

# 1960—2015 年秦岭地区极端降水的时空变化特征

孟清<sup>1,2</sup>, 高翔<sup>3</sup>, 白红英<sup>1,2</sup>, 张杨<sup>1,2</sup>, 王辉源<sup>1,2</sup>

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 3.中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

**摘 要:**极端降水是气候变化的重要研究内容之一。在全球气候变化背景下,探究秦岭地区的极端降水变化,对于明确区域极端气候差异及探究其机理具有重要的意义。基于秦岭地区 1960—2015 年 29 个气象站点降水数据以及秦岭 25 m×25 m 分辨率的 DEM 数据集,选取 6 个极端降水指数,运用最小二乘回归法、Man-Kendall 突变检验法、5 年滑动趋势法和克里金插值法研究了 56 年来秦岭地区极端降水的时空变化特征。结果表明:(1) 秦岭地区极端降水分布存在明显空间差异性,西北部是年均连续无雨日数高值区,中西部为连续降水日数高值区;强降水日数、强降水量、5 日最大降水量和降水强度等指数呈“南高北低”的分布格局,位于秦岭最南端的紫阳县是各个极端降水指数极大值区。(2) 56 年来,秦岭地区极端降水的持续性整体呈减少趋势;强度呈增加趋势。秦岭山地降水时间短、强度大,尤其是在秦岭南部地区,应加强防备,以免引起洪水灾害造成的重大破坏。

**关键词:**气候变化; 秦岭地区; 极端降水; 时空变化

**中图分类号:**P426

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)06-0171-08

## Temporal and Spatial Variations and Trends of Extreme Precipitation in Qinling Mountains During the Period 1960—2015

MENG Qing<sup>1,2</sup>, GAO Xiang<sup>3</sup>, BAI Hongying<sup>1,2</sup>, ZHANG Yang<sup>1,2</sup>, WANG Huiyuan<sup>1,2</sup>

(1.College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2.Shaanxi Key Laboratory of Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University 710127, China; 3.China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Extreme precipitation is one of the important research topics of climate change. Under the background of global climate change, study on the extreme precipitation variation in Qinling Mountains is of great significance for clarifying regional extreme climate difference and exploring its mechanism. Based on the precipitation data of 29 meteorological stations in Qinling Mountains from 1960 to 2015 and the DEM data set with the resolution of 25 m×25 m, six extreme precipitation indices were selected to study the spatial and temporal variation characteristics of extreme precipitation in Qinling Mountains in the past 56 years by using least square regression, Man-Kendall mutation test and 5-year sliding trend method and kriging interpolation method. The conclusions were as follows. (1) There were obvious spatial differences in the distribution of extreme precipitation in Qinling Mountains. The northwest part was the high value area of consecutive dry day (CDD), and the central and western parts were the high value areas of consecutive wet day (CWD). The distribution pattern of number of heavy precipitation days (R10), very wet days(R95p), max 5-day precipitation amount (RX5day) and simple daily intensity index (SDII) were high in the south and low in the north. Ziyang County, which is located at the southernmost end of Qinling Mountains, has the maximum value of all extreme precipitation indices. (2) In the past 56 years, the persistence of extreme precipitation in Qinling Mountains has decreased and the intensity has increased as a whole. Precipitation in Qinling Mountains was short and intense, especially in the southern aspect of Qinling Mountains. Relevant departments should

收稿日期:2018-12-26

修回日期:2019-01-20

资助项目:国家林业公益性行业科研专项“秦岭天然林气候变化的时空响应及管理对策”(201304309)

第一作者:孟清(1993—),女,陕西长安人,博士,研究方向为秦岭地区气候变化和大气研究。E-mail:qingmengmq@163.com

通信作者:高翔(1986—),男,陕西西安人,工程师,主要从事地理信息系统、自然地理学等方面的科研与业务。E-mail:newxianggao@163.com

strengthen their preparedness so as not to cause major damage caused by flood disasters.

**Keywords:** climate shift; Qinling Mountains; extreme precipitation; spatiotemporal variation

从 20 世纪中叶以来,全球大多地区的特大降雨事件呈增加趋势,部分地区呈减少趋势<sup>[1]</sup>。IPCC 特别报告指出气候变化会导致极端天气和极端事件的频率、强度和持续时间发生改变<sup>[2]</sup>。IPCC 报告还指出 20 世纪中叶以来全球尺度上,人类活动导致了极端气温强度和频率的增加,但有限的研究能证明人类活动是导致极端降水事件频发的原因之一。Alexander 等<sup>[3]</sup>研究全球极端降水发现,20 世纪全球年降水量和极端降水有增加的趋势,即使在平均降水减少的北半球中高纬度地区,极端降水的频率和强度也在显著增加。Donat 等<sup>[4]</sup>研究发现,1951—2011 年全球极端降水的变化在空间上与极端气温变暖是不一致的且呈不显著变化,而且东亚、北美的西北部、欧洲的西南部和澳洲的东部和西南部表现出不显著的干旱趋势。区域尺度研究上,美国<sup>[5]</sup>,欧洲<sup>[6]</sup>等地区极端降水均呈不同程度的增加趋势。在城际尺度上,Rosenberg 等<sup>[7]</sup>发现 1949—2007 年美国城市波特兰和斯波坎市年降水量和极端降水呈减少趋势。Tan 等<sup>[8]</sup>发现加拿大西海岸地区年最大降水量呈现增加趋势,在北部区域呈减少趋势。与此同时,我国学者也同样重视极端降水,研究发现中国极端降水事件在西北西部、长江中下游、华南及青藏高原等地区表现为增加趋势,在东北东部、西北东部华北大部分等地表现为减少趋势<sup>[9-20]</sup>。由此可见,极端降水在不同的区域呈现不同的变化趋势。在已有研究中针对陕西秦岭地区的极端降水研究较少,李双双等<sup>[21]</sup>、李菲<sup>[22]</sup>研究了广义上秦岭地区的极端降水的时空变化与影响因子。由于秦岭地区海拔较高、地形较复杂,其气候变化有着自身独特的规律和特点,是气候变化的敏感区,因此,研究秦岭地区极端降水的时空变化特征意义非凡。

本文以狭义上的秦岭为研究区,位于东经 103°48′—113°04′,北纬 32°25′—35°16′。秦岭是我国重要的南北分界线,是 1 月 0℃等温线、800 mm 等降水量线以及北亚热带和暖温带的分界线,同时还是长江水系和黄河水系的分水岭<sup>[23-24]</sup>。秦岭地区近 60 年来年均降水的变化范围为 545.44~1 155.46 mm,年均降雨量为 824.76 mm,秦岭地区降水量南丰北少,季节分配不均匀<sup>[25]</sup>。秦岭山体庞大,冬季能阻挡寒冷的西伯利亚寒流南下,使南方减少冻害,夏季又可以阻挡太平洋上湿润的水汽北上,使得中国南北出现了不同的气候类型和植被类型<sup>[26]</sup>。本文通过 1960—2015 年

秦岭 29 个气象站点的日值降水资料,选取全球气象组织规定的 6 个极端降水指标,采用克里金插值法分析气候变化背景下 56 年来秦岭地区极端降水的时空变化特征及其影响因子,研究极端气候事件发生的频率、趋势及其空间差异性,旨在为研究气候变化背景下区域气候的变化与响应,对防灾减灾和生态预警提供参考,对预测和应对未来气候变化和极端气候事件有很重要的参考价值 and 意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

1960—2015 年秦岭 29 个气象站点的日值降水资料来源于陕西省气象局,并插补部分缺测数据,对缺测时间较长的数据进行剔除,并对数据进行一致性检验。25 m×25 m 分辨率的 DEM 来源于国家测绘局。研究区及气象站点分布状况见图 1。厄尔尼诺指数和太阳黑子活动指数由美国国家航空航天局提供。灾害统计数据来源于秦岭地区各个行政区县市志。

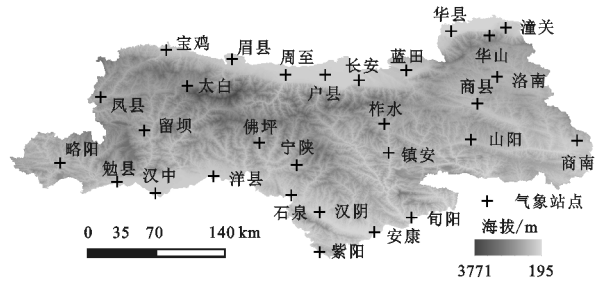


图 1 研究区及气象站点分布

### 1.2 研究方法

目前,研究极端降水有 2 种方法,一是根据天气现象(如台风)本身的定义标准,通过分析原始资料来判断此类极端降水事件的频率或强度变化<sup>[27-28]</sup>;二是定义与极端事件相关的代用气候指标,通过分析这些指数的变化特征来反映极端降水事件<sup>[29]</sup>。本文的极端降水指数是基于世界气象组织气候委员会规定的极端降水指数,根据秦岭位于湿润区与半湿润区的分界线附近,日降水量少、降水变率大,一些极端降水指数像日降水量大于 30 mm(R30)等指数并不适用于秦岭地区,故本文选取 6 个极端降水指数(表 1),这些指数能科学如实地反映秦岭地区极端降水变化,并能直观地表现出极端降水的变化特征,所选指数均由 RclimDex 软件进行加载和计算完成。

借助 ArcGIS 10.2 里的克里金插值法对 6 个极

端降水指数进行插值,以此来分析秦岭地区 56 年来  
极端降水的时空变化。突变分析采用 Mann-Kendall  
检验法<sup>[30-31]</sup>,M-K 检验则可有效监测降水的变化趋  
势和突变点。

表 1 6 个极端降水指数定义

指标类型	极端降水指数	英文名称(缩写)	定义
持续性指标	连续无雨日数(d)	CDD	日降水量<1.0 mm 的最大连续日数
	连续降水日数(d)	CWD	日降水量≥1.0 mm 的最大持续日数
	强降水日数(d)	R10	每年日降水量≥10 mm 的总日数
	5 日最大降水量(mm)	RX5day	月内连续 5 日降水量最大值之和
强度指标	强降水量(mm)	R95p	年内日降水量高于 95% 阈值降水量
	降水强度(mm/d)	SDⅡ	年内降水量与日降水量≥1.0 mm 日数之比

2 结果与分析

2.1 1960—2015 年秦岭地区极端降水变化特征

2.1.1 极端降水持续性变化特征 1960—2015 年秦  
岭地区年平均极端降水持续性指标随时间变化趋势和 5  
年滑动平均如图 2 所示。连续无雨日数(CDD)呈上升  
趋势(1 d/10 a)。连续无雨日数在 1999 年出现最高值  
(87 d)。连续无雨日数的 5 年滑动平均曲线也呈上升趋  
势(0.8 d/10 a);1960—1984 年变化较小,1985 年后呈下  
降趋势,1990—1996 年为一个明显的波峰,2001 年后  
是第 2 个波峰。

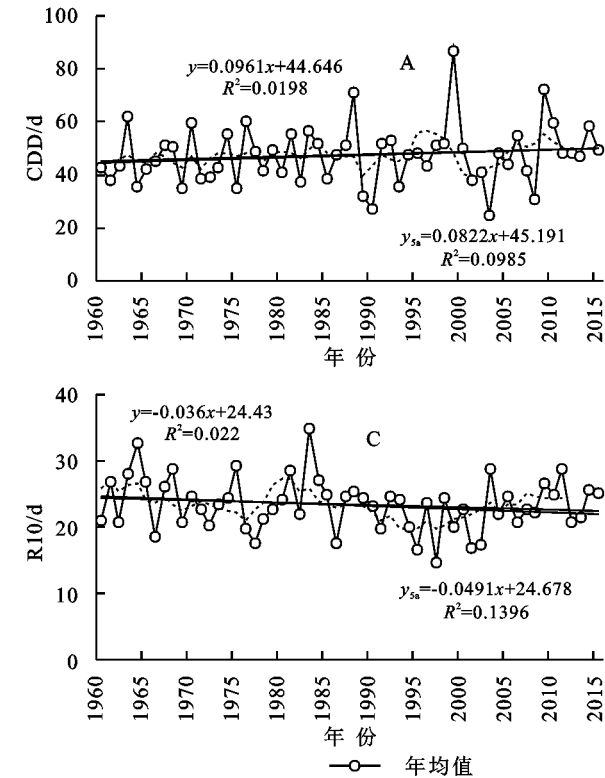


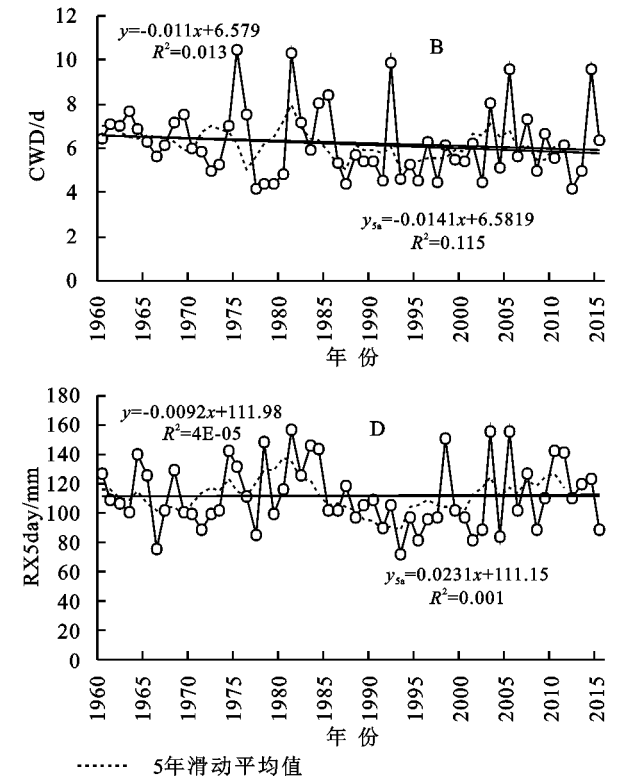
图 2 1960—2015 年秦岭地区极端降水持续性指标变化特征

2.1.2 极端降水强度变化特征 近 56 年来秦岭地  
区极端降水强度指标的变化特征如图 3 所示。强降  
水量(R95p)呈上升趋势(4.6 mm/10 a);强降水量在  
1983 年出现最高值(400 mm);从 5 年滑动平均曲线

连续降水日数(CWD)呈下降趋势(0.1 d/10 a)。连  
续降水日数在 2012 年出现最低值(4 d)。此外,连续降  
水日数 5 年滑动平均变化呈下降趋势(-0.1 d/10 a);总  
体变化幅度较小,1972 年和 1981 年分别是两个波峰。

强降水日数(R10)呈下降趋势(0.4 d/10 a);强降水  
日数在 1997 年出现最低值(15 d);强降水日数的 5 年滑  
动平均变化呈下降趋势(-0.5 d/10 a)。

5 日最大降水量(RX5day)呈下降趋势(0.1 mm/  
10 a)。5 日最大降水量在 1993 年出现最低值(72  
mm);从 5 年滑动平均可以看出,5 日最大降水量呈  
不显著的上升趋势(0.2 mm/10 a)。



可以看出,强降水量呈上升趋势(6.6 mm/10 a),此外,  
5 年滑动平均在 20 世纪 75—80 年代增加明显,1990 年  
为一个波谷,之后呈小幅上升。

降水强度(SDⅡ)呈上升趋势,上升幅度为 0.1

mm/(d·10 a)。降水强度在1983年出现最高值(13 mm/d);从5年滑动平均曲线可以看出,降水强度也同样呈上升趋势,变化幅度分别为0.1 mm/(d·10 a)。

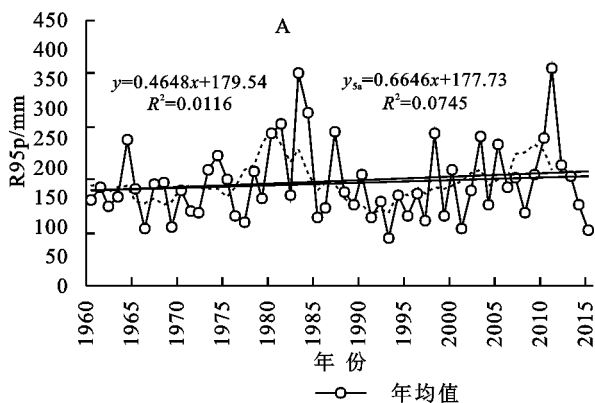


图3 1960—2015年秦岭地区极端降水强度指标变化特征

## 2.2 秦岭地区56年来极端降水突变检验

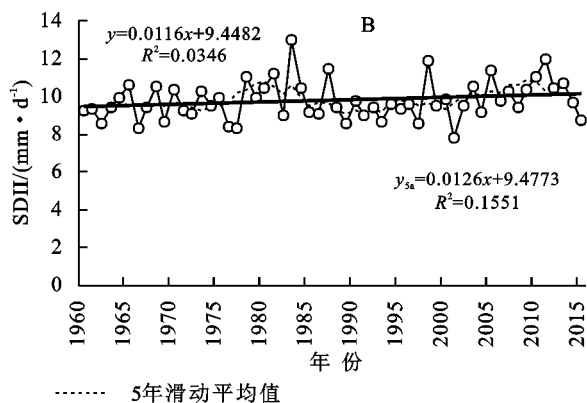
M-K 检验结果表明,秦岭地区连续无雨日数(图4A)整体呈稳定上升趋势,突变点较多且未达到显著水平;连续降水日数(图4B)呈上升趋势并在1965年出现了下降突变,下降趋势持续到2015年并且分别在1973年、1980年和20世纪90年代后半叶—21世纪初达到了显著性水平;此外,1965—1985年,连续降水日数的变化以5 a为周期,直到1985年后周期发生了变化;强降水日数(图4C)在研究时间段内呈上升趋势并出现多次突变,1983年出现了下降突变,持续下降并且在21世纪初达到显著水平,强降水日数在1985年前后周期发生了改变;强降水量(图4D)在研究时间段内呈现上升趋势并在1965年出现下降突变,下降趋势持续到2015年;5日最大降水量(图4E)在研究时间段内出现多次突变,其中,1980—1990年呈不显著上升趋势,分别在60、70年代和2000年左右呈显著下降趋势;降水强度(图4F)在研究时间段内呈上升趋势并出现多次突变,其中在1965年、1980年和2015年上升趋势达到显著水平。

由图4B—C可知,连续降水日数和强降水日数在1985年前后周期发生改变,故对该时期后的突变进行二次分析,结果如图5所示。连续降水日数在1999年发生上升突变,但未达到显著性;强降水日数突变点较多,1990年之前呈上升趋势,在之后的时间里呈下降趋势并在2002年达到显著性,在2009年转为上升趋势。

## 2.3 秦岭地区56年来极端降水的空间差异性

通过克里金方法得到1960—2015年秦岭地区6个极端降水指数均值的空间变化(图6),由图6可知,连续无雨日数(图6A)的变化呈“西北高东南低”的特征,可能原因是西北部位于内陆,远离太平洋湿润

此外,5年滑动平均在20世纪75—80年代有小幅上升,在1990年左右呈明显下降趋势,之后在波动中小幅上升。



水汽;连续降水日数(图6B)的极大值区分布在中部高海拔地区,原因可能是中高海拔地区地形封闭,水汽不易扩散且山体对暖湿气流具有抬升作用易成云致雨;强降水日数、强降水量、5日最大降水量和降水强度等指数年均值(图6C—F)的变化格局存在相似性、空间差异大,都呈“南高北低”的分布特征。其中,位于秦岭最南端的紫阳县是各个极端降水指数极大值区。

此外,除了降水强度,其他3个极端指数的极差为最小值的2倍;如图6E所示,位于秦岭南端紫阳县的5日最大降水量达166 mm,约为秦岭北坡周至和长安等地区5日最大降水量1倍多,原因可能是相对于北坡,秦岭南坡位于北亚热带,降水丰沛。

## 2.4 秦岭地区56年来极端降水变化趋势

通过克里金方法插值出的1960—2015年秦岭地区极端降水指数变化趋势的空间分布如图7所示。连续无雨日数(图7A)的变化范围为-0.28~0.3 d/10 a,显著性上升的区域占研究区总面积的22.53%,主要位于秦岭南坡南端的安康等地区;降水强度(图7F)的变化范围为0.002~0.022 mm/(d·10 a),显著上升的区域占研究区总面积的18.71%,位于秦岭南坡西部的商南县和汉中等地区;强降水量(图7D)的变化范围为-0.71~1.34 mm/10 a,全区域内均表现为非显著性的变化趋势。

连续降水日数(图7B)的变化范围为-0.023~0.007 d/10 a,显著性下降的区域占4.41%,主要分布于秦岭南坡西部的略阳县;强降水日数(图7C)的变化范围为-0.048~-0.01 mm/10 a,显著性下降的区域占9.66%,主要位于秦岭北坡东部的华山;5日最大降水量(图7E)的变化范围为-0.29~0.2 mm/10 a,显著性下降的区域占7.62%,主要位于秦岭南坡南端的旬阳。



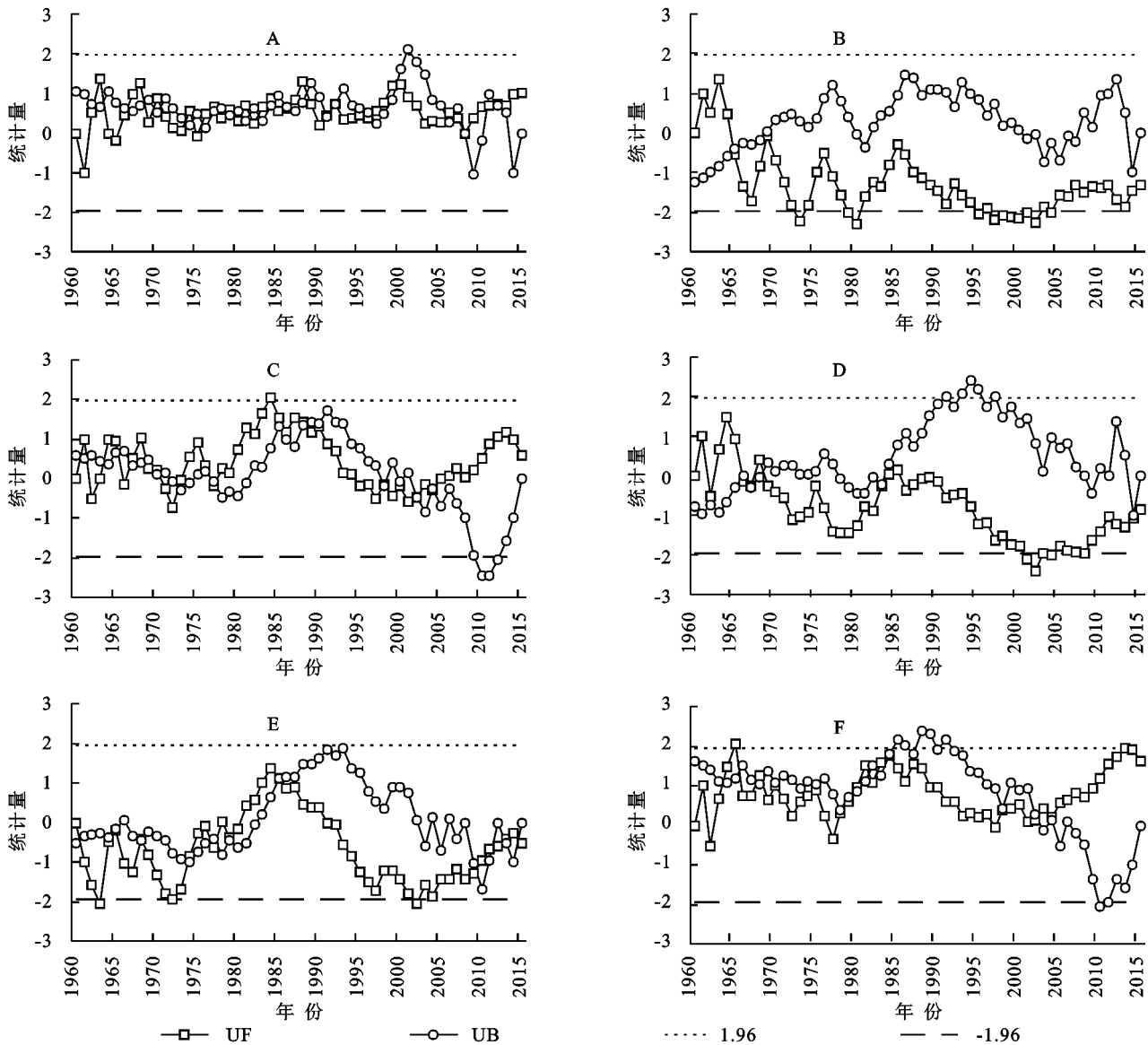


图 4 1960—2015 年秦岭地区各极端降水的 M-K 突变检验

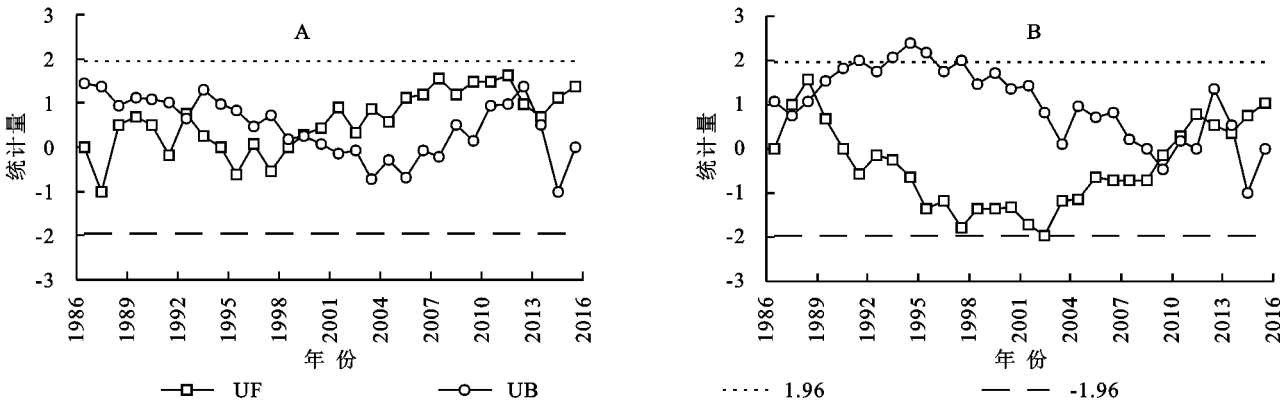


图 5 1986—2015 年秦岭地区连续降水日数和强降水日数 M-K 突变检验

3 讨论与结论

3.1 讨论

ENSO 事件是全球尺度海洋—大气相互作用的结果,是反映年际气候变化最强信号之一<sup>[32-33]</sup>, ENSO

加剧了干旱、洪水等极端事件的发生,因此,厄尔尼诺和拉尼娜事件受到人们的广泛关注<sup>[34-35]</sup>;太阳活动是地球空间环境扰动的源,与其他自然灾害和气候变化之间存在着种种联系<sup>[36-38]</sup>。表 2 是厄尔尼诺指数 ONI 和表征太阳黑子活动的指数分别与秦岭地区 56

年来极端降水指数的皮尔森相关性分析结果,皮尔森相关分析可以看出两者之间的相关性大小,从表 2 中可以看出,厄尔尼诺指数(ONI)和太阳黑子活动与秦岭地区 56 年来 6 个极端降水指数的响应存在一致性,均呈非显著负相关关系;另外,秦岭地区 56 年来 6 个极端降水指数与厄尔尼诺指数(ONI)的相关性高于与太阳黑子的相关性,这说明,当全球处于厄尔尼诺年(ENSO 暖事件)时或处于太阳黑子活跃年时,秦岭地区的极端降水强度和持续时间呈下降趋势,拉

尼娜事件与之相反<sup>[21]</sup>。为进一步说明此结论,本文通过收集 1960—2008 年秦岭地区有记录的旱涝灾害年鉴与相应年份的厄尔尼诺年和拉尼娜年进行验证,厄尔尼诺年和拉尼娜年参考马露<sup>[39]</sup>和李晓燕<sup>[40]</sup>等的研究结果(图 8),恰好证明了当全球处于拉尼娜年时,秦岭地区的涝灾频率(150)多于厄尔尼诺年(70),尤其是连阴雨的记录达 75 次,而厄尔尼诺年只有 34 次,说明当全球处于拉尼娜年时,应加大力度对秦岭地区的防洪措施,尤其是位于秦岭南坡的大部分地区。

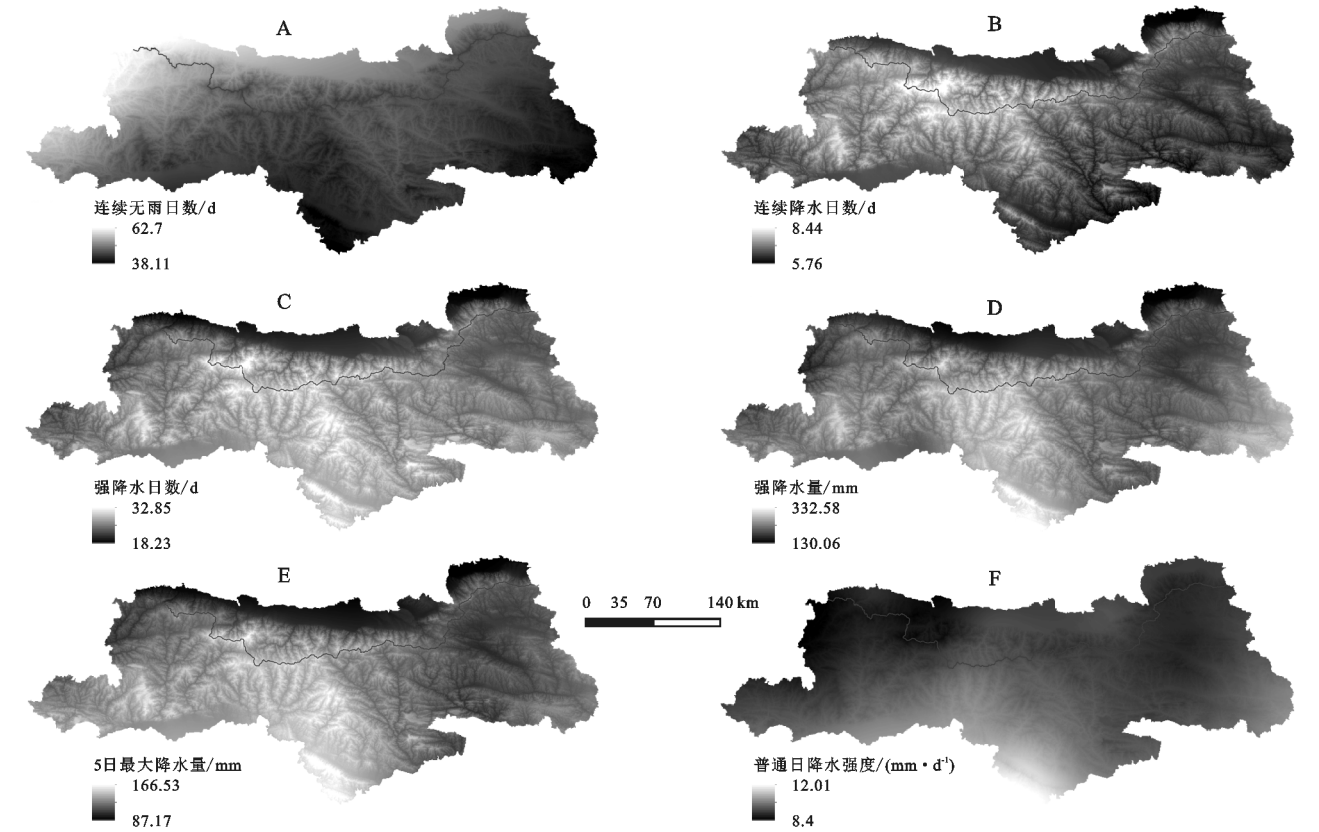


图 6 1960—2015 年秦岭地区极端降水指数的空间变化

表 2 1960—2015 年秦岭地区极端降水指数与厄尔尼诺指数(ONI)和太阳黑子相关性分析

指标	CDD	CWD	R10	R95p	RX5day	SDII
与 ONI 相关性						
与太阳黑子相关性						

注: -0.2 -0.02

太阳活动对全球气候系统具有明显影响,但不确定性较大。Miao 等<sup>[41]</sup>,胡邦琦<sup>[42]</sup>通过耦合模式和过去百年观测资料的分析,研究发现,在多年代际时间尺度上,太阳辐射度偏强时,东亚冬季风也显著增强。近日, Nature发表的论文称大西洋经圈翻转环流(AMOC)减弱对北半球的气温及降水类型发生重大变化<sup>[43]</sup>。青藏高原作为“世界第三极”,有研究表明,青藏高原积雪厚度与中国地区降水有着密不可分的关系,具体表现在积雪增加将会影响东亚夏季风的减弱<sup>[44]</sup>。其次,一次降水过程与季风和大气层状况息息相关,综上所述,由于篇幅

原因所以不能一一分析影响秦岭地区极端降水的因素。本研究发现秦岭地区连续无雨日数的变化格局呈“西北高东南低”的特征;强降水日数、强降水量、5 日最大降水量和降水强度等指数年均值的变化格局均呈“南高北低”的分布特征,这是因为秦岭作为中国南北分界线,南坡为北亚热带,受季风影响较大,降雨多,北坡为南暖温带,温暖湿润的东亚季风难以北上,所以造成“南高北低”的变化格局。至于连续降水日数在中高海拔表现出最大值区,这可能是由于随着海拔的升高气温越来越低,气压高,风速大,在 2300 m 左

右形成秦岭地区最大降雨量带,在这种气象条件下,极易形成连续降雨的天气。

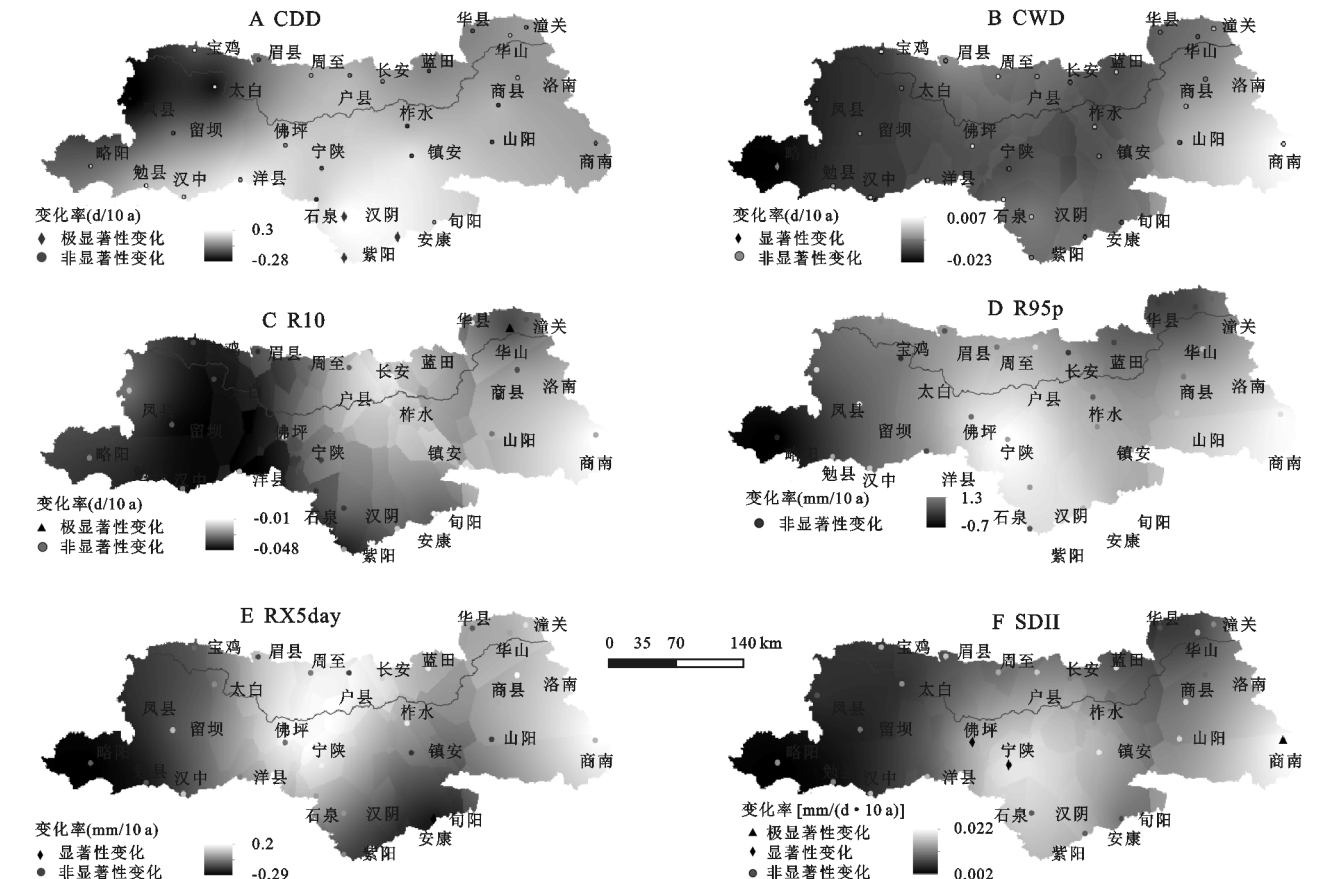


图 7 1960—2015 年秦岭地区极端降水指数变化趋势的空间分布

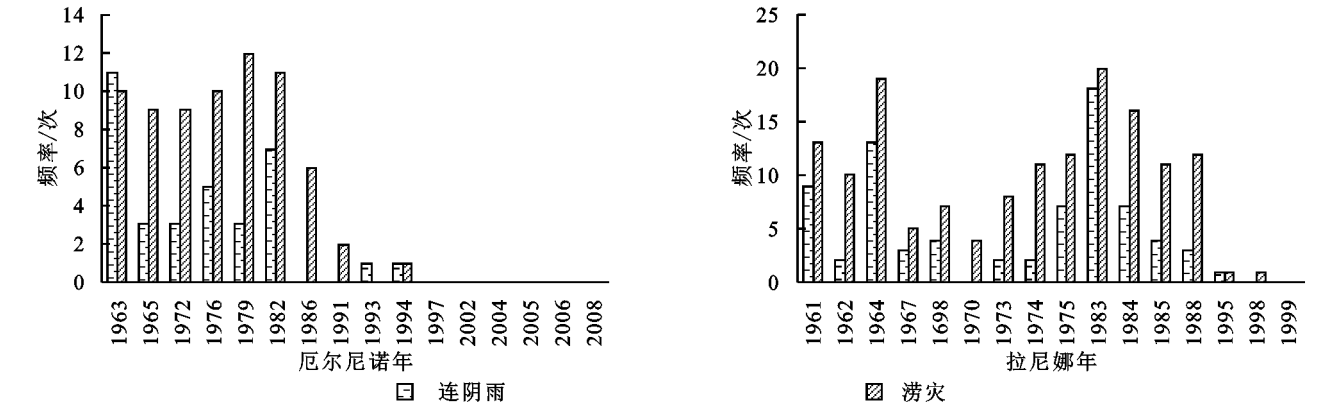


图 8 1960—2008 年秦岭地区不同背景下涝灾及连阴雨频率分布

### 3.2 结论

(1) 56 年来,秦岭山地极端降水的持续性总体呈减少趋势;强度呈增加趋势。其中,连续降水日数、强降水日数和 5 日最大降水量显著下降的区域分别占研究区总面积的 4.41%,9.66%,7.62%,分别位于汉中、华山和安康等地区;连续无雨日数和降水强度显著上升的区域分别是 22.53%,18.71%,分别位于安康地区和商南地区。

(2) M-K 检验表明,连续无雨日数呈稳定上升趋势,突变点较多且未达到显著水平;连续降水日数呈上升趋势并在 1965 年出现了下降突变,下降趋势

持续到 2015 年且分别在 1973 年、1980 年和 20 世纪 90 年代后半叶—21 世纪初达到了显著性水平;强降水日数呈上升趋势并出现多次突变,1983 年出现了下降突变,下降持续并且在 21 世纪初达到显著水平;强降水量呈现上升趋势并在 1965 年出现下降突变;5 日最大降水量出现多次突变,下降趋势多次并在 20 世纪 60,70 年代和 2000 年左右达到显著水平;降水强度呈上升趋势并出现多次突变,在 1965 年和 2015 年上升趋势达到显著水平。

(3) 1960—2015 年秦岭地区连续无雨日数的变化格局呈“西北高东南低”的特征;连续降水日数在中高海

拔表现出最大值区;强降水日数、强降水量、5 日最大降水量和降水强度等指数年均值的变化格局存在相似性、空间差异大,都呈“南高北低”的分布特征。其中,位于秦岭最南端的紫阳县是各个极端降水指数极大值区。

致谢:感谢高翔工程师(中国气象局公共气象服务中心)和王辉源在本文数据来源的帮助,白红英教授在论文写作中的帮助以及张扬在软件应用过程中的帮助。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [3] 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.
- [4] Donat M G, Alexander L V, Yang H, et al. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(7):997-1006.
- [5] Moberg A, Jones P D. Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe, 1901-99[J]. International Journal of Climatology, 2005,25(9):1149-1171.
- [6] Griffiths M L, Bradley R S. Variations of twentieth-century temperature and precipitation extreme indicators in the northeast United States[J]. Journal of Climate, 2007,20(21):5401-5417.
- [7] Rosenberg E A, Keys P W, Booth D B, et al. Precipitation extremes and the impacts of climate change on stormwater infrastructure in Washington State[J]. Climatic Change, 2010,102(1/2):319-349.
- [8] Tan X, Gan T Y, Shao D. Effects of persistence and large-scale climate anomalies on trends and change points in extreme precipitation of Canada[J]. Journal of Hydrology, 2017,550:453-465.
- [9] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,2003,58(9):1-10.
- [10] 翟盘茂,王志伟,邹旭凯.全国及主要流域极端气候事件变化[M].北京:气象出版社,2007.
- [11] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等.中国年极端降水事件的时空分布特征[J].气候与环境研究,2008,13(1):75-83.
- [12] 陈海山,范苏丹,张新华.中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J].大气科学学报,2009,32(6):744-751.
- [13] 宁亮,钱永甫.中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析[J].高原气象,2008,27(5):1010-1020.
- [14] 陆虹,何慧,陈思蓉.华南地区 1961—2008 年夏季极端降水频次的时空变化[J].生态学杂志,2010,29(6):1213-1220.
- [15] 王冀,江志红,严明良,等.1960—2005 年长江中下游极端降水指数变化特征分析[J].气象科学,2008,28(4):384-388.
- [16] 王志福,钱永甫.中国极端降水事件的频数和强度特征[J].水科学进展,2009,20(1):1-9.
- [17] 张文,寿绍文,杨金虎,等.近 45 a 来中国西北汛期降水极值的变化分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(12):126-132.
- [18] 刘琳.基于集合预报的中国极端强降水预报方法研究[D].成都:成都信息工程学院,2013.
- [19] 杨勇,杜军,罗骝翔,等.近 40 a 西藏怒江流域极端降水事件的时空变化[J].干旱区研究,2013,30(2):315-321.
- [20] 贾文雄,张禹舜,李宗省.近 50 年来祁连山及河西走廊地区极端降水的时空变化研究[J].地理科学,2014,34(8):1002-1009.
- [21] 李双双,杨赛宽,刘宪锋.1960—2013 年秦岭—淮南北极降水时空变化特征及其影响因素[J].地理科学进展,2015,34(3):354-363.
- [22] 李菲.1962—2011 年秦岭南北极降水事件的时空变化特征及原因分析[D].兰州:西北师范大学,2014.
- [23] 邓晨晖.气候变化背景下秦岭山地物候时空变化及其响应[D].西安:西北大学,2018.
- [24] 黄晓月.秦岭太白红杉 NDVI 与遥感物候对气候变化的响应[D].西安:西北大学,2018.
- [25] 蒋冲,王飞,喻小勇,等.秦岭南北近地面水汽时空变化特征[J].生态学报,2013,33(12):3805-3815.
- [26] 周旗,卞娟娟,郑景云.秦岭南北 1951—2009 年的气温与热量资源变化[J].地理学报,2011,66(9):1211-1218.
- [27] 胡宜昌,董文杰,何勇.21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J].地球科学进展,2007,22(10):1066-1075.
- [28] 侯威.极端事件检测、评价方法及中国近 40 年极端温度和降水事件时空变化研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [29] 张雷.东亚地区城市化对极端气温变化的影响[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [30] 刘荣娟.气候变化背景下秦岭太白红杉的时空响应[D].西安:西北大学,2016.
- [31] 翟丹平.秦岭山地气温直减率时空差异及气温变化趋势[D].西安:西北大学,2017.



大小排序一致为:荆条>胡枝子>三裂绣线菊,反映出荆条枯落物吸水量在同一时间高于其他灌木林分,枯落物持水量与浸水时间具有较好的对数关系,表达式为: $Q=a\ln t+b$  ( $R^2>0.97$ ),持水速率与浸水时间具有较好的幂函数关系,表达式为: $V=Kt^n$  ( $R^2>0.99$ )。

(2) 3 种灌木林分土壤有效持水量、土壤毛管持水量与饱和持水量最大的均为荆条灌木林,反映出土壤层水源涵养能力最强的为荆条灌木林分。

(3) 3 种灌木林分初渗速率大小排序为:荆条>三裂绣线菊>胡枝子,稳渗速率大小排序为:荆条>三裂绣线菊>胡枝子;林分土壤入渗时间和入渗速率有较好的函数关系,表达式为: $y=a \cdot x^b$  ( $R^2>0.94$ )。

参考文献:

[1] 喻阳华,李光容,皮发剑,等.赤水河上游主要森林类型水源涵养功能评价[J].水土保持学报,2015,29(2):150-156.

[2] 田超,杨新兵,李军,等.冀北山地阴坡枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2011,25(2):97-103.

[3] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砭砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J].水土保持学报,2017,31(3):118-122.

[4] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京松山 5 种天然纯林枯落物及土壤水文效应研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2013,34(3):65-70.

[5] 赵雨森,韩春华,张宏光,等.阿什河上游小流域主要林

分类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2012,26(2):201-208.

[6] 吴强,楚聪颖,张鹏,等.滦河上游 7 种典型林分类型水土保持功能[J].水土保持学报,2015,29(5):41-44.

[7] 赵阳,余新晓,吴海龙,等.华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2011,25(6):149-150.

[8] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京山地 7 种人工纯林枯落物及土壤水文效应[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2013,34(5):53-59.

[9] 陈波,杨新兵,赵心苗,等.冀北山地 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(2):196-202.

[10] 王先棒,贺康宁,董喆,等.北川河流域典型林型水源涵养能力评价[J].中国水土保持科学,2017,15(5):94-102.

[11] 李晨晖.大青山不同林分类型持水能力的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[12] 吴迪,辛学兵,赵明扬,等.北京九龙山不同林分枯落物及土壤水文效应[J].林业科学研究,2014,27(3):417-422.

[13] 陈治成,宋维峰,魏峥,等.元阳梯田水源区优势树种枯落物水文特性[J].水土保持研究,2017,24(1):135-139.

[14] 梁晓娇,王树力.阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J].水土保持学报,2017,31(1):140-145,152.

[15] 张伟,杨新兵,张汝松,等.冀北山地不同林分枯落物及土壤的水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2011,31(3):208-212,238.



(上接第 178 页)

[32] 李玮,段利民,刘廷玺,等.1961—2015 年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析[J].资源科学,2017,39(11):2153-2165.

[33] 李如意,赵景波.毛乌素沙地 1960—2013 年极端气温变化[J].中国沙漠,2016,36(2):483-490.

[34] 李芬,张建新,郝智文,等.山西降水与 ENSO 的相关性研究[J].地理学报,2015,70(3):420-430.

[35] Zhang Q, Wang Y, Singh Vijay P, et al. Impacts of ENSO and ENSO Modoki+A regimes on seasonal precipitation variations and possible underlying causes in the Huai River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2016,533:308-319.

[36] 王家龙.日地系统学中的太阳活动研究( I ):日地系统物理学中缓变型太阳活动的研究[J].地球物理学进展,1994,9(3):1-11.

[37] 吴梦初,延军平.太阳活动与 ENSO 事件对云南省旱涝灾害的影响[J].水土保持通报,2014,34(4):280-284.

[38] 王腾,延军平,张涛涛,等.太阳活动与 ENSO 事件对汉江谷地旱涝灾害影响分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(7):107-112.

[39] 马露,杨东,钱大文. ENSO 事件对山东省区域降水量及干旱指数的影响[J].中国农业气象,2015,36(6):666-673.

[40] 李晓燕,翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究[J].气象学报,2000,58(1):102-109.

[41] Miao J, Wang T, Wang H, et al. Influence of low-frequency solar forcing on the East Asian winter monsoon based on HadCM3 and observations[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2018,35(9):1205-1215.

[42] 胡邦琦.中国东部陆架海泥质沉积区的物源识别及其环境记录[D].山东青岛:中国海洋大学,2010.

[43] Caesar L, Rahmstorf S, Robinson A, et al. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation[J]. Nature, 2018,556(7700):191-196.

[44] 朱玉祥.青藏高原冬春积雪对我国夏季降水分布的影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2007.