异点后序列

Fig. 6 Spatial distribution of trends in the occurrence rate of extreme precipitation across the Yellow River Basin

A: all stations; B: no CP; C: before CP; D: after CP

3.3 黄河流域极端降水发生时间非平稳特征

黄河流域降水发生时间的变异点和降水量级变异点一样,没有明显的空间分布规律.从均值变异时间点来看,共有32个变异时间点,在各个时间段都有比较均匀的分布.从时间上看有16个站点(占总数的50%)的变异时间发生在1980年以前(图7A),有16个站点(占总数的50%)的变异时间发生在1980年以后.从空间上看,流域西部发生变

异的站点不多,且多数在1980年以前.由于黄河流域极端降水发生时间不存在方差变异,所以最终变异时间点(图7B)和均值变异时间点基本吻合一致.

再采用Poisson回归判别法^[9,14]检测极端降水发生时间的趋势(图8).从时间上看(图8A),有7个站点呈显著上升趋势,有44个站点呈上升趋势(约占总数的57.1%),有24个站点呈下降趋势(约占总数的31.2%),2个站点呈显著下降趋势(约占

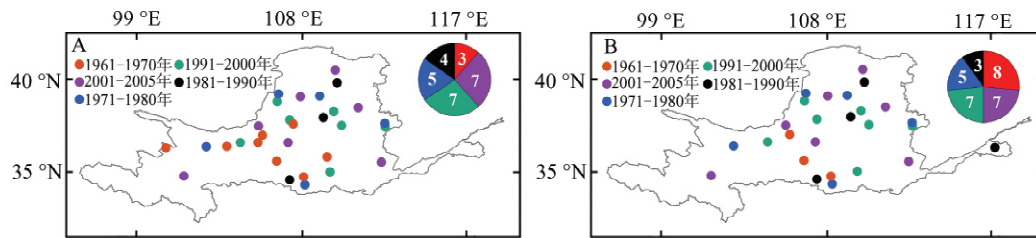


图 7 黄河流域极端降水发生时间变异时空分布

A: 均值变异; B: 最终变异点

Fig. 7 Spatiotemporal distribution of CP in the occurrence time of extreme precipitation events across the Yellow River Basin. Significance level is defined as 0.1

A: CP in mean; B: final CP

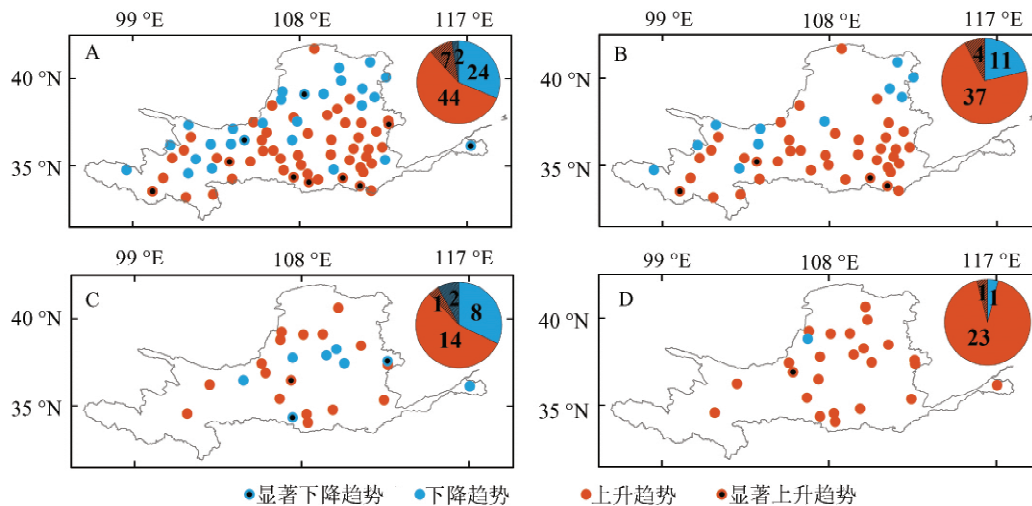


图 8 黄河流域极端降水发生时间趋势空间分布

A: 所有站点序列; B: 无变异站点序列; C: 变异点前序列; D: 变异点后序列

Fig. 8 Spatial distribution of trends in the occurrence time of extreme precipitation across the Yellow River Basin

A: all stations; B: no CP; C: before CP; D: after CP

总数的 2.6%);从空间上看(图 8A),流域南部大部分站点呈上升趋势,有 7 个站点呈上升显著趋势,表明这些站点一年中发生极端降水的时间有推迟趋势.流域北部呈下降趋势的站点比较多,表明这些站点一年中发生极端降水的时间有提前的趋势.无变异点(图 8B)的时间趋势和整体序列基本保持一致.在变异点前时间序列(图 8C)和变异点后(图 8D)时间序列中,都以上升趋势为主.所以从总体上看,流域发生极端降水时间有推迟的趋势.

3.4 夏季气温影响

通过月频率法^[15]计算可知,黄河流域主要的极端降水事件发生在夏季,因此研究夏季温度对极端降水的影响有着重大意义.图 9 为黄河流域夏季日最低温度均值(T_{\min})、日平均温度均值(T_{ave})及日最高温度均值(T_{\max})显著转折点空间分布.可以看出,夏季日最低温度均值(图 9A)、日平均温度均值(图 9B)都存在显著变异特征,且绝大多数站点的变异

时间都发生在 1980 年以后.夏季日最高温度均值(图 9C)达到显著变异特征的站点不多,和最低温度均值、日平均温度均值之间的空间分布差异较大.

图 10 为黄河流域夏季日最低温度均值、日平均温度均值及日最高温度均值时间趋势空间分布图.可以看出,黄河流域夏季日最低温度均值所有站点趋势(图 10A)大部分呈上升或显著上升趋势,变异点前序列(图 10B)有许多站点呈下降或显著下降趋势,变异点后序列(图 10C)则是上升或显著上升趋势.黄河流域夏季温度日平均温度均值(图 10D, E, F)及日最高温度均值趋势(图 10G, H, I)和日最低温度均值的趋势一致.这一规律和极端降水频率的特征保持一致,当日最低温度均值、日平均温度均值及日最高温度呈下降或显著趋势时,黄河流域极端降水的频率也在减小;当日最低温度均值、日平均温度均值及日最高温度呈上升或显著上升趋势时,极端降水的频率也在增加,且趋势空间分布和极端降

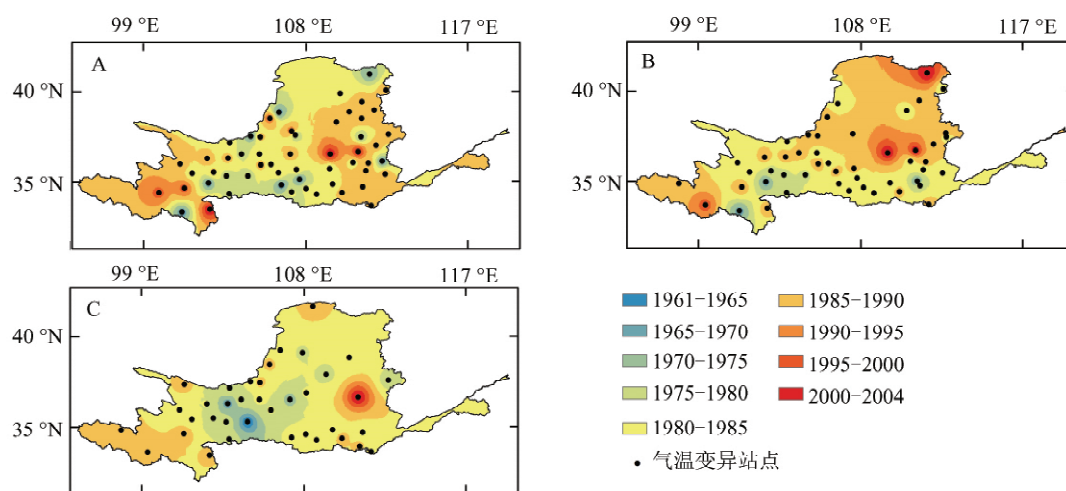


图9 黄河流域夏季温度显著转折点空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of turn points across the Yellow River Basin. Significance level is defined as 0.1

A: T_{\min} ; B: T_{ave} ; C: T_{\max}

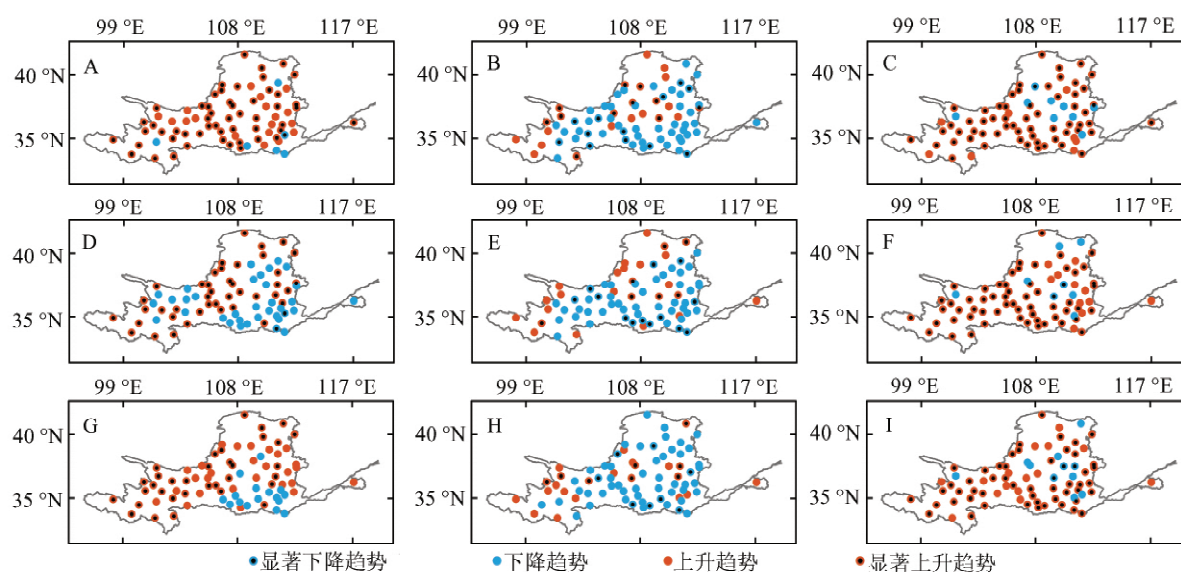


图10 黄河流域夏季日最低温度均值、日平均温度均值及日最高温度均值趋势空间分布

T_{\min} 所有站点序列(A)、变异点前序列(B)、变异点后序列(C); T_{ave} 所有站点序列(D)、变异点前序列(E)、变异点后序列(F)、所有站点序列(G); T_{\max} 变异点前序列(H)、变异点后序列(I)

Fig. 10 Spatial distribution of trends in average values of daily minimum, average and maximum temperatures across the Yellow River Basin

All stations to T_{\min} (A); before CP to T_{\min} (B); after CP to T_{\min} (C); All stations to T_{ave} (D); before CP to T_{ave} (E); after CP to daily T_{ave} (F); All stations to T_{\max} (G); before CP to T_{\max} (H); after CP to T_{\max} (I)

水频率相近. 所以, 夏季温度对极端降水发生的频率有重要的正相关影响.

再进一步分析黄河流域极端降水量级、频率和发生时间序列和夏季日最低温度、日平均温度和日最高温度的转折点前后趋势变化的关系.

可以看出, 黄河流域东南部极端降水量级在夏季最低温度(图 11A)、日平均温度(图 11C)和日最高温度(图 11E)的转折前呈下降趋势, 转折后(图 11B, D, F)转为上升趋势. 流域西北部极端降水频

率在夏季日最低温度(图 11G)、日平均温度(图 11I)和日最高温度(图 11K)转折前呈下降趋势较多, 转折后(图 11H, J, L)呈上升或显著上升的趋势, 即夏季温度的转折使极端降水的发生次数有增多的趋势. 流域内大多数站点极端降水发生时间在夏季日最低温度(图 11M, N)、日平均温度(图 11O, P)和日最高温度(图 11Q, R)转折前后都呈显著上升趋势, 即夏季温度的转折使极端降水的发生时间有推后的趋势.

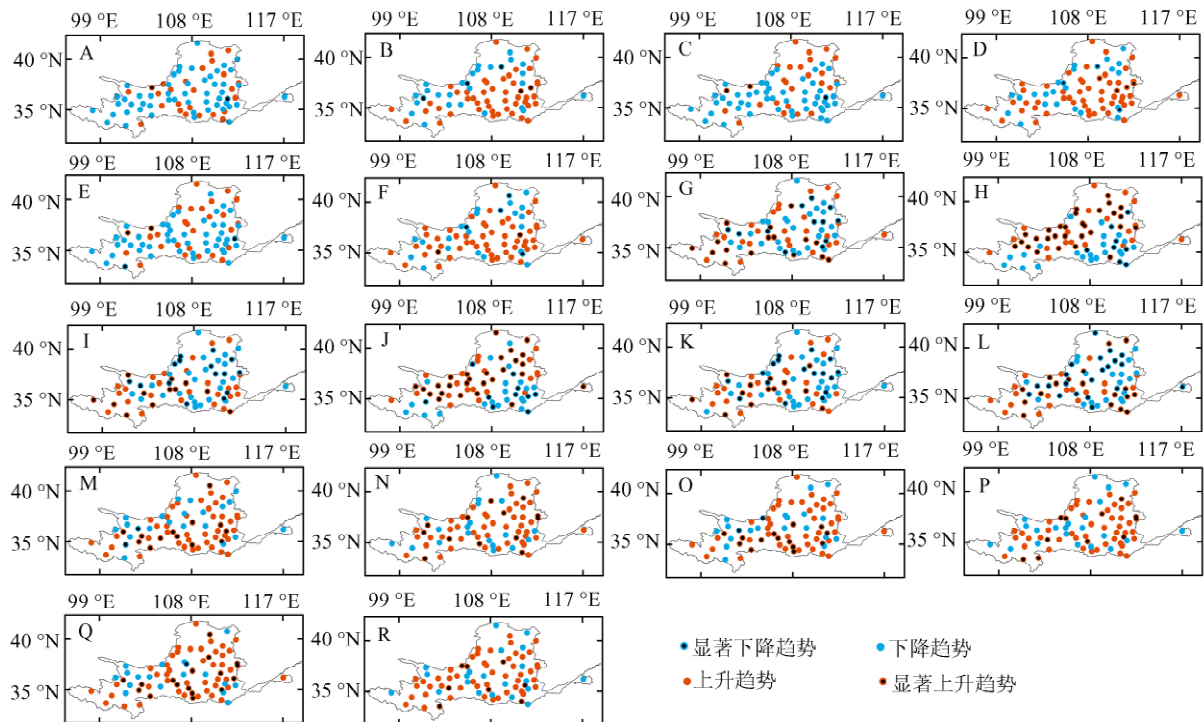


图 11 黄河流域极端降水量级趋势、发生次数趋势和发生时间趋势在夏季温度影响下的空间变化特征

T_{\min} 转折前(A)、后(B), T_{ave} 转折前(C)、后(D), T_{\max} 转折前(E)、后(F)的量级趋势; T_{\min} 转折前(G)、后(H), T_{ave} 转折前(I)、后(J), T_{\max} 转折前(K)、后(L)发生次数趋势; T_{\min} 转折前(M)、后(N), T_{ave} 均值转折前(O)、后(P), T_{\max} 转折前(Q)、后(R)发生时间趋势

Fig. 11 Spatial distribution of changes in the magnitude, occurrence rates, occurrence time of extreme precipitation across the Yellow River Basin under the influence of summer temperature

Magnitude (A) before CP to T_{\min} , (B) after CP to T_{\min} ; Magnitude (C) before CP to T_{ave} , (D) after CP to T_{ave} ; Magnitude (E) before CP to T_{\max} , (F) after CP to T_{\max} ; Occurrence rates (G) before CP to T_{\min} , (H) after CP to T_{\min} ; Occurrence rates (I) before CP to T_{ave} , (J) after CP to T_{ave} ; Occurrence rates (K) before CP to T_{\max} , (L) after CP to T_{\max} ; Occurrence time (M) before CP to T_{\min} , (N) after CP to T_{\min} ; Occurrence time (O) before CP to T_{ave} , (P) after CP to T_{ave} ; Occurrence time (Q) before CP to T_{\max} , (R) after CP to T_{\max}

3.5 其他影响因素

黄河流域极端降水频率增加,量级却有所下降,这很可能和人类活动有关.黄河流域山西省、陕西省采矿业发达,重工业也比较发达,产生大量的人为气溶胶,而人为气溶胶浓度的增加会削弱太阳辐射,使地表潜在蒸散发量下降,引起局地降水量减小^[16].同时人为气溶胶给降水提供了更多的凝结核^[17],从而导致这两个地区的极端降水频率上升.影响黄河流域极端降水的因素还有很多.例如受下垫面的影响,黄河流域存在面积广阔的黄土高原,植被稀少,蒸发量大,水土流失严重,从而引起极端降水量级减小^[18].但自 20 世纪 90 年代以来,黄土高原植被恢复速度加快^[19],下垫面是否对黄河流域极端降水有影响还要进一步研究.气候系统也会影响黄河流域极端降水,20 世纪 20 年代到 21 世纪初发生了 13 次厄尔尼诺现象,使黄河流域的气温有 3~5 a 周期振荡的特征,打乱了黄河流域平常的气候特征,使极端降水的量级和发生次数发生骤变^[20].

4 结 论

基于 POT 抽样,采用趋势分析和变异分析的方法,探讨了黄河流域 77 个站点 1957—2014 年极端降水量级、频率和发生时间的非平稳性特征及夏季温度的影响,得出以下结论:

1) 黄河流域的降水量级存在明显的方差变异和均值变异,且两者具有较高的一致性,变异点大多发生在 1980 年以后,黄河流域极端降水量呈下降趋势的站点较多,通过显著检验的站点并不多.

2) 黄河流域极端降水频率只有 4 个站点存在变异.无变异站点大部分呈上升或显著上升趋势,仅东南部有少量站点呈下降或显著下降趋势.发生变异的 4 个点中,全部是变异前为显著下降趋势,变异后转为显著上升趋势.

3) 黄河流域极端降水发生时间存在明显的均

值,但是不存在方差变异,所以最终变异时间点和均值变异时间点吻合,最终确定变异时间点为32个。大部分站点呈上升或显著上升趋势,南部通过显著检验的比较多,变异点前序列时间趋势大部分为上升趋势,变异点后序列时间趋势绝大部分为上升或显著上升趋势,表明这些站点一年中发生极端降水的时间有推迟的趋势。

4) 黄河流域极端降水非平稳性受夏季气温的影响较大。黄河流域大多数站点的温度变异时间发生在1980年以后;夏季温度和极端降水的频率有显著的正相关;黄河流域东南部极端降水量级在夏季温度转折前呈下降趋势,转折后转为上升趋势;西北部极端降水频率在夏季温度转折前呈下降趋势较多,转折后呈上升或显著上升的趋势;流域大部分站点极端降水发生时间在夏季温度转折前后都呈显著上升趋势。

参考文献:

- [1] ZHANG Q, PENG J, SINGH V P, *et al.* Spatio-temporal variations of precipitation in arid and semiarid regions of China: The Yellow River basin as a case study [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, **114**: 38-49. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.01.005.
- [2] 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, **36**(3): 490-501.
HE Z, HE J P. Temporal and spatial variation of extreme precipitation in the Yellow River Basin from 1960 to 2012 [J]. *Resources Science*, 2014, **36**(3): 490-501 (Ch).
- [3] 赵翠平,陈岩,王卫光,等. 黄河流域近50 a极端降水指数的时空变化[J]. *人民黄河*, 2015, **37**(1): 18-22. DOI:10.969/j.issn.1000-1379.2015.01.005.
ZHAO C P, CHEN Y, WANG W G, *et al.* Temporal and spatial variation of extreme precipitation indexes of the Yellow River Basin in recent 50 years [J]. *Yellow River*, 2015, **37**(1): 18-22. DOI:10.969/j.issn.1000-1379.2015.01.005(Ch).
- [4] 闵岫,钱永甫. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J]. *水科学进展*, 2008, **19**(6): 763-771. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2008.06.003.
MIN S, QIAN Y F. Regionality and persistence of extreme precipitation events in China [J]. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(6): 763-771. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2008.06.003(Ch).
- [5] 陈效速,刘立,尉杨平. 1961—2005年黄河流域极端气候事件变化趋势[J]. *人民黄河*, 2011, **33**(5): 3-5. DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2011.05.002.
- CHEN X Q, LIU L, WEI Y P. Variation trend of extreme climate events of the Yellow River Basin in 1961-2005 period [J]. *Yellow River*, 2011, **33**(5): 3-5. DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2011.05.002(Ch).
- [6] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等. 2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, **33**(24): 7798-7806. DOI:10.5846/stxb201305281212.
YUAN L H, JIANG W G, SHEN W M, *et al.* The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(24): 7798-7806. DOI: 10.5846/stxb201305281212(Ch).
- [7] 刘晓东,安芷生,方建刚,等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化[J]. *地理科学*, 2002, **22**(5): 513-519. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2002.05.001.
LIU X D, AN Z S, FANG J G, *et al.* Possible variations of precipitation over the Yellow River Valley under the global-warming conditions [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, **22**(5): 513-519. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2002.05.001(Ch).
- [8] ZHANG Q, QI T, SINGH V P, *et al.* Regional frequency analysis of droughts in China: A multivariate perspective [J]. *Water Resources Management*, 2015, **29**(6): 1767-1787. DOI: 10.1007/s11269-014-0910-x.
- [9] 顾西辉,张强,孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. *地理学报*, 2016, **71**(5): 718-730. DOI: 10.11821/dlxb201605002.
GU X H, ZHANG Q, KONG D D. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(5): 718-730. DOI: 10.11821/dlxb201605002(Ch).
- [10] 郑江禹,张强,史培军,等. 珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J]. *地理科学*, 2017, **37**(2): 283-291. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.02.015.
ZHENG J Y, ZHANG Q, SHI P J, *et al.* Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation regimes and related driving factors in the Pearl River Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, **37**(2): 283-291. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.02.015(Ch).
- [11] 谢平,陈广才,李德,等. 水文变异综合诊断方法及其应用研究[J]. *水电能源科学*, 2005, **23**(2): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2005.02.004
XIE P, CHEN G C, LI D, *et al.* Comprehensive diagnosis method of hydrologic time series change-point analysis [J]. *Water Resources and Power*, 2005, **23**(2): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2005.02.004(Ch).
- [12] KILLICK R, ECKLEY I A. Changepoint: An R pack-

- age for changepoint analysis[J]. *Journal of Statistical Software*, 2014, **58**(1): 1-19. DOI: 10.18637/jss.v058.i03
- [13] HUANG Q, ZHANG Q, SINGH V P, *et al.* Variations of dryness/wetness across China: Changing properties, drought risks, and causes[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, **155**: 1-12. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2017.05.010.
- [14] VILLARINI G, SMITH J A, VECCHI G A. Changing frequency of heavy rainfall over the Central United States[J]. *Journal of Climate*, 2013, **26**(1): 351-357. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00043.1.
- [15] 邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 等. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2009, **45**(1): 98-109. DOI: 10.3321/j.issn:0469-5097.2009.01.014.
- ZOU Y C, YANG X Q, SUN X G, *et al.* Seasonal difference of the spatio-temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2009, **45**(1): 98-109. DOI: 10.3321/j.issn:0469-5097.2009.01.014(Ch).
- [16] 任国玉, 柳艳菊, 孙秀宝, 等. 中国大陆降水时空变异规律: Ⅲ. 趋势变化原因[J]. *水科学进展*, 2016(3): 1-23.
- REN G Y, LIU Y J, SUN X B, *et al.* Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: Ⅲ. Causes for recent trends[J]. *Advances in Water Science*, 2016(3): 1-23(Ch).
- [17] 李军霞, 银燕, 李培仁, 等. 气溶胶影响云和降水的机理和观测研究进展[J]. *气象科学*, 2014, **34**(5): 581-590. DOI:10.3969/2013jms.0067.
- LI J X, YIN Y, LI P R, *et al.* Advances in research on mechanism and observation of impacts of aerosol on cloud and precipitation[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, **34**(5): 581-590. DOI: 10.3969/2013jms.0067(Ch).
- [18] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(2): 291-299.
- LI Z, ZHENG F L, LIU W Z. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(2): 291-299(Ch).
- [19] 李双双, 延军平, 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, **67**(7): 960-970. DOI:10.11821/xb201207009.
- LI S S, YAN J P, WAN J. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia Region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 960-970. DOI: 10.11821/xb201207009(Ch).
- [20] 骆高远. 我国对厄尔尼诺、拉尼娜研究综述[J]. *地理科学*, 2000, **20**(3): 264-269. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2000.03.012.
- LUO G Y. A general survey of the studies on El Nino and Nina in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, **20**(3): 264-269. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2000.03.012(Ch).

□