

1960—2016年黄土高原干旱和热浪时空变化特征

孙艺杰,刘宪锋*,任志远,段艺芳

(陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安710119)

摘要:基于1960—2016年黄土高原49个气象台站日最高气温和月降水数据,论文利用百分位高温阈值和标准化降水指标对黄土高原干旱和热浪时空变化特征进行了分析,识别并探讨了干旱和热浪同时发生事件的演变规律。结果表明:①黄土高原热浪频次整体呈增加趋势,日高温热浪增加趋势最大,增速达到0.29次/a,1995年之后增加趋势更为明显,显著增加区域集中在山西东北部、青海省东部和甘肃中南部;②1960—2016年黄土高原旱涝指数呈下降趋势,即表现为由涝转旱,20世纪90年代初为旱涝变化的转折点,年旱涝指数下降趋势显著区占整个研究区的62%,其中黄土高原沟壑区南部、陕北南部、山西南部、甘肃东部干旱趋势较为明显;③干旱和热浪同时发生事件总体呈现增加趋势,增速为0.66次/10 a,其中1960—1979年呈下降趋势,降速为-0.26次/a,1980—2002年呈增加趋势,2003年之后变化趋势较为平稳;空间上,山西东部、陕北南部和甘肃东南部发生频次较高,并且显著增加区主要位于山西东北部、甘肃中东部和宁夏北部。

关键词:高温热浪;旱涝演变;并发事件;时空变化;黄土高原

极端气候事件是指特定时间段内某类气候要素量值或统计值偏离其平均态,达到或超过统计量区间上下限附近特定阈值的事件^[1]。与气候平均态相比,极端气候事件对气候变化更为敏感,具有突发性强、不易防范和不可预见性,对自然环境和人类社会产生了巨大而深远的影响^[2-3]。IPCC第五次评估报告指出,1880—2012年全球地表平均气温升高了0.85℃^[4],中国在1951—2017年地表平均气温每10 a升高了0.24℃,升温率高于同期全球平均水平,气候变暖导致极端气候事件(干旱、热浪、洪涝等)发生频率和强度的增加趋势更为明显^[5-7]。据统计,极端气候事件所造成的经济损失在1970—2010年增加了近10倍^[8],其中2010年90%以上的自然灾害由极端气候事件所引起^[9]。因而极端气候事件的检测研究成为当前气候变化领域最受关注的议题之一,得到了国内外机构和学者的广泛关注^[10-14]。

虽然极端气候事件研究已成为国内外气候变化和气象灾害领域关注的热点问题之一,但是多数

研究仅针对单个极端气候事件的演变规律、时空分布及其成因进行了探讨^[15-18]。值得注意的是,多个极端气候事件往往会同时发生,例如高温热浪往往与干旱相伴而生,即表现为正相关关系^[19],当两者同时发生时形成相互加强的正反馈效应,其负面影响往往超过任何单一极端气候事件或2个单独事件的总和。目前,极端气候事件并发研究已得到了学界和公众的高度关注,其中Mazdiyasn等^[20]利用联合概率分布函数研究发现美国地区干旱和热浪同时发生概率呈显著增加趋势;Hao等^[21]采用CRU和UD地表观测气象数值以及CMIP5模拟数值对比分析全球同时发生极端降水和极端高温事件的变化趋势;张强等^[22]则探讨了中国夏季降水不足与极端高温之间的相关关系,定量分析了土壤含水量对降水亏缺与极端高温两者关系的影响;Aghakouchak等^[23]研究发现2014年加利福尼亚州极端干旱事件的发生与区域降水减少和极端高温有关;Sun等^[24]发现了21世纪末中国大部分地区同时

收稿日期:2019-03-25;修订日期:2019-05-25。

基金项目:国家自然科学基金项目(41801333)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41801333.]

第一作者简介:孙艺杰(1991—),女,辽宁省兴城人,博士生,主要研究方向为资源环境与GIS。E-mail: sunjy1018@126.com

*通信作者简介:刘宪锋(1986—),男,博士,讲师,主要从事资源环境遥感、灾害遥感研究。E-mail: liuxianfeng7987@163.com

引用格式:孙艺杰,刘宪锋,任志远,等. 1960—2016年黄土高原干旱和热浪时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 591-601. [Sun Yijie, Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, et al. Spatiotemporal changes of droughts and heatwaves on the Loess Plateau during 1960- 2016. Progress in Geography, 2020, 39(4): 591-601.] DOI: 10.18306/dlxxjz.2020.04.006

发生干旱和热浪事件的可能性逐渐增加。上述研究成果反映了多类型极端气候并发事件逐渐成为当前灾害研究的前沿问题,明确全球尺度和典型区域多类型极端气候并发事件的时空变化特征,对未来综合气象灾害趋势诊断和防范具有重要意义。

黄土高原地处中国中部偏北,地貌类型复杂,水土流失严重,是典型的气候敏感区和生态环境脆弱区,随着全球气候变暖和社会经济的快速发展,黄土高原面临自然灾害的风险逐渐增加。虽然目前已有部分学者针对黄土高原极端气温和降水变化、干旱灾害的时空分布特征以及旱涝组合事件的演变规律进行了大量研究^[25-27],但对黄土高原同时发生干旱热浪事件的研究鲜有报道。基于上述认识,本文利用1960—2016年黄土高原49个气象台站数据,借助高温阈值和标准化降水指标对黄土高原干旱和热浪时空特征进行分析,进而采用叠加统计分析方法识别同时发生干旱热浪事件的变化趋势,旨在为黄土高原减缓气候变化所带来的影响、促进生态环境和社会经济可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河上游地区,范围介于 $100.8^{\circ}\sim 114.6^{\circ}\text{E}$, $33.7^{\circ}\sim 41.3^{\circ}\text{N}$ 之间,西起日月山,东至太行山,南界秦岭,北抵阴山,包括青海、甘肃、内蒙古、陕西、山西、宁夏和河南等7省区(图1)。全区总面积约64.06万 km^2 ,土壤侵蚀严重,植被覆盖度低,生态环境脆弱,是中国水土流失最严重的区域之

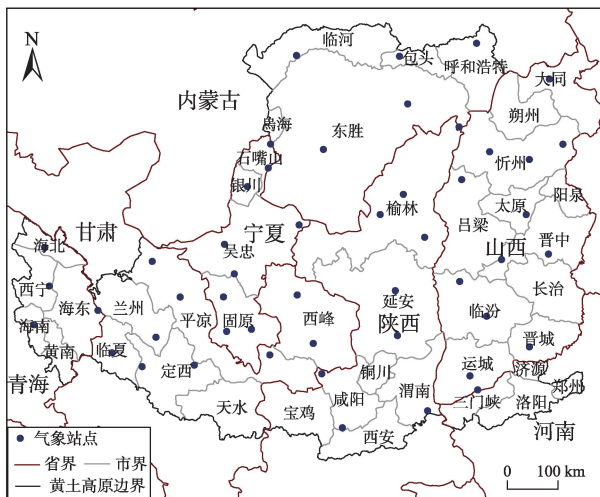


图1 研究区概况及气象站点分布

Fig.1 The study area and distribution of meteorological stations

一。该区属于温带大陆性气候,年均气温 $4\sim 12^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 $96\sim 1466\text{mm}$,且年内分布极不均匀,通常集中在夏季。气候变化下的极端气温和极端降水等气象灾害成为黄土高原生态恢复和农业发展的主要制约因素。

1.2 数据来源

气象数据资料均来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。为保证数据的完整性和连续性,本文选取黄土高原范围内49个气象台站(图1)逐日最高气温和逐月降水数据,研究时段为1960—2016年,所选站点均经过严格的质量检查和控制,包括极值检验和时间一致性检验等,去除非气候因素的影响,同时筛选数据中的异常值和错误值,进行均一性检验,个别站点缺失数据采用邻近站点插值方法进行插补,以保证结果的可信度和准确性。

1.3 研究方法

1.3.1 热浪指数

高温热浪是指持续时间内极端高温天气过程,目前并没有统一的判定标准^[28-29]。IPCC将持续多日日最高气温高于90%分位数的天气过程定义为热浪事件^[7],中国气象局将日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 作为判定高温阈值的标准^[30],且不同区域划定界限阈值也不尽相同。本文热浪计算过程如下:首先将1970—2000年暖季(5—10月)日最高气温90%分位数作为各站点的高温阈值,当某一站点日最高气温超过高温阈值时记为一次高温热浪,然后统计各站点每月连续发生1、3、5和7d的热浪频次。

1.3.2 旱涝指数

本文选用国际通用的标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)对黄土高原干旱事件进行检测。该指数采用 Γ 分布,基于模型运算将降水量累计频率分布进行正态标准化处理^[31],计算得到SPI指数,具体计算过程参考文献^[32-33]。不同时间尺度SPI反映水分盈亏程度不同^[34],其中1个月SPI(SPI₁)反映短期降水情况,3个月(SPI₃)反映季节性降水状况,6个月(SPI₆)反映中长期降水趋势,12个月(SPI₁₂)反映长期降水变化格局。本文通过计算不同时间尺度SPI指数对黄土高原多尺度干旱时空特征进行分析。

1.3.3 干旱和热浪并发检测

本文采用叠加统计分析方法探究黄土高原同时发生干旱热浪事件的时空变化规律。具体方法

如下:首先利用SPI指数判别每月发生的干旱事件,以-0.8作为干旱测度标准^[20],大于-0.8即为非干旱,设置为0,小于-0.8为干旱,设置为1;然后统计每月发生日高温热浪事件(1 d)频次,同样未发生热浪事件设置为0,发生1次热浪事件设置1,以此类推;最后将每月发生的干旱与热浪事件进行叠加,统计各站点每月发生干旱热浪并发事件的频次。

1.3.4 趋势分析

采用滑动平均、Sen斜率估计分析区域气候指数的年际变化。其中滑动平均是一种简单的趋势拟合方法,用确定时间序列的平滑值表示变化趋势,分析时主要从滑动平均曲线判断其趋势变化;Sen趋势分析的优点是既不受异常值影响,也不需要服从一定的分布,能很好地反映时间序列趋势的变化程度^[17],并采用非参数检验法 Mann-Kendall (MK)进行显著性检验。

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (1)$$

式中: β 为某像元干旱或热浪变化趋势; i, j 为时间; x_i, x_j 分别代表第*i, j*时间的像元干旱或热浪值。当 $\beta > 0$ 时,说明该像元内干旱或热浪呈上升趋势; $\beta < 0$ 时,说明该像元内干旱或热浪呈下降趋势; $\beta = 0$,表示无趋势。

2 结果分析

2.1 黄土高原热浪时空变化特征

2.1.1 时间变化特征

如图2所示,1960—2016年黄土高原1 d高温热浪以0.29次/a的速率呈增加趋势,其中1960—1976年频次波动较大,1964和1976年频次较低,分别为24.94次/a和23.84次/a;1977—1995年呈现平缓增加趋势,1996年之后增加趋势更为显著,2000年之后热浪频次均值较高,为54.04次/a。3 d热浪呈平缓增加趋势,增速为0.04次/10 a,1960—1979年呈下降趋势,1980—2000年变化趋势并不明显,

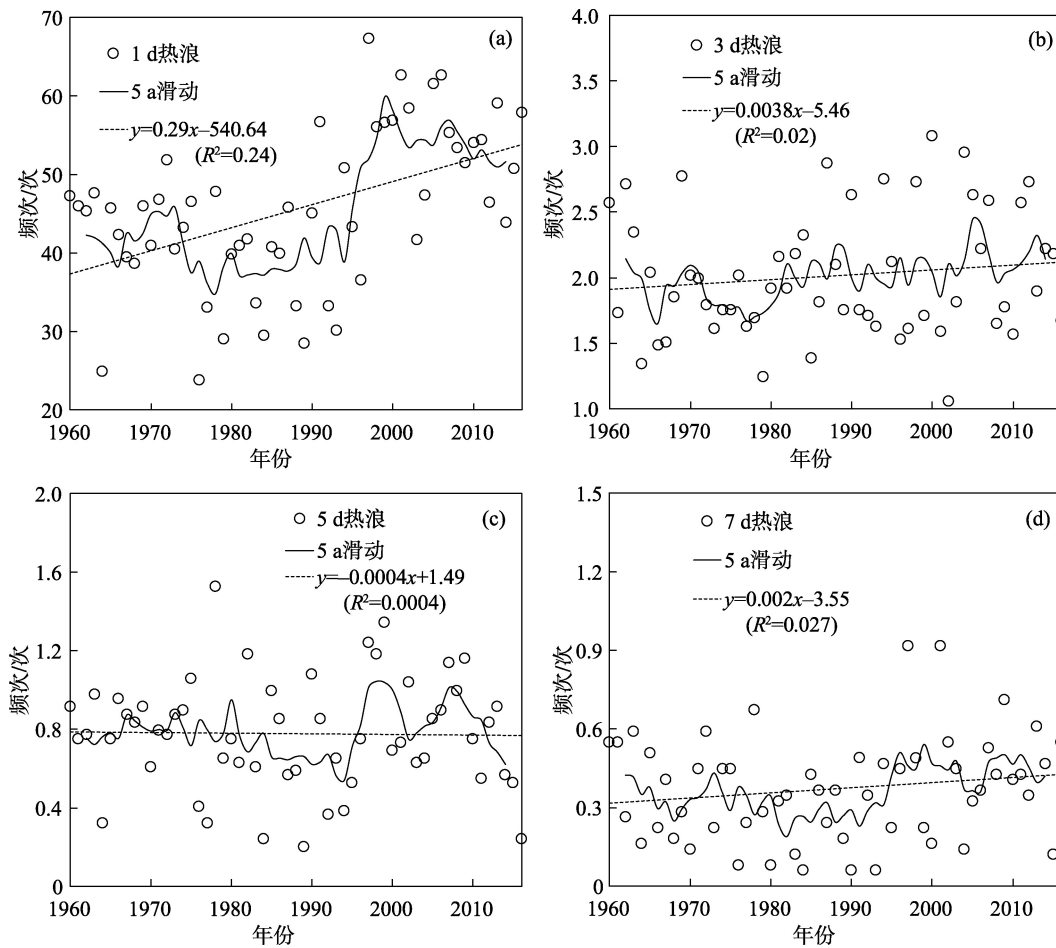


图2 1960—2016年黄土高原高温热浪年均频次

Fig.2 Average frequency of heatwaves on the Loess Plateau, 1960—2016

2001年之后呈增加趋势。5 d热浪频次变化波动幅度较小,1960—1975年呈平缓减少趋势,1979—1994年下降趋势更为明显,1994年之后呈现上升趋势。7 d热浪整体呈现小幅上升趋势,为0.02次/10 a,1960—1980年为下降趋势,1990年之后开始增加,1997年和2001年最高均为0.92次/a。从以上分析可以看出,近57 a黄土高原1 d热浪增加趋势最为显著,持续长时间热浪(3 d、5 d、7 d)变化趋势并不明显,但在1995年之后热浪频次均呈明显增加趋势。高温热浪频次的增加与全球气候变暖密切相关,气候变暖使得区域平均气温升高,特别是极端气温显著增加,20世纪90年代中后期中国西北地区高温天数明显增加^[35],进一步验证了本文黄土高原1995年之后高温热浪频次增加的研究结果。

2.1.2 空间变化特征

在空间上,高温热浪增加趋势在黄土高原范围内广泛存在,但其持续时间不同,变化趋势具有明显的空间差异。1 d热浪变化趋势介于-0.01~0.29次/10 a之间,增加趋势占整个研究区的97.23%,其

中:有5个站点增加趋势大于0.05次/10 a,显著增加趋势区域集中在山西东北部以及黄土高原西南部;仅有3个站点呈减少趋势,分别为河南三门峡、陕西榆林和山西运城(图3a)。3 d热浪,增加趋势仍大于整个研究时段的发展趋势系数,且增加趋势区域主要集中在山西东部、陕北的中南部以及甘肃中西部,甘肃临洮、山西太原和甘肃西峰镇增加趋势最为显著,增速为0.31次/10 a、0.29次/10 a和0.28次/10 a,减少趋势区域分布在黄土高原西北部、宁夏以及山西西南部(图3b)。5 d热浪频次趋势系数介于-0.17~0.22次/10 a之间,呈减少和增加趋势的区域分别占55.88%和44.11%,显著增加区域主要分布在山西省大部分地区、陕北南部、宁夏东部以及甘肃中西部,减少趋势区域分布在陕北高原中部以及宁夏中西部(图3c);7 d热浪趋势系数为-0.11~0.21次/10 a,增加和减少趋势区域分别达到57.20%和42.79%,呈增加趋势区域主要位于黄土高原西部和山西的东部地区,而减少区域主要分布在黄土高原南部、山西西北部以及榆林市北部(图3d)。从整

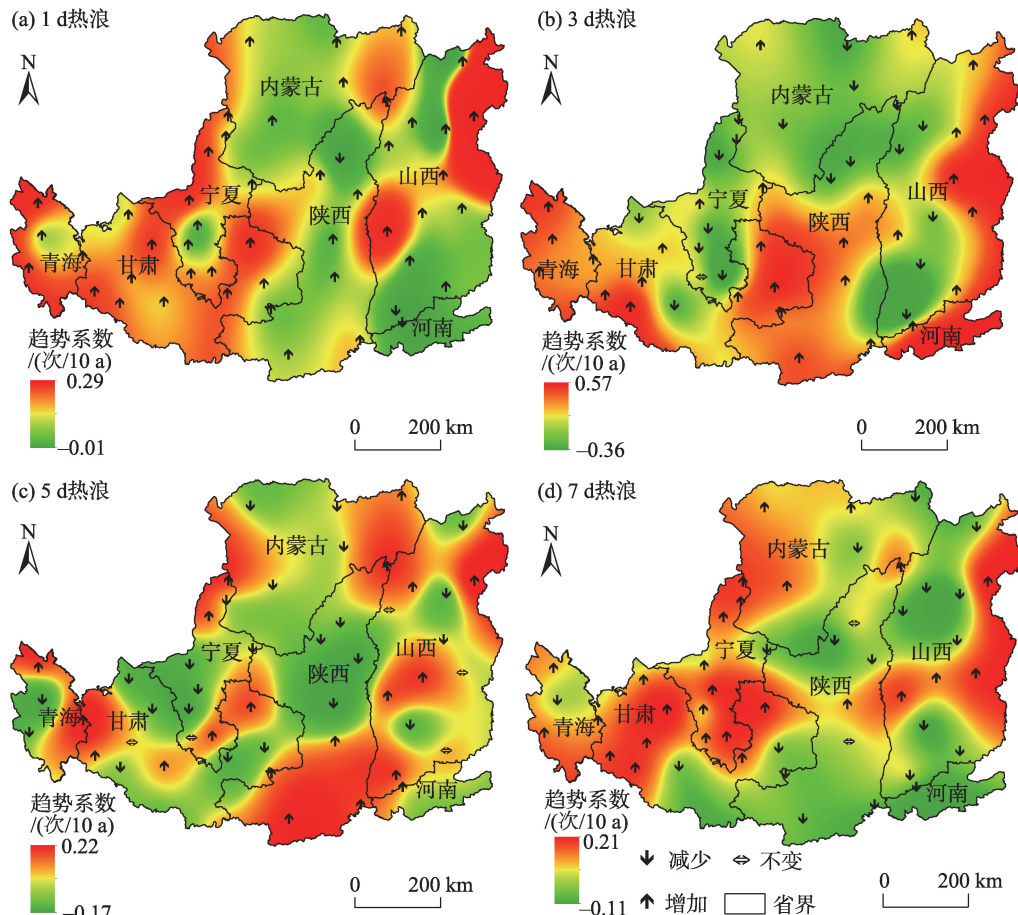


图3 1960—2016年黄土高原热浪变化趋势分布

Fig.3 Spatial variation of the trend of heatwaves on the Loess Plateau, 1960–2016

个黄土高原区域来看,山西省东北部、青海省东部以及甘肃中南部高温热浪均呈明显增加趋势,这可能与该区域大气环流异常有关,当西太平洋副热带高压持续稳定且加强,极易引发该区域高温热浪,同时城市热岛效应加强了高温热浪的剧烈程度^[35]。

2.2 黄土高原干旱时空变化特征

2.2.1 时间变化特征

在月(SPI₁)、季(SPI₃)、半年(SPI₆)和年(SPI₁₂)时间尺度上,1960—2016年黄土高原SPI指数呈现明显的震荡波动,旱涝交替频繁(图4)。从5 a滑动平均曲线可以看出,黄土高原SPI指数具有明显的阶段性特征:① 20世纪60—80年代,SPI值波动变化且均以正值为主,即该时段相对比较湿润,为偏涝年份,旱灾发生频率较低,但SPI指数表现为下降趋势;② 80—90年代中期SPI指数正负交替变化,旱涝交替频繁,干旱强度与湿润强度相当;③ 90年代中期到21世纪初期,SPI指数多为负值,说明该时期干旱频繁发生且强度较大,进入全面干旱时期,2010年以后表现为增加趋势,干旱趋势有所下降。在不同时间尺度上,SPI₁正负波动频繁,各月间变化

较大,严重干旱出现在1997年10月、1981年5月和1986年9月,分别为-1.82、-1.59和-1.51(图4a);SPI₃在1990年3月达到最大值为1.77,1991年之后呈现明显下降趋势,1997—2002年表现为显著干旱(图4b);SPI₆在1962年12月为极端干旱,指数为-1.76,1999—2014年表现为上升趋势(图4c);SPI₁₂波动变化较大,趋势变化与SPI₆较为一致,1990—2000年呈现显著下降趋势(图4d)。不同时间尺度SPI指数干旱趋势变化的转折点存在时间差异,但整体均呈下降趋势,说明57 a来黄土高原表现为由涝转旱的趋势。

2.2.2 空间变化特征

黄土高原旱涝指数变化趋势具有全域性,即整体表现为一致变旱趋势,不同时间尺度SPI指数空间变化趋势大致相似。SPI₁变化趋势介于-0.21~0.09/10 a之间,增加和减少趋势区域分别占44.21%和55.78%,显著减少区域集中在山西南部、陕北南部、宁夏东部以及甘肃东南部,其中山西五台山减少趋势最大,为-0.16/10 a,而在黄土高原西北部以及青海省东南部则表现为增加趋势(图5a)。SPI₃减

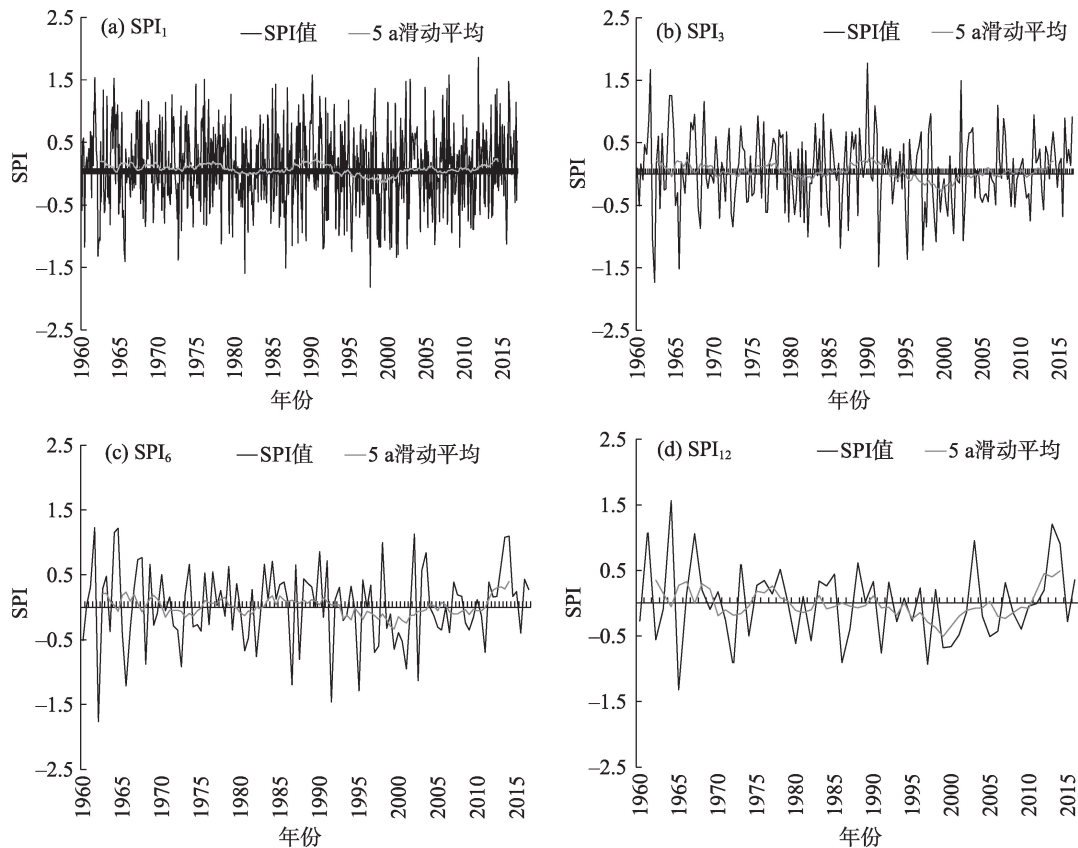


图4 1960—2016年黄土高原不同时间尺度旱涝指数变化特征

Fig.4 Characteristics of standardized precipitation index (SPI) at different temporal scales on the Loess Plateau, 1960–2016

少趋势面积有所增加,占整个研究区的56.65%,趋势系数介于 $-0.30 \sim -0.14/10\text{ a}$ 之间,显著减少区域主要位于黄土高原沟壑区南部、陕北南部、山西东南部和甘肃中东部,其中山西五台山和陕西华山下降趋势最明显,分别为 $-0.21/10\text{ a}$ 和 $-0.15/10\text{ a}$,而增加趋势区域主要分布在黄土高原西北部和宁夏北部(图5b)。SPI₆空间变化趋势表现为明显的南北差异,变化趋势介于 $-0.16 \sim 0.17/10\text{ a}$ 之间,下降趋势占总面积的44.93%,主要位于黄土高原东南部地区,其中有28个气象站点表现为增加趋势,集中在山西北部、延安市北部、宁夏中北部以及青海东南部(图5c)。SPI₁₂空间变化趋势与SPI₃较为相似(图5d),干旱趋势范围有所增加且较为明显,增加和减少趋势区域分别占38.91%和60.08%,显著增加趋势区域集中在黄土高原西北部和宁夏东南部,减少区域主要分布在黄土高原东南部。通过以上分析发现,1960—2016年黄土高原显著干旱区域集中在陕西南部、山西南部以及甘肃东部,这可能与该地区逐

年降水量减少有关,参考前人的研究结果发现1986年是中国西北地区气候变化明显转折的年份^[35],年降水量在1987—2003年期间呈现西部增多、东部减少的趋势,且在甘肃东部、陕西南部显著减少,而降水量的持续偏少使得土壤水分亏缺,造成长时间干旱的频繁发生。

2.3 黄土高原干旱与热浪并发分析

2.3.1 时间变化特征

通过以上分析可以看出,长时间持续热浪(3 d、5 d、7 d)每年发生频次较低,长期变化趋势并不明显,因此本文进一步分析黄土高原日高温热浪(1 d)与干旱同时发生事件的时空变化特征。由图6可以看出,1960—2016年黄土高原干旱热浪并发事件整体呈现明显增加趋势,增速为0.66次/10 a。干旱热浪并发事件频次变化具有明显的阶段性特征,基于分段线性回归,以1980年和2002年为转折点,分别对每段频次变化进行线性拟合,结果表明:①1960—1979年表现为下降趋势,降速为 -0.26 次/a ,

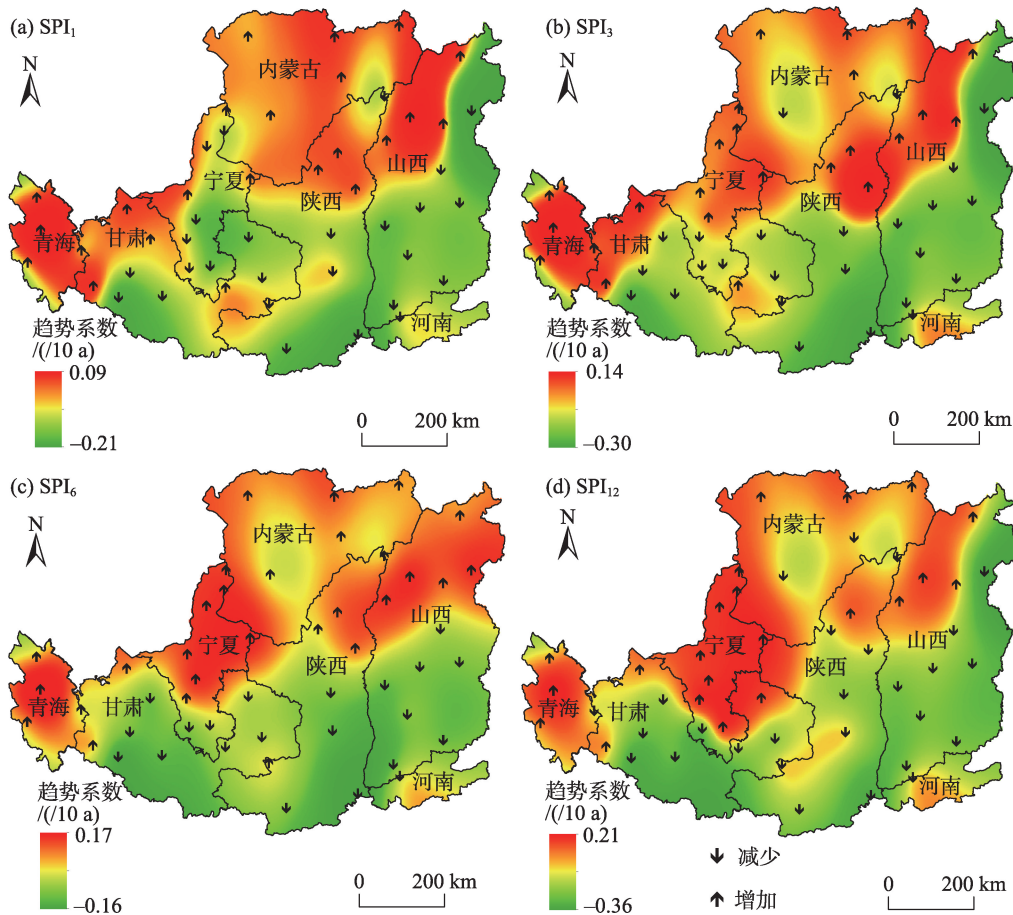


图5 1960—2016年黄土高原旱涝指数空间趋势变化分布

Fig.5 Spatial distribution of the trend of standardized precipitation index (SPI) values on the Loess Plateau, 1960–2016

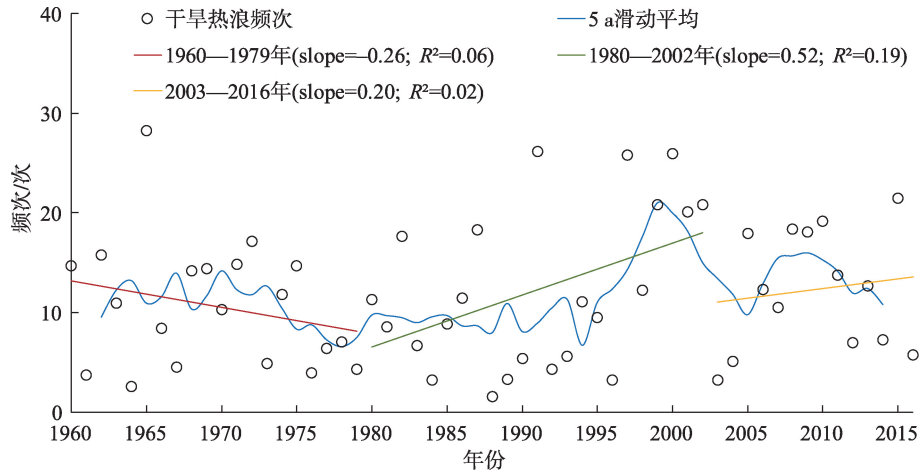


图6 1960—2016年黄土高原同时发生干旱热浪事件频次

Fig.6 Temporal variation of droughts and heatwaves that occurred simultaneously on the Loess Plateau, 1960-2016

频次波动较大, 高低位之间变化频繁, 最高值出现在1965年, 为28.24次/a, 结合上文研究结果“1965年黄土高原累积降水变化 SPI_{12} 为-1.32”, 属于中度干旱, 年均热浪频次为45.76次, 说明气温升高, 蒸发较大, 降水量减少, 加快了气象干旱和土壤干旱的同时产生, 导致极端气候事件高发; ② 1980—2002年呈显著增加趋势, 增速达0.52次/a, 且在1991、1997和2000年频次较大, 达到26.16次/a、25.80次/a和25.91次/a, 研究发现, SPI_1 多为负值即表现为严重干旱, 降水量少, 空气湿度较低, 平均气温逐渐升高, 同时发生极端气象灾害事件的频率较高; ③ 2003—2016年变化趋势并不明显, 增速为0.20次/a, 但年均频次较高, 达到12.32次/a。

2.3.2 空间变化特征

空间上, 黄土高原单站干旱热浪频次具有显著

的空间差异(图7a), 高值区集中在山西的东部、陕北南部以及甘肃东南部, 其中山西原平、五台山和陕西武功同时发生干旱热浪事件频次最高, 分别为15.23次/a、14.35次/a和14次/a; 低值区分布在青海省西北部、甘肃中东部和宁夏东南部, 其中内蒙古临河、青海西宁、门源以及甘肃榆中发生频次较低, 分别为8.40次/a、9.49次/a、9.59次/a和9.72次/a。从中可以看出, 黄土高原同时发生干旱热浪频次表现为由西北向东南逐渐增加的趋势, 这与该地区气温和降水变化有直接关系。由于黄土高原冬季受极地大陆气团控制, 冷空气自西北向东南扩展, 导致东南气温偏高而西北偏低, 夏季东南季风盛行, 来自于海洋的暖湿气团缓解了东南和西北地区的温差^[6], 但对其影响较弱; 同时受黄土高原地形影响, 山西省东部南北走向的太行山阻挡了来自海

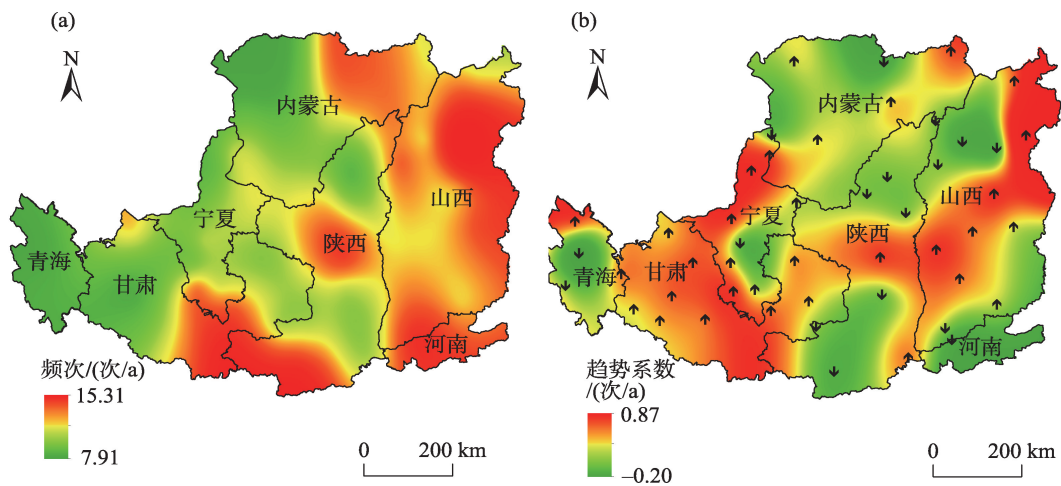


图7 黄土高原同时发生干旱热浪事件频次和变化趋势空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the trend of droughts and heatwaves that occurred simultaneously on the Loess Plateau

洋暖湿气流的进入,使其降水量逐渐减少。从空间趋势变化来看(图7b),整个研究时段变化趋势介于 $-0.20\sim 0.87$ 次/a之间,增加和减少趋势分别占总面积的72.31%和27.69%,且增加趋势大于0.1次/a的区域占30.31%,其中呈显著增加趋势的区域主要位于山西中部和东北部、甘肃中东部和宁夏北部;而明显减少的区域分布在黄土高原西北部、山西省东南部以及青海西宁市南部,其中减少趋势小于0.1次/a的气象站点共有4个,分别为青海西宁、山西五寨、内蒙古包头和河南三门峡。对比上文研究结果可知,同时发生干旱热浪事件增加趋势范围与高温热浪频次增加趋势较为相似,说明极端高温可能会使得气象灾害事件频发。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用1960—2016年黄土高原49个气象台站日最高气温和月降水数据,采用高温阈值和标准化降水指标分析热浪和干旱的时空分布特征,探究黄土高原同时发生干旱和热浪事件的长期变化趋势,主要得到以下结论:

(1) 1960—2016年内黄土高原高温热浪呈增加趋势,且在1995年之后呈显著增加趋势。1 d热浪增加趋势最为显著,增速为0.29次/a,并在1997年达到最大值;3 d热浪呈平缓增加趋势,为0.04次/10 a,其中1960—1979年为下降趋势,2001年之后又开始增加;5 d热浪变化幅度较小,1960—1994年呈平缓下降趋势,之后表现为增加趋势;7 d热浪整体呈小幅上升趋势,在20世纪90年代之后增加趋势比较显著。

(2) 空间上,热浪持续时间不同变化趋势也存在差异,1 d热浪增加趋势范围较大,占总面积的97.23%,主要集中在山西东北部以及黄土高原西南部;3 d热浪显著增加趋势主要分布在山西东部、陕北西南部以及甘肃中西部;5 d热浪增加趋势范围较小,增加和减少分别占44.11%和55.88%;7 d热浪增加趋势主要位于黄土高原的西部和山西东部,减少区域分布在黄土高原的南部、山西西北部以及榆林市北部地区。

(3) 1960—2016年黄土高原旱涝变化大致分为3个阶段:20世纪60—80年代,为相对偏涝时期;80—90年代中期,旱涝交替频繁;90年代中期到21

世纪初期,为相对偏旱时期,2010年之后干旱有所好转;不同时间尺度SPI指数空间变化趋势大致相似,整体均以干旱趋势为主,其中SPI₁₂减少趋势最显著,占整个研究区的60.08%,呈显著减少趋势分布在陕北南部、山西南部、甘肃中东部,而黄土高原西北部和宁夏北部表现为增加趋势。

(4) 1960—2016年来黄土高原同时发生干旱热浪事件整体呈现增加趋势,增速为0.66次/10 a,并具有明显的阶段变化特征,其中1960—1979年呈显著减少趋势,降速为 -0.26 次/a,1980—2002年呈增加趋势,增速达0.52次/a,2003年之后变化趋势并不明显;空间上,黄土高原单站同时发生干旱热浪频次具有显著的空间差异,高值区集中在山西东部、陕北南部以及甘肃东南部,且增加趋势遍布整个黄土高原,其中山西东北部、甘肃中东部和宁夏北部增加趋势更为显著。

3.2 讨论

本文探讨了黄土高原干旱热浪及其并发事件特征,为全面认识黄土高原极端气候事件的变化特征提供了参考。但研究还存在以下不足:① 本文利用日最高气温和月尺度SPI指数统计干旱热浪并发事件,把发生干旱的月份假设成每天均为干旱与日高温热浪进行叠加,这样可能会存在并发事件在数值上被高估的情况,但对于长时间趋势分析影响相对较小,未来将进一步探索日尺度下干旱热浪并发事件的演变规律,从而挖掘更为有效的气候变化信号;② 评估研究结论的不确定性。基于叠加统计分析方法识别干旱热浪并发事件,SPI₁、SPI₃、SPI₆和SPI₁₂与热浪1 d、3 d、5 d和7 d叠加分析尺度也存在差异,因此分析不同尺度下的并发事件变化特征也是未来重点研究内容;③ 高温热浪和旱涝变化的原因分析方面,揭示城市热岛效应、土地利用/覆被变化等人类活动对于极端气候事件的驱动机制,以及大气环流背景及其物理机制还需深入分析。

极端灾害事件的增加对区域经济发展和生态保护提出了严峻的挑战,本文针对黄土高原极端气候事件研究现状提出如下建议:首先是加强黄土高原极端灾害事件动态监测和预测工作,为相关决策部门合理规划提供科学依据;其次是建立气象灾害事件风险评估体系,评价其造成的危害程度,提出相应的防御措施;另外,还要加强对于生态环境的保护意识,减缓城市热岛效应,缓解高温热浪,提高水资源利用效率,开发利用新能源,发展农业基础

设施。在全球气候变暖的背景下,受自然因素和人类活动的双重影响,黄土高原极端气候事件驱动机制异常复杂,这与大气环流异常、下垫面、洋流和气候系统外部因素的强迫作用密切相关,值得进一步深入探讨。

参考文献(References)

- [1] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.近53年内蒙古寒潮时空变化特征及其影响因素[J].地理学报,2014,69(7): 1013-1024. [Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. The spatial-temporal changes of cold surge in Inner Mongolia during recent 53 years. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 1013-1024.]
- [2] 郑景云,郝志新,方修琦,等.中国过去2000年极端气候事件变化的若干特征[J].地理科学进展,2014,33(1): 3-12. [Zheng Jingyun, Hao Zhixin, Fang Xiuqi, et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 3-12.]
- [3] 崔林丽,史军,周伟东.上海极端气温变化特征及其对城市化的响应[J].地理科学,2009,29(1): 93-97. [Cui Linli, Shi Jun, Zhou Weidong. Characteristics of extreme temperature variations and their response to urbanization in Shanghai. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(1): 93-97.]
- [4] 秦大河.气候变化科学与人类可持续发展[J].地理科学进展,2014,33(7): 874-883. [Qin Dahe. Climate change science and sustainable development. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883.]
- [5] Formayer H, Boroneant C, Stepanek P, et al. Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(1): 17-21.
- [6] 李双双,延军平,杨赛霓,等.1960—2016年秦岭—淮河地区热浪时空变化特征及其影响因素[J].地理科学进展,2018,37(4): 504-514. [Li Shuangshuang, Yan Junping, Yang Saini, et al. Spatiotemporal variability of heat waves and influencing factors in the Qinling-Huaihe region, 1960-2016. *Progress in Geography*, 2018, 37(4): 504-514.]
- [7] 贾佳,胡泽勇.中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势[J].地球科学进展,2017,32(5): 546-559. [Jia Jia, Hu Zeyong. Spatial and temporal features and trend of different level heat waves over China. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(5): 546-559.]
- [8] 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,2014,29(8): 956-967. [Huang Qiang, Chen Zishen. Regional study on the trends of extreme temperature and precipitation events in the Pearl River Basin. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(8): 956-967.]
- [9] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.1965—2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J].地理研究,2016,35(4): 639-652. [Zhao Anzhou, Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, et al. Trend variations and spatial difference of extreme air temperature events in the Loess Plateau from 1965 to 2013. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 639-652.]
- [10] 王芝兰,李耀辉,王素萍,等.1901—2012年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征[J].中国沙漠,2015,35(6): 1666-1673. [Wang Zhilan, Li Yaohui, Wang Suping, et al. Characteristics of drought at multiple time scales in the east of Northwest China from 1901 to 2012. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(6): 1666-1673.]
- [11] 胡子瑛,周俊菊,张利利,等.中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J].生态学报,2018,38(6): 1908-1919. [Hu Ziyang, Zhou Junju, Zhang Lili, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1908-1919.]
- [12] Mueller B, Seneviratne S I. Hot days induced by precipitation deficits at the global scale [J]. *PNAS*, 2012, 109(31): 12398-12403.
- [13] Shukla S, Safeeq M, Aghakouchak A, et al. Temperature impacts on the water year 2014 drought in California [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(11): 4384-4393.
- [14] Caesar J, Alexander L, Vose R. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(D5). doi: 10.1029/2005jd006280.
- [15] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(D5): 1042-1063.
- [16] Fouillet A, Rey G, Laurent F, et al. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2006, 80(1): 16-24.
- [17] 李洋,王玉辉,吕晓敏,等.1961—2013年东北三省极端气候事件时空格局及变化[J].资源科学,2015,37(12): 2501-2513. [Li Yang, Wang Yuhui, Lv Xiaomin, et al. Spatial distribution and temporal change in extreme weather events in three provinces in Northeast China. *Resources Science*, 2015, 37(12): 2501-2513.]
- [18] 李运刚,何娇楠,李雪.基于SPEI和SDI指数的云南红

- 河流域气象水文干旱演变分析 [J]. 地理科学进展, 2016, 35(6): 758-767. [Li Yungang, He Jiaonian, Li Xue. Hydrological and meteorological droughts in the Red River Basin of Yunnan Province based on SPEI and SDI indices. *Progress in Geography*, 2016, 35(6): 758-767.]
- [19] 邓振镛, 文小航, 黄涛, 等. 干旱与高温热浪的区别与联系 [J]. 高原气象, 2009, 28(3): 702-709. [Deng Zhenyong, Wen Xiaohang, Huang Tao, et al. Relationship and difference between drought and high temperature heat waves. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(3): 702-709.]
- [20] Mazdiyasi O, Aghakouchak A. Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States [J]. *PNAS*, 2015, 112(37): 11484-11489.
- [21] Hao Z, Aghakouchak A, Phillips T J. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 34014. doi: 10.1088/1748-9326/8/3/034014.
- [22] Zhang Q, Xiao M, Singh V P, et al. Observational evidence of summer precipitation deficit-temperature coupling in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(19): 10040-10049.
- [23] Aghakouchak A, Cheng L, Mazdiyasi O, et al. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(24): 8847-8852.
- [24] Sun Q, Miao C, Aghakouchak A, et al. Unraveling anthropogenic influence on the changing risk of heat waves in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(10): 5078-5085.
- [25] 刘宇峰, 原志华, 李文正, 等. 1961—2013年黄土高原地区旱涝特征及极端和持续性分析 [J]. 地理研究, 2017, 36(2): 345-360. [Liu Yufeng, Yuan Zhihua, Li Wenzheng, et al. Extreme and persistent analysis of drought-flood variation in the Loess Plateau during 1961-2013. *Geographical Research*, 2017, 36(2): 345-360.]
- [26] 任婧宇, 彭守璋, 曹扬, 等. 1901—2014年黄土高原区域气候变化时空分布特征 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 621-633. [Ren Jingyu, Peng Shouzhang, Cao Yang, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of climate change in the Loess Plateau from 1901 to 2014. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4): 621-633.]
- [27] 王丽娜, 朱清科, 翁白莎, 等. 1961—2012年黄土高原干旱时空分布特征 [J]. 水利水电技术, 2018, 49(2): 15-22. [Wang Lina, Zhu Qingke, Weng Baisha, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of drought in Loess Plateau from 1961 to 2012. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(2): 15-22.]
- [28] Robinson P J. On the definition of a heat wave [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(4): 762-775.
- [29] Perkins S E, Alexander L V. On the Measurement of Heat Waves [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(13): 4500-4517.
- [30] 徐金芳, 邓振镛, 陈敏. 中国高温热浪危害特征的研究综述 [J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 163-167. [Xu Jinfang, Deng Zhenyong, Chen Min. A summary of studying on characteristics of high temperature and heat wave damage in China. *Journal of Arid Meteorology*, 2009, 27(2): 163-167.]
- [31] 张苗苗. 基于SPI的近51 a晋北地区旱涝变化及干旱事件时空特征研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 138-144. [Zhang Miaomiao. Spatial-temporal characteristics of drought-flood and drought events based on standardized precipitation index in Northern Shanxi during recent 51 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(3): 138-144.]
- [32] Zhang Q, Xiao M, Singh V P, et al. Copula-based risk evaluation of droughts across the Pearl River Basin, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 111(1-2): 119-131.
- [33] Meng L, Shen Y. On the relationship of soil moisture and extreme temperatures in East China [J]. *Earth Interactions*, 2014, 18(1): 1-20.
- [34] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960—2013年北京旱涝变化特征及其影响因素分析 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 951-962. [Li Shuangshuang, Yang Saini, Liu Xianfeng. The characteristics of drought-flood variation and its influence factors in Beijing during 1960-2013. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 951-962.]
- [35] 邓振镛, 张强, 徐金芳, 等. 高温热浪与干热风的危害特征比较研究 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(8): 865-873. [Deng Zhenyong, Zhang Qiang, Xu Jinfang, et al. Comparative studies of the ham characteristic of hot-dry wind and high temperature heatwaves. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(8): 865-873.]
- [36] 张翀, 任志远, 李小燕. 黄土高原植被对气温和降水的响应 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4205-4215. [Zhang Chong, Ren Zhiyuan, Li Xiaoyan. Research on vegetation response to temperature and precipitation in Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4205-4215.]

Spatiotemporal changes of droughts and heatwaves on the Loess Plateau during 1960–2016

SUN Yijie, LIU Xianfeng*, REN Zhiyuan, DUAN Yifang

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on daily maximum temperature and monthly precipitation data of 49 meteorological stations on the Loess Plateau during 1960–2016 and using the 90th percentile of the temperature as extreme temperature thresholds and standardized precipitation index (SPI), this study examined the spatiotemporal variation characteristics of heatwaves and droughts and the dynamics of concurrent droughts and heatwaves across the Loess Plateau. The results show that: 1) The occurrence frequency of heatwaves presented an increasing trend on the Loess Plateau during the recent 57 years with a liner tendency of 0.29 times/a, of which a significant increasing trend was detected after 1995. The significantly increasing areas were mainly distributed in the northeast of Shanxi Province, eastern Qinghai Province, and southern and central Gansu Province. 2) Standardized precipitation index (SPI) showed a downward trend in the recent 57 years, indicating a trend from water-logging to drought, and the early 1990s was a turning point. Particularly, areas with the declining trend of SPI₁₂ accounted for 62% of the whole study area, and regions with significant drought were mainly distributed in the south of the gully areas of the Loess Plateau, the southern part of Northern Shaanxi, the south of Shanxi Province, and the east of Gansu Province. 3) The simultaneous occurrence frequency of droughts and heatwaves showed an overall increasing trend, with a growth rate of 0.66 times/10 a. From 1960 to 1979 it showed a declining trend of -0.26 times/a, then an increasing trend of 0.52 times/a from 1980 to 2002, while a steady increasing trend was detected after 2003. Spatially, the high incidence of droughts and heatwaves was observed in the eastern of Shanxi, the south of Northern Shaanxi, and the southwest of Gansu; areas with increasing trend were mainly concentrated in the northeast of Shanxi, central and eastern Gansu, and northern Ningxia.

Keywords: heatwave; drought; concurrent extremes; spatiotemporal variations; Loess Plateau