

陕西省近 50 年来降水量时空变化特征分析

刘政鸿

(陕西省水土保持生态环境监测中心, 西安 710004)

摘要: 研究使用陕西省以及临近陕西省近 50 a 来的 39 个站点年降水数据, 运用 Mann-Kendall 非参数检验法、累积距平法和 GIS 插值, 分析了近 50 a 陕西省的降水变化趋势和降水时空分布及变化特征。结果表明: 1) 近 50 a 来陕西省降水量存在明显的波动变化, 呈现“增加—减少—增多—减少—增多”的波段形态。从总体趋势看, 降水序列是呈现减少趋势, 减少的速率是 14.59 mm/10 a。2) 在近 50 a, 陕西省降水量在 1967 年和 1985 年出现两次突变, 出现了两个峰值。3) 陕西省降水量分布及变化和降水等值线分布存在明显的纬向区域差异, 降水总体出现北少南多的规律; 陕北比较稀疏, 而陕南以及关中比较密集。4) 受到季风和地形的共同影响, 陕西省的降水也存在经向差异, 陕北降水量呈东多西少, 关中和陕南呈现西多东少的分布格局。

关键词: 陕西; Mann-Kendall; 累积距平; 降水等值线; 时空变化

中图分类号: S161.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)02-0107-06

Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics of Precipitation in the Past Five Decades in Shaanxi Province

LIU Zhenghong

(Monitoring Center for Soil and Water Conservation and Eco-Environment of Shaanxi Province, Xi'an 710004, China)

Abstract: This study used annual precipitation data collected from 39 sites in recent 50 years in neighboring Shaanxi Province and Shaanxi Province to analyze the precipitation change trend and its spatiotemporal distribution and variation characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years using the Mann-Kendall nonparametric tests, the cumulative departure method and GIS interpolation. The results showed that: 1) with respect to precipitation in the recent 50 years of Shaanxi, it had obvious fluctuation, and it presented ‘increase—decrease—increase—decrease—increase’ band form, as with the overall trend, the precipitation sequence presented a decreasing trend, and the fitting reduction rate of precipitation was 14.59 mm/10 a; 2) in recent 50 years, precipitation in Shaanxi appeared two peaks in 1967 and 1985, respectively; 3) the distribution and variation of precipitation and precipitation isoline in Shaanxi existed obvious differentiation from the north to the south; less precipitation occurred in the north and more in the south, in northern Shaanxi, the precipitation isoline was sparse and dense in southern Shaanxi and Guanzhong; 4) due to the mutual influence of the monsoon and terrain, the precipitation also is different in the longitude direction in Shaanxi Province, in northern Shaanxi, the precipitation is more in the east of Shaanxi and less in the west; in Guanzhong and southern Shaanxi, it is more in the west and less in the east.

Keywords: Shaanxi; Mann-Kendall; accumulative anomaly; precipitation isoline; spatiotemporal change

随着全球气温不断的升高, 大多数副热带地区降水逐渐减少^[1]。受全球气候变化的影响, 我国西北地区 20 世纪 80 年代以来降水明显增多, 东部地区则由 20 世纪 70 年代末以前的北涝南旱型转变为了南涝北旱型, 对农业生产、社会经济和可持续发展产生深远影响^[2-5]。

随着近百年来全球气候的显著变化, 引起了降水格局分布的变化, 许多学者对其进行了深入研究。施雅风等提出, 我国西北气候可能从 20 世纪的暖干向暖湿转型, 但同时也强调陕西 20 世纪 90 年代仍处于干旱的低降水期, 属于气候未转型区^[6]。陕西省位西北干旱半干旱区, 陕南和关中位于秦岭南北两侧并且

处于季风边缘区,陕西省整体受西南季风和东南季风的共同影响,对该区进行全球变化的研究具有典型性。许多学者对陕西省的降水及时空特征进行了研究^[7-20],但多以较短时段的降水趋势、空间分布和季节性变化特征的研究为主,对于年代间的时空分布的变化研究较少。本文以陕西省 36 个气象站点以及与陕西省相邻近的 3 个气象站点的年尺度降水为基础,采用 Mann-Kendall 非参数检验法、累积距平法和 GIS 插值等方法对陕西省近 50 来降水变化趋势、年代的时空变化以及变化量进行了研究,为科学的认识陕西省的气候变化规律提供参考依据。

1 研究区概况

陕西省位于中国西北部的东南端,地处东经 105°29′—111°15′和北纬 31°42′—39°35′。全省纵跨黄河、长江两大流域,与山西、河南、湖北、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、重庆 8 个省市接壤;陕西省海拔介于 168.6 m 到 3 771.2 m 之间,平均海拔 1 127 m,地势总体南北高、中部低,由西向东倾斜的特点也较明显。以北山和秦岭为界,把陕西分为三大自然区域:北部是陕北黄土高原,中部是关中平原,南部是秦巴山地。境内气候差异较大,由北向南依次为温带、暖温带和北亚热带。多年平均降水量 578.56 mm,多年平均气温 13℃。

2 数据和方法

2.1 站点选择与数据来源

根据研究区内气象站点分布,选用陕西省 10 市 13 县资料较完整的 36 个站点及山西的河曲、永济和吉县 3 个相邻气象站 1961—2010 年的年尺度降水量资料,以保证空间布点的均匀性和省界附近等值线的正确延伸。对于数据缺失的站点及年份采用反距离权重(IDW)插值的方式进行延展。上述资料从中国气象科学数据共享服务网获取。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 检验 用 Mann-Kendall 非参数趋势检验法检测要素序列变化趋势。该统计检验方法的优点是统计测试的样本不需要服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于非正态分布的水文气象等数据。在 Mann-Kendall 检验中,原假设 H_0 为时间序列数据 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 是 n 个独立的,随机分布的样本;对于所有的 $k, j \leq n$ 且 $k \neq j$, x_k 和 x_j 的分布式是不相同的,检验的统计变量 S 计算公式如下:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

S 为正态分布,其均值点为 0, $\operatorname{var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 当 $n > 10$ 时,标准的正态统计变量通过

$$\text{下式计算: } Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

这样,在给定的置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设是不可接受的,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计变量 Z 大于 0 时,样本是上升趋势;而小于 0 时,样本则是下降趋势。

2.2.2 距平及累计距平法 据研究发现累积距平法是由曲线直观判断离散数据点变化趋势的一种非线性统计方法^[21],能够更简单直观的观察出两个突变的年份。因此,在此次降水有序数据系列存在趋势性变化的前提下,采用累计距平法检验其跃变时间。距平是表示气候变量偏离正常情况最常用的量,一组数据的某一个数 x_i 与均值 \bar{x} 之间的差就是该数据的距平值,即 $x_i - \bar{x}$, 气候变量的一组数据 x_1, x_2, \dots, x_n 与其均值的差就构成了距平序列 $x_1 - \bar{x}, x_2 - \bar{x}, \dots, x_i - \bar{x}$ 。在气候变化分析中,常用距平序列代替气候变量本身的观测数据,任何气候变量序列,经过距平处理,都可化为平均值为 0 的数据序列,这样的处理给分析带来了便利,也使计算结果更加直观。

对于某一序列 x 其某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$\hat{X}_t = \sum_{i=1}^t (X_i - \bar{X}) \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 将 n 个时刻的累积距平值全部算出后,即可绘制累积距平曲线进行该序列要素的趋势分析。累积距平曲线较直观,根据曲线明显的上下起伏,可以判断序列要素长期显著的变化趋势及持续性变化,同时也还可以判断出发生突变的大致时间^[22]。

3 结果与分析

3.1 降水量的年际和年代变化

根据所选气象站点分布以及各站点年降水值,结合各种插值方法的适用性^[23],在 ArcGIS 10.0 中,借助确定性插值中局部插值的反距离权重插值法(IDW)插值工具,插值得到陕西省面状降水数据,统计得到陕西省平均降水量,陕西省每年平均降水量变

化如图 1 所示。根据公式(1—3),Mann-Kendall 非参数趋势检验法检测陕西省降水序列变化趋势,借助 Matlab 执行 Mann—Kendall 趋势分析方法,陕西省研究时段降水的变化趋势。

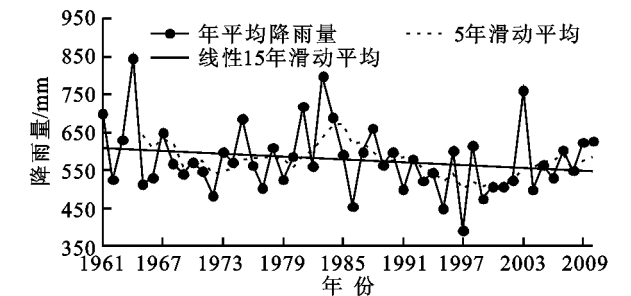


图 1 陕西省 1961—2010 年降水量变化

从图 1 可以看出,1961—2010 年陕西省年降水量存在明显的波动变化,呈现“增加—减少—增加—减少—增加”的波动形态。在 Mann-Kendall 趋势检验中, $Z=-0.82$,绝对值小于 1.96,表明陕西省在近 50 a 的降水呈现出并不显著的总体下降的趋势。同时,对年平均降水量序列进行线性拟合分析,没有通过显著性检验,因此采用年平均降水的 5 a 滑动平均曲线

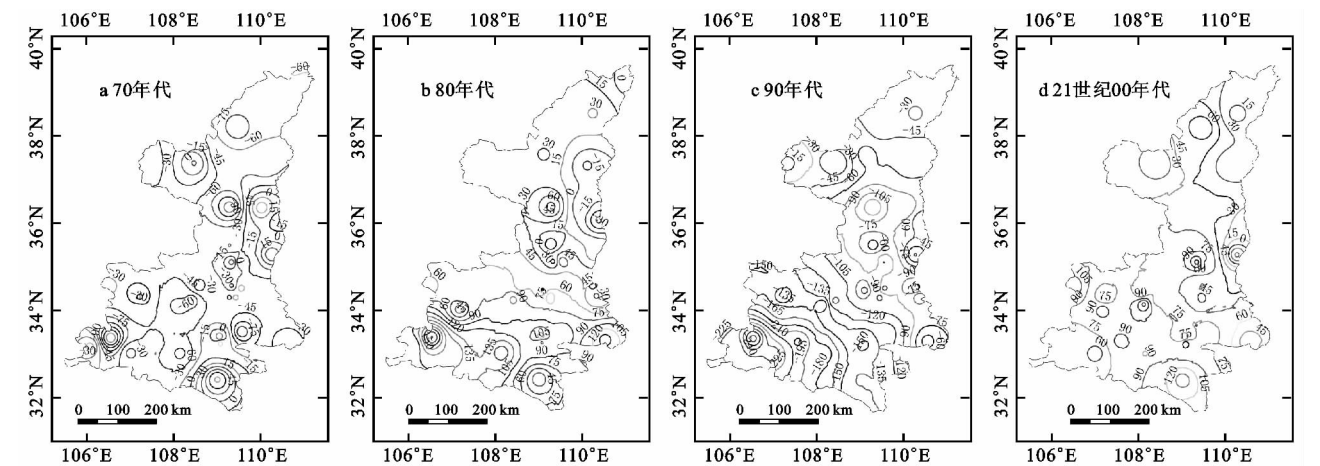


图 2 不同年代陕西降水量变化等值线

从图 2a 中 70 年代降水变化等值线图中可以看出,陕西省在 70 年代的降水比 60 年代有大面积的减少,只有在安康附近出现增加,留坝、延安减少的最多。图 2b 中 80 年代的降水与 70 年代比较,呈现上升趋势,且表现为大面积的降水增加,其中留坝增加最明显,增加 200 mm。与 80 年代相比,在图 2c 中,90 年代降水又出现了下降,在陕南以及关中下降很多,其中留坝下降的最明显可达 270 mm。图 2d 进入 21 世纪,降水出现回升,大面积的降水呈现上升趋势。

3.2 年降水量突变分析

通过对陕西省年平均降水序列进行 M-K 突变点检验,发现结果并不理想,如图 3 所示,在 0.05 的置信水平下 UB(K)与 UF(K)存在 12 个交点,并不能直观得到降水发生突变的年份。根据公式(4),使用

进行线性拟合。陕西省年平均降水量 5 a 滑动平均拟合的一次线性方程相关系数为 0.174,并且通过了 0.01 的显著性检验,结果可信。拟合的线性结果显示,研究区在研究时段内降水量总体趋势与时间轴接近平行,略有减少,拟合结果表明每年减少约 1.27 mm,2010 年与 1961 年降水量总体减少幅度为 72.96 mm,减少的速率是 14.59 mm/10 a。从滑动平均曲线的结果可以看出:降水量在 1964 年达到第一个最高值点,为 845.22 mm;此后虽然有波动但总体出现下降,至 1972 年达到最低,为 482.91 mm;从 1973 年开始,陕西省的降水量出现上升的趋势,在 1983 年升至最高,为 797.38 mm;此后又呈现下降趋势,在 1997 年降至最低,为 390.92 mm,在进入 21 世纪,降水量出现了回升,直至 2010 年降水量达到 626.56 mm。借助 ArcGIS 10.0 的栅格计算功能得到的陕西各年代降水数据,在 ArcGIS 10.0 中使用栅格计算功能,计算不同年代陕西的降水的变化情况,并使用空间分析功能提取降水年代间变化等值线,等值线间隔为 15 mm,如图 2 所示。

累积距平的方法对陕西省的降水量进行突变分析,得到陕西省每年降水量距离平均值的分散状况,其在研究时段内发生突变的年份如图 4 所示。

1961—2010 年陕西省降水量的距平曲线,并参照近 50 a 的平均值,其分布有三种情况:陕西省降水量高于平均值的有 16 a,占研究时序的 32%,;小于平均值的有 19 a,占研究时序的 38%;十分接近平均值有 15 a,占研究时序的 30%。由此可以看出陕西省的丰水年与枯水年出现的频次是比较接近,高降水量、低降水量以及正常降水量出现的频次表明陕西省降水变化是比较规律。

1961—2010 年陕西省降水量的累计距平曲线显示:陕西省在研究时段内出现了两次突变,第一次突变出现在 1967 年,在 1967 年以前降水量在波动中增

加,此后在 1967—1985 年,陕西省的降水在波动中整体表现为更大速率的增加,在 1985 年增加至最大,成为第二个突变点,从 1985 年以后,陕西省的降水出现下降的趋势。

3.3 降水量的空间变化分析

将插值得到的陕西省各年降水数据借助 ArcGIS 10.0 的栅格计算功能,计算每 10 a 陕西省的平均降水量,并使用空间分析功能提取各年代降水的等值线,等值线间隔为 30 m,如图 5 所示。

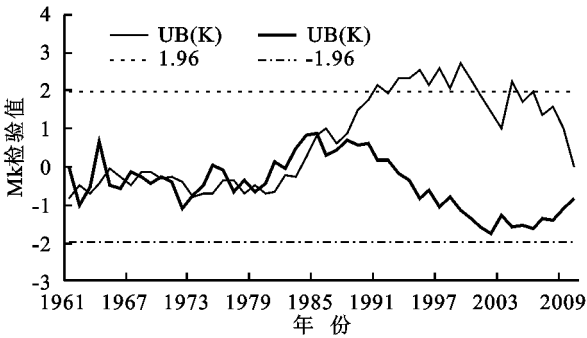


图 3 降水量的 Mann-Kendall 突变分析

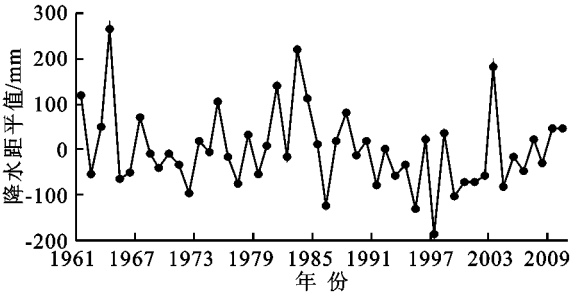
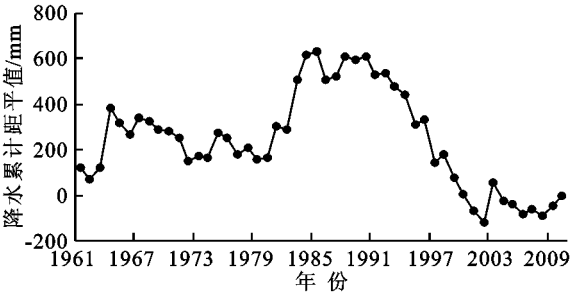


图 4 陕西省降水量序列的距平和累计距平曲线

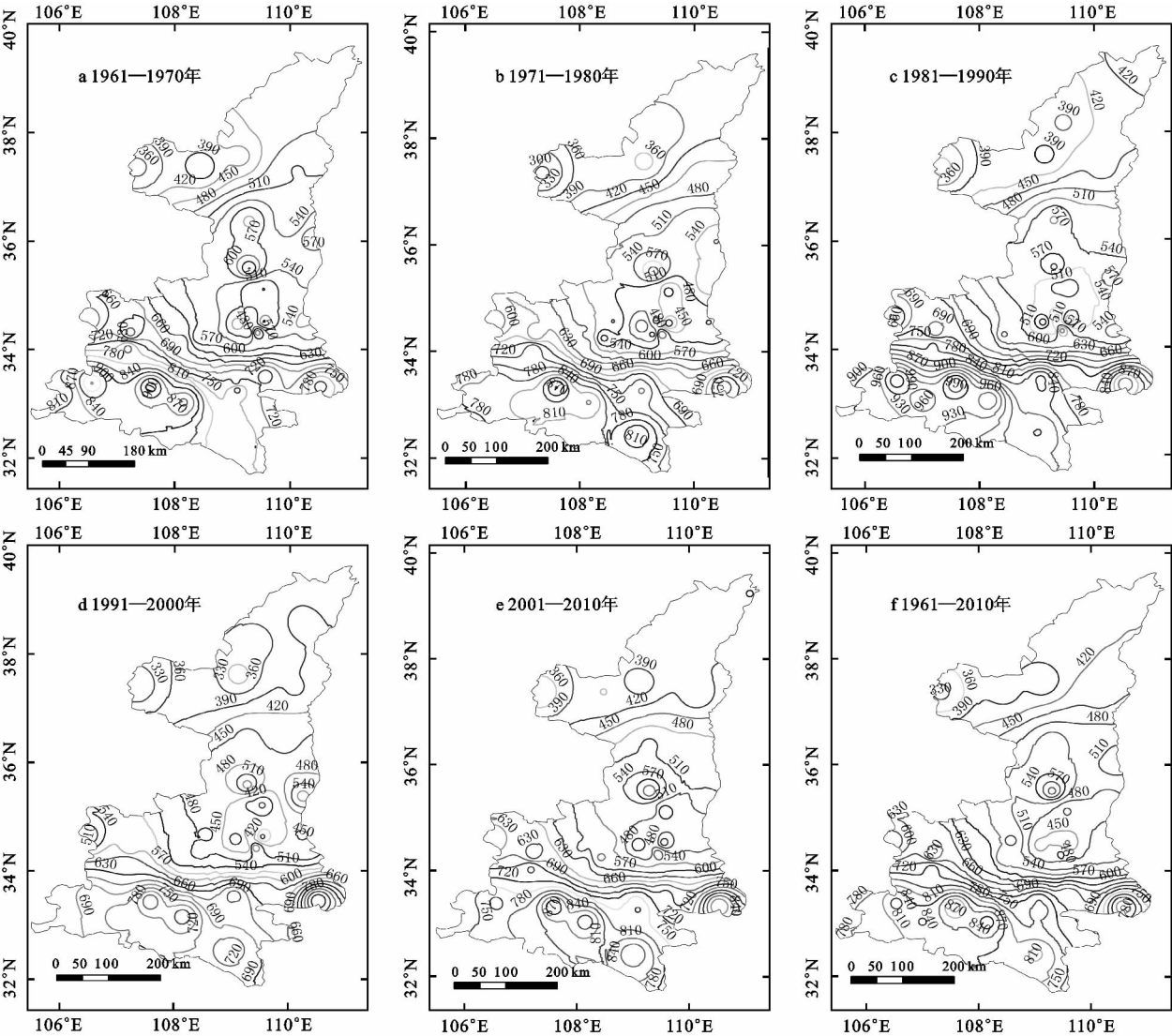


图 5 不同年代陕西省降水量等值线

从50 a的平均降水量来看(图5f),陕西省降水量分布不均匀,南多北少,差异较大。全省降水量50 a平均值578.56 mm;陕北降水量等值线分布稀疏,其50 a降水量平均值为441.16 mm;关中50 a降水量年平均值为571 mm;但在陕南,降水量等值线分布密集,其50 a降水量平均值达到755.26 mm,这种结果与张艳芳的结果一致^[24]。同时,在经向分布上陕北降水量呈东多西少的分布状况,关中和陕南呈现西南多东部少的分布状况。从50 a的平均降水等值线图5—f中可以看出陕北的定边(330 mm)和绥德(450 mm)两站差异可达120 mm,关中的陇县(600 mm)和蒲城(450 mm)两站差异可达150 mm,陕南的佛坪(930 mm)和镇安(780 mm)两站差异可达150 mm。综合南北(纬向)变化和东西(经向)变化规律,陕南和关中呈现从西南向东北逐渐较少的变化趋势,陕北呈现东南向西北逐渐减少的趋势。

从各个年代的平均降水量来看,如图5a,b,c,d,e所示,陕西省在60年代的平均降水为606.66 mm,70年代降水分布等值线与60年代降水分布等值线的疏密程度及变化情况接近,但同一地区在60年代和70年代的降水量有差异,差异的分布范围为30~70 mm,同一地区60年代的降水量比其70年代的降水量平均高40 mm。70年代的经向差异可达180 mm。80年代的降水等值线比70年代的降水等值线有所增密,在陕北增密的程度不很明显,但在关中以及陕南降水等值线是明显增密的。陕西省的降水在80年代有所增加,从70年代的566.73 mm增加至80年代的623.32 mm,80年代降水的经向差异达到150 mm。到90年代,降水又呈现下降趋势,降水平均值从80年代的623.32 mm降至90年代的517.9 mm,并且降水等值线在全省都较80年代有一定程度的变疏,90年代降水的经向差异有一定程度的增大,为170 mm。至21世纪初,降水等值线与90年代相比,又有不同程度的增密,降水量在此时期也有所回升,降水量平均值达到578 mm,此时期降水的经向差异为120 mm。

4 讨论及结论

4.1 讨论

1) 陕西省根据其地貌类型的不同,可以分为三部分:陕北黄土高原、关中平原、陕南秦巴山地。陕南和关中位于秦岭南北两侧并且处于季风边缘区,陕西省整体受西南季风和东南季风的共同影响。有文献表明气候增暖期东南季风表现为减弱,而南亚季风的活动将会增加^[25]。张启东、秦大河等^[26]对印度夏季

风降水研究发展一文中提到,20世纪中期到60年代是南亚季风比较强盛的阶段,60年代到80年代中期表现为弱季风阶段,80年代中期到现在表现为强季风阶段。陕西省降水出现的“增加—减少—增加—减少—增加”波动和总体减少趋势,正是东南季风和西南季风变化趋势的组合结果。

2) 陕西降水空间分布受到季风和地形的共同影响,空间变化比较复杂。降水空间分布总体趋势呈现南多北少与南部受到季风影响更为强烈密切相关。由于受到秦岭的阻挡,陕北地区难以受到西南季风的影响,东南季风成为主导影响因素,降水量在经向分布上呈东多西少(东南多,西北少)的格局;陕北地区是西北高东南低的地势,因接近季风区西北界的位置,非但没有增加降水,反而增加了东南季风爬升难度,降水逐渐减少。关中和陕南总体呈现西南多东部少的分布状况,其成因可能有所不同。在关中地区,西南季风翻过秦岭,影响减弱,东南季风向西北移动时,受到关中西部陇山的抬升作用,降水有所增加,呈现出西多东少的空间格局。在陕南同时受东南季风与西南季风的作用,在大巴山西部西南季风与东南季风共同影响(西南季风较强),加上陕南西部受到青藏高原季风的一定影响,降水也有所增加,因此呈现出西南多东部少的地域空间变化特征。

4.2 结论

1) 从近50 a来陕西省降水量存在明显的波动变化,呈现“减少—增多—减少—增多”的波段形态。但从近50 a来陕西省降水量的总体趋势看,降水呈现减少趋势,陕西省年降水量的5 a滑动平均拟合结果表明每年减少约1.27 mm,降水量总体减少72.96 mm,减少的速率14.59 mm/10 a。这与我国年降水量减少的总体趋势一致。

2) 在1961—2010的50 a间,陕西省降水量出现两次突变,在1967年降水量达到相对最大值,1985年达到近50 a陕西省降水量的最大值。

3) 陕西省的降水量分布及变化存在明显的区域差异,以秦岭为界,陕西省的降水出现北少南多的情况;并且降水等值线也以秦岭为界,陕北比较稀疏,而陕南以及关中比较密集。

4) 受到季风和地形的共同影响,陕西省的降水也存在经差异,在经向分布上陕北降水量呈东多西少的分布格局,关中和陕南呈现西多东部少的区域差异。

参考文献:

- [1] Lemke P, Ren R B, Alley I. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change[R]. Cambridge, Climate Change 2007, 2007.
- [2] Ding Y, Ren G, Zhao Z, et al. Detection, causes and projection of climate change over China: an overview of recent progress[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(6): 954-971.
- [3] Kennedy D. Breakthrough of the year[J]. *Science*, 2002, 298(5602): 2283-2283.
- [4] 蓝永超, 丁永建, 沈永平, 等. 气候变化对黄河上游水资源系统影响的研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2005(3): 122-125.
- [5] 马明敏, 姜晓艳, 刘树华, 等. 近 47 年城市化发展对沈阳区域局地气候的影响研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(1): 108-114.
- [6] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.
- [7] 姜创业, 蔡新玲, 吴素良, 等. 1961—2009 年陕西省极端强降水事件的时空演变[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 151-157.
- [8] 岳大鹏, 李奎, 张肖南, 等. 关中地区近 50 年来降水量变化的特征分析[J]. *陕西农业科学*, 2014, 60(2): 49-52.
- [9] 蔡新玲, 乔秋文, 王繁强, 等. 近 45 年来陕西省可利用的降水资源特征及变化[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(2): 282-287.
- [10] 刘闻, 曹明明, 宋进喜, 等. 陕西年降水量变化特征及周期分析[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(5): 865-874.
- [11] 王秀琴, 杨文峰. 陕西省降水分型及正态性分析[J]. *陕西气象*, 1995(4): 29-30.
- [12] 卫旭东, 刘引鸽, 缪启龙. 陕西省降水量变化及其影响分析[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(4): 40-43.
- [13] 宋进喜, 宋令勇, 惠泱河, 等. 陕西省降水时空变化特征及资源化研究[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2009(5): 575-581.
- [14] 陶林威, 马洪. 陕西省降水特性分析[J]. *陕西气象*, 2000(5): 6-9.
- [15] 陈颢, 任志远, 郭斌. 陕西省近 10 年来水资源足迹动态变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(3): 43-48.
- [16] 万相均, 任志远, 张翀. 陕西省气温与降水变化时空分布研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(6): 140-147.
- [17] 李丽娜, 杨联安. 陕西省近年来的降水变化特征[J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(6): 120-122.
- [18] 杜佳, 宋令勇, 何兴军. 陕西省降水时空分布与变化特征分析[J]. *地下水*, 2012(6): 128-131.
- [19] 路培, 吴发启. 陕西省近 30 年降水变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 64-68.
- [20] 张秀娟, 陈晓光, 王尧, 等. 西北四省区降水的时空变化特征分析[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(18): 9809-9812.
- [21] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 388-397.
- [22] 刘昌明, 郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 129-135.
- [23] 刘光孟, 汪云甲, 张海荣, 等. 空间分析中几种插值方法的比较研究[J]. *地理信息世界*, 2011(3): 41-45.
- [24] 何艳芬, 张晓. 陕西省 1980—2006 年气候变化时空特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(11): 59-63.
- [25] 符淙斌, 王强. 南亚季风长期变化中的突变现象及其与全球迅速增温的同步性[J]. *中国科学: B 辑*, 1991(6): 666-673.
- [26] 张启东, 秦大河, 康世昌. 印度夏季风降水研究进展[J]. *自然杂志*, 2000, 22(4): 207-210.

~~~~~

(上接第 106 页)

- [14] 王辉, 胥国盛, 毕晓丽, 等. 基于 MODIS 的泾河流域植被动态年际变化[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 850-856.
- [15] Wang W, Liang S. Estimation of high-spatial resolution clear-sky longwave downward and net radiation over land surfaces from MODIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(4): 745-754.
- [16] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85-100.
- [17] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸发散总量[J]. *环境遥感*, 1991, 6(4): 253-259.
- [18] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究[J]. *地理学报*, 2001, 56(3): 261-268.
- [19] Kristensen K J, Jensen S E. A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration[J]. *Nordic Hydrology*, 1975, 6(3): 170-188.
- [20] 王鸣程, 杨胜天, 董国涛, 等. 基于条件温度植被指数 (VTCD) 的中国北方地区土壤水分估算[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 446-455.
- [21] 杨小利, 王丽娜. 泾河上游典型站近 45 年参考作物蒸散量变化特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 30(6): 238-242.
- [22] 张淑兰, 于澎涛, 张海军, 等. 气候变化对于干旱缺水地区中尺度流域水文过程的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(10): 70-74.
- [23] 易永红, 杨大文, 刘钰, 等. 区域蒸散发遥感模型研究的进展[J]. *水利学报*, 2008, 39(9): 1118-1124.