

# 基于传统干湿指数的省域长历时气象干旱变化特征及其对旱作粮食单产的影响

孔令颖<sup>1</sup>, 扶松林<sup>1</sup>, 韩晓阳<sup>2</sup>, 刘文兆<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部  
水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**干旱是陕西省主要的气象灾害之一, 干旱频发对农业生产、社会经济发展和生态环境等诸多方面均造成了严重影响。通过选取陕西省 22 个气象站点 1960—2017 年逐日地面气象数据, 基于传统的潜在蒸散与降水量之比构成的干湿指数, 由 FAO56-PM 潜在蒸散量对干旱指标进行重新界定, 从长时序上分析了陕西省气象干旱的时空变化特征。结果表明: (1) 由 FAO56-PM 公式重新界定的湿润、半湿润、半干旱、干旱、干燥气候分区界限值分别为 0.58, 1.17, 1.77, 2.36, 4.74, 全省大多数地区年干燥度呈增加趋势, 主要集中在陕北南部与关中地区; (2) 全省各站点多年平均年干燥度整体呈由北向南逐渐减小分布, 干湿气候界线年代际波动较明显; (3) 全省多年干旱发生频率整体呈增加趋势, 分布情况为从陕北向关中先逐渐减小后又略微增大, 再从关向陕南又逐渐减小。春、秋、冬季干旱频率都为增加趋势, 夏季为减少趋势; (4) 省内北部干旱程度大于南部, 不早年数从陕南向陕北依次减少, 微旱多发于陕南地区, 中旱为关中地区, 大旱为陕北地区, 微旱和中旱多发于夏季, 大旱主要发生于冬季与春季; (5) 以旱作为主的陕北地区干燥度与降水量对单位面积粮食产量的影响较为显著。

**关键词:**气候变化; 气象干旱; 干燥度; 陕西省; 粮食产量

中图分类号: S162.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)03-0159-09

## Spatiotemporal Variation of Long-term Meteorological Drought and Its Impacts on Grain Yield in Shaanxi Province Based on the Traditional Arid-Wet Index

KONG Lingying<sup>1</sup>, FU Songlin<sup>1</sup>, HAN Xiaoyang<sup>2</sup>, LIU Wenzhao<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Drought is one of the major meteorological disasters in the Shaanxi Province. Frequent drought has a serious impact on agricultural production, social and economic development, ecological environment and other aspects. Based on the daily meteorological data of 22 selected weather stations in the Shaanxi Province during 1960—2017, using the traditional aridity index as the meteorological drought index, we redefined the aridity threshold via potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) calculated by the FAO56-Penman-Monteith equation, and analyzed the spatiotemporal variation of long-term meteorological drought in Shaanxi Province. The results are as follows. First, the climate boundaries between the humid, semi-humid, semi-arid, arid and dry, redefined by the FAO56-PM equation, were 0.58, 1.17, 1.77, 2.36 and 4.74, respectively. The variation of annual aridity index of most stations showed the increasing trend, especially in the northern Shaanxi and Guanzhong areas. Second, the average annual aridity index of all stations in the province decreased gradually from north to south, and the inter-decadal variation of the arid-wet climate boundary was obvious. Third, the occurrence frequency of drought showed the increasing trend in the whole province. Spatially, it gradually

收稿日期: 2019-12-03

修回日期: 2020-01-09

资助项目: 国家自然科学基金(41971049); “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0501602)

第一作者: 孔令颖(1995—), 女, 山西临汾人, 硕士, 研究方向为水土资源保持与利用。E-mail: 729702479@qq.com

通信作者: 刘文兆(1960—), 男, 陕西乾县人, 博士生导师, 研究员, 主要从事流域水文生态与水土保持研究。E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

decreased then slightly increased from Shaanbei area to Guanzhong area, and then gradually decreased from Guanzhong area to Shaannan area. Seasonally, the occurrence frequency of drought increased in spring, autumn and winter, but decreased in summer. Fourth, the degree of drought in the northern area of the province was greater than that in the southern area of the province; however, the number of non-drought years decreased successively from Shaannan area to Shaanbei area. The mild drought and moderate drought mainly occurred in the southern area of the province in summer, while the severe drought occurred in the northern area of the province in winter and spring. Fifth, the influence of aridity and precipitation on grain yield in Shaanbei area was significant.

**Keywords:** climate change; meteorological drought; aridity index; Shaanxi Province; grain yield

干旱作为最严重的自然灾害之一,通常有长历时、高频率、影响范围大的特点,关系到农业生产、社会经济和生态环境等诸多方面<sup>[1-3]</sup>。在全球气候变暖的背景下,受干旱灾害影响的地区范围不断扩大,我国是干旱频发的国家,平均每年因旱灾引起的损失占总自然灾害损失的 15% 以上,受灾面积约占总受灾面积的 57% 左右<sup>[4-7]</sup>。研究表明黄土高原地区为干旱化较为显著的区域,陕西省地跨黄土高原中部,自然灾害发生频繁且种类多,其中干旱灾害为主要灾害之一,素有“十年九旱”之说,由于区域内降水时空分布不均匀,降水量不足使得水分严重亏缺,地形地貌特殊复杂等因素导致水土流失严重,从而形成干旱频发的环境<sup>[8-13]</sup>。气象干旱是其他各类干旱发生的主要原因,同时影响着气候的干湿状况,干湿区划的波动可以较直观反映出区域内干旱发生的变化情况<sup>[14-16]</sup>。干旱一直是制约农业生产发展的自然灾害之一,干旱频发常会导致粮食等作物减产,严重影响区域经济发展<sup>[17-18]</sup>。

在已有研究中,国内外学者提出了许多可以定量评估干旱状况和干湿区划的指标,目前常用的气象干旱指标有基于降水量因素关联的指标,如降水量指标、降水距平百分率、标准化降水指数(SPI)等,以及基于降水量和蒸散量两种因素的指标,如干燥度、帕尔默干旱指数(PDSI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)、综合气象干旱指数(CI)等<sup>[19-23]</sup>。近年来针对陕西省的干旱问题,韦开等<sup>[24]</sup>采用降水距平百分率分析了陕西省近 50 a 干旱变化特征,发现干旱频率由高至低依次为陕北高原、关中平原、秦巴山地。李斌等<sup>[25]</sup>采用 SPI 分析发现陕西省整体上干旱范围有扩大的趋势,干旱呈现出较明显的区域变化特征。周丹等<sup>[26]</sup>采用 SPEI 分析陕西省干旱发生的时空和强度演变特征,发现近 50 a 来陕西省干旱发生频率呈明显的增长趋势,干旱发生强度由大到小分别为关中、陕南、陕北地区。针对陕西省干旱对农作物产量的影

响也有许多研究,高茂盛等<sup>[27-28]</sup>对陕西省旱涝灾害的发生特征及早涝灾害对粮食生产造成的损失进行分析,发现近年来干旱导致粮食产量有减产的趋势;王连喜等<sup>[29]</sup>利用 SPI 指数分析了陕西省的干旱变化规律及其对玉米产量的影响,发现干旱的发生在一定程度上限制了玉米生产。对于陕西省早期的干旱问题研究,陈明荣<sup>[30]</sup>采用旬干燥度作为干旱评价指标发现 1951—1970 年近 20 a 全省各地绝大多数年份都出现不同程度的干旱,陕北与陕南相比,干旱较严重,多发生春旱,关中与陕南地区夏旱发生频率较大。石忆邵<sup>[31]</sup>采用相同指标研究 23 a 内陕西省干旱分布规律,将研究区域划分成了 11 个不同的干旱类型区。对于干湿区划的研究,陈明荣<sup>[32]</sup>也提出了以干燥度为分类指标对黄土高原及陕西省地区进行了研究,发现陕西省可分为湿润、半湿润、半干旱、干旱 4 个干湿气候区。寸待贵<sup>[33]</sup>采用相同指标对黄土高原台原阶地乾县试区进行干湿气候分析,发现其属于易旱区,农业用水主要靠自然降水。陈明荣干旱指标在早期的研究工作中被广泛认可,具有一定的代表性<sup>[34]</sup>,但所研究的时序较短。本文在此基础上,采用与陈明荣干旱研究中相同的指标,利用目前被广泛应用的 1998 年 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量,对干旱指标重新界定。以陕西省为例,从省域尺度长时序上分析气象干旱的时空变化特征及其对粮食产量的影响,对于科学地防御干旱灾害,合理调控水土资源利用,推进农业生产,做好生态建设均具有十分重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕西省位于 105°29′—111°15′E, 31°42′—39°35′N,地处我国中部内陆腹地,全省面积 20.6 万 km<sup>2</sup>,南北狭长,地貌类型多样。是东南湿润地区到西北干旱地区的气候过渡带,降水多集中在 7—9 月,占全年降水量

的50%。由气候及地形条件由南至北通常划分为陕北高原、关中平原和陕南秦巴山地3个地区,南北气候差异较大。

1.2 数据来源

本文选择1960—2017年陕西省22个气象站点数据进行研究,气象数据资料为来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)所提供的地面气候资料日值数据集,气象要素包括各气象站点逐日降水量(mm)、平均气温(℃)、最高气温(℃)、最低气温(℃)、日照时数(h)、风速(m/s)和平均相对湿度(%)等。对个别台站的缺测数据采用插补处理后22个气象站点数据较完整,站点空间分布尺度较均匀,其中8个站点位于陕北地区,关中与陕南地区均为7个。进行季节性分析时,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,1月、2月和上一年的12月为冬季。粮食产量数据来源于陕西省各区县经济统计年鉴。研究区内气象站点分布如图1所示。

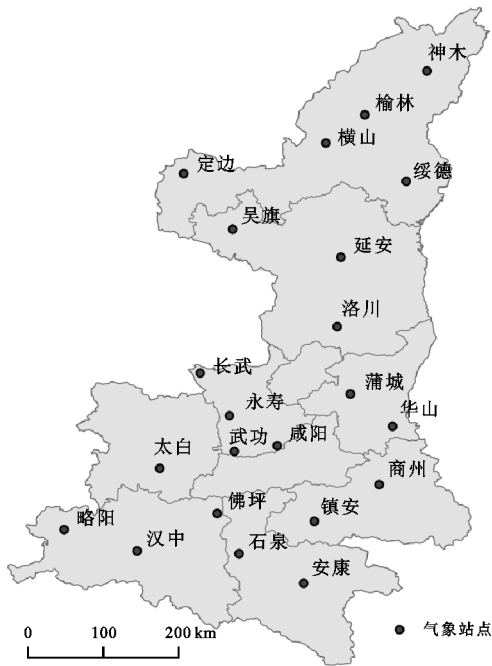


图1 陕西省各气象站点分布

1.3 研究方法

1.3.1 潜在蒸散计算 本文分别利用陈明荣潜在蒸散计算公式和联合国粮食农业组织(FAO)推荐的FAO56-Penman-Monteith公式计算陕西省22个气象站点的潜在蒸散量。

(1) 陈明荣潜在蒸散。陈明荣潜在蒸散是一种基于气压、气温和日照的计算方法<sup>[32]</sup>。

$E_a = n p_r k [0.74 + 0.25(2.0 + t)(0.01 + s)]$  (1)  
式中: $E_a$ 为月潜在蒸散(mm); $n$ 为月的天数; $k$ 为换算系数; $p_r$ 为相对气压; $t$ 为月平均气温(℃); $s$ 为月平均

日照百分率;其中换算系数 $k$ 根据月份变化而不同,1月、2月、11月、12月为0.7~0.75;3月、4月、9月、10月为0.85~0.90;5月、6月、7月、8月为0.90~0.95。

(2) FAO56-PM潜在蒸散量 $ET_0$ ,表达式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$
 (2)

式中: $ET_0$ 为日潜在蒸散量(mm/d); $\Delta$ 为饱和水汽压与气温曲线的斜率(kPa/℃); $R_n$ 为作物冠层表面的净辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $G$ 为土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $\gamma$ 为干湿表常数(kPa/℃); $T$ 为平均气温(℃); $u_2$ 为2 m高度处的风速(m/s); $e_s$ 和 $e_a$ 分别为饱和水汽压与实际水汽压(kPa)。

1.3.2 干燥度及干湿气候类型划分 干燥度<sup>[32]</sup>为衡量某个地区干湿气候的指标,表达式为:

$$D_a = \frac{\sum ET_0}{P}$$
 (3)

式中: $D_a$ 为干燥度; $\sum ET_0$ 为全年或某时段潜在蒸散总量; $P$ 为同期降水量。根据年干燥度 $D_a$ 大小,可划分为以下几种干湿类型,见表1。

表1 年干燥度等级划分

年干燥度	干湿类型	农作物生长状况
≤0.50	潮湿	过湿、田间必须排水
0.51~1.00	湿润	湿润状况良好
1.01~1.50	半湿润	适宜旱作
1.51~2.00	半干旱	旱作水分不足
2.01~4.0	干旱	旱作严重缺水
≥4.0	干燥	仅靠天然降水,农作物不能生长

1.3.3 干旱指标界定及干旱等级划分 陈明荣以旬干燥度为干旱指标,将干旱分成3种类型(表2),即微旱、中旱和大旱根据上述干旱指标与气象数据,可计算干旱发生频率:

$$f = \frac{m}{M}$$
 (4)

式中: $m$ 为一定时期内某干旱等级出现的旬数; $M$ 为该时期的总旬数; $f$ 为干旱频率。

表2 干旱指标

旬干燥度( $D_a$ )	干旱等级	农作物生长水分状况
连续2旬 $D_a > 1.4$	微旱	—
连续3旬 $D_a > 1.4$ (3旬中各旬 $D_a \leq 2.0$ 除外)	中旱	普遍缺水
连续3旬以上 $D_a > 1.4$ (各旬 $D_a \leq 2.0$ 除外)	大旱	严重缺水

1.3.4 其他方法 采用 Mann-Kendall(M-K)趋势

检验法分别对陕西省 22 个气象站点的干燥度年际变化趋势进行显著性检验;采用 M-K 突变检验分别判断陕北、关中、陕南地区的干燥度年际变化的突变点;利用变化趋势率对各年代际及不同季节的干旱频率变化进行趋势分析;采用 Pearson 相关系数<sup>[35]</sup>分析干燥度、降水量与单位面积粮食产量间的线性相关性。M-K 检验法是非参数统计检验方法,其特点是不要求数据服从一定的分布,是目前较常用的趋势和突变检验方法;变化趋势率通常为测站历年气候要素数据时间序列拟合直线的斜率,方法简单、物理意义清晰,应用广泛。

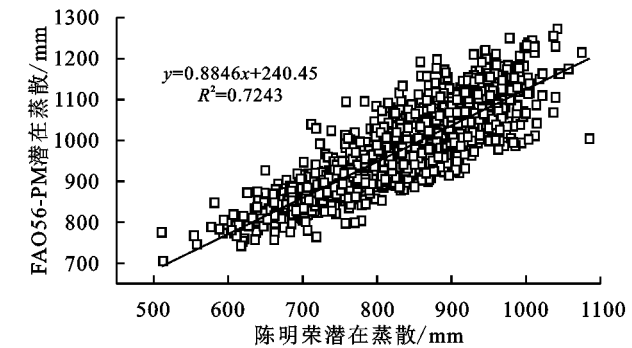


图 2 两种潜在蒸散、干燥度关系

表 3 FAO56-PM 公式计算的陕西省干湿分区界限值					
干湿分区	湿润	半湿润	半干旱	干旱	干燥
传统年干燥度界定值	0.50~1.00	1.00~1.50	1.50~2.00	2.00~4.00	
FAO56-PM 界定值	0.58~1.17	1.17~1.77	1.77~2.36	2.36~4.74	

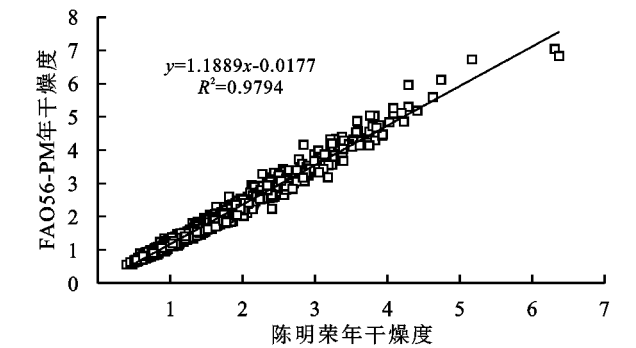
图 3 为陕西省各站点年干燥度的变化趋势,其中 M-K 趋势系数大于 0,表明年干燥度呈上升趋势,即气候类型呈干旱化,反之,则趋于湿润;当趋势系数的绝对值大于 1.64 时,表明变化趋势达到 90% 的显著水平。从趋势系数的分布情况可以看出,年干燥度呈上升趋势的站点数大于呈下降趋势的站点数。陕西省地区年干燥度呈上升趋势的站点占 68.2%,其中有 1 个站点达到了 90% 以上的显著水平,有 7 个站点呈微弱下降趋势。从年干燥度变化趋势的空间分布差异来看,湿润化站点主要集中分布在陕西南北两端,如陕北地区的神木、榆林、定边和陕南地区的石泉、佛坪、安康、商州,但并未达到显著性水平。

通过计算可得,陕西省各站点 1960—2017 年平均干燥度  $D_a$  的范围为 1.03~3.65,按照由 FAO56-PM 公式重新界定的干湿区划标准(表 3)可将其分为 4 个气候区域,即干旱、半干旱、半湿润和湿润区,多年平均年干燥度等值线见图 4,北部为干旱气候,中部为半干旱与半湿润气候,南部偏西为湿润气候。佛坪  $D_a$  是 1.03,为全省最小,定边  $D_a$  是 3.65,为全省最大。陕北地区各站点干燥度范围为 1.67~3.65,平

## 2 结果与分析

### 2.1 FAO56-PM 与陈明荣年潜在蒸散及年干燥度的关系

陈明荣潜在蒸散值与 FAO56-PM 潜在蒸散值线性关系拟合很好,决定系数  $R^2$  为 0.72,二者分别与降水量之比而得到的年干燥度,由于相同降水量的介入,而使  $R^2$  提高到 0.98(图 2)。表 3 为按照由 FAO56-PM 公式计算后重新界定的干湿区划标准,分别对应湿润、半湿润、半干旱、干旱、干燥气候区间的划分界限值。



均为 2.54;关中地区各站点干燥度为 1.18~2.24,平均为 1.68;陕南地区各站点干燥度为 1.03~1.56,平均为 1.20。

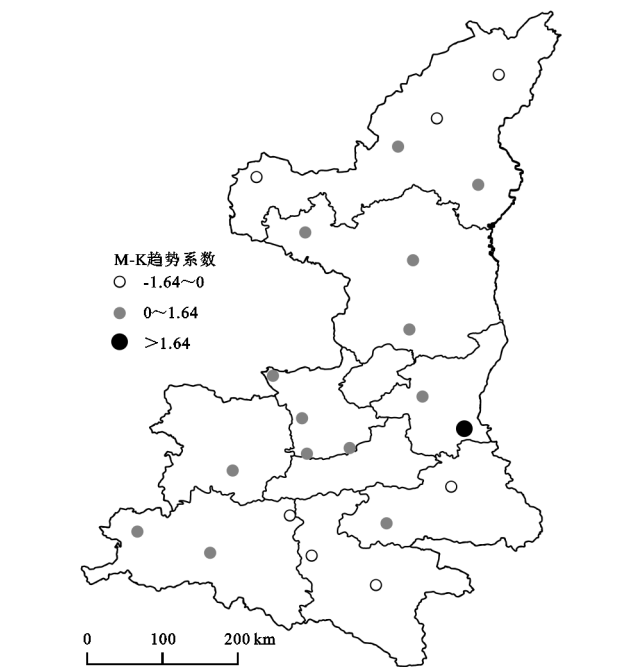


图 3 陕西省 22 个气象站点干燥度年际变化趋势

### 2.2 干湿分区的时空变化特征

图 5A,B,C 分别为由 FAO56-PM 公式计算的年干燥度 1.17,1.77,2.36 等值线在 1960—2017 年之间的 6 个不同年代际的空间分布图。由图 5 可见,1.17 等



值线在各年代际变化较为明显,1970s 相较于 1960s 向东南下移至略阳—太白—安康北部,1980s 整体向北扩展至太白—佛坪—商州—华山附近,湿润区面积达最大,1990s 分界线向南移动至汉中—佛坪—石泉以南,湿润区面积达最小,之后 2000s 和 2010 年以后又逐渐向北移动至略阳—汉中—佛坪—安康附近;1.77 等值线在 1970s 与 1960s 相比整体向南平移至永寿—武功—蒲城以南,1980s 分布在蒲城、咸阳周围,半湿润区面积达最大,1990s 明显向南移动至长武—武功—商州—华山附近,半干旱区面积达最大,2000s 向北移至永寿—咸阳—蒲城南部一带及洛川周围,2010 年以后相较于 1960s 基本重合。从分界线的分布变化及干燥度分级标准来看,陕北的南部及关中西部为半湿润气候,关中中东部地区为半干旱气候,这与陈明荣之前的研究结果基本一致<sup>[32,36]</sup>;2.36 等值线在 1970s 比 1960s 略微南移,1980s 向西北部移至神木西部,1990s 南移至延安北部一带,致干旱区面积最大,2000s 略微向北移动,2010 年以后向西北移

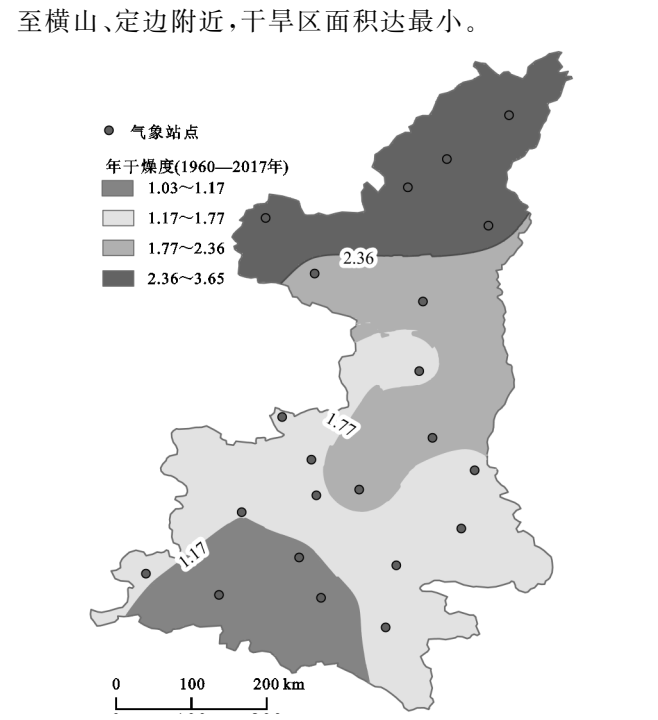


图 4 陕西省多年平均年干燥度等值线分布图

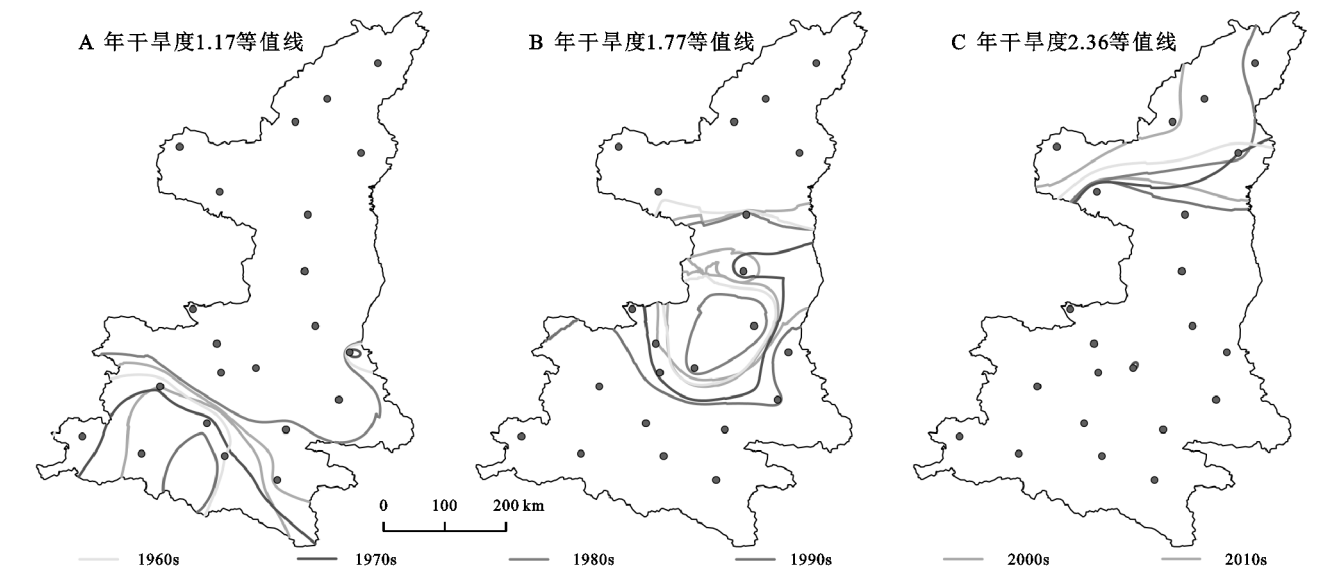


图 5 陕西省各年代际年干燥度 1.17,1.77,2.36 等值线分布

分别对陕北、关中、陕南 3 个地区干燥度年际变化进行 MK 趋势分析,发现陕北、陕南地区近 58 a 干燥度呈略微下降趋势,关中地区呈略微增加趋势;图 6 分别为 3 个地区干燥度年际变化 MK 突变检验,与滑动 T 检验结果结合分析发现 1974 年是关中地区干燥度突变点,1976 年、2011 年为陕南地区突变点,陕北地区无突变点。计算各地区各年代际干燥度值发现 1991—2000 年陕西省 3 个区域干燥度均最大,1981—1990,2011—2017 年全省干燥度都较小。

### 2.3 干旱发生频率年代际变化

陕西省从 1960—2017 年近 58 a 来干旱发生频率为 60.3%,全省各年代干旱频率线性倾向率为 0.14%/10 a

至横山、定边附近,干旱区面积达最小。

(表 4),说明陕西省内干旱频率整体上为增加趋势。从表 4 可以看出,随年代际增加,干旱频率在 1960—2000 年之间呈波动变化,2000 年之后又逐渐减小,在 1991—2000 年之间干旱频率达最大,为 63%,其次是 1971—1980 年,61.7%。陕西省春季、秋季干旱频率趋势率为正,夏季、冬季趋势率为负,表明全省春旱、秋旱发生频率有增加趋势,夏旱、冬旱发生频率有减少趋势,其中春季最大,为 1.79%;春旱频率在 2001—2010 年最大,达 74.2%,夏旱频率在 1981—1990 年之间最小,为 36.1%,冬旱频率在 1960—1970 年之间最大,达 89.9%,春、夏、冬旱频率随年代际增加呈波动变化,而秋旱频率呈先增后减的趋势,在 1991—2000 年之间达最大,为 49.9%。

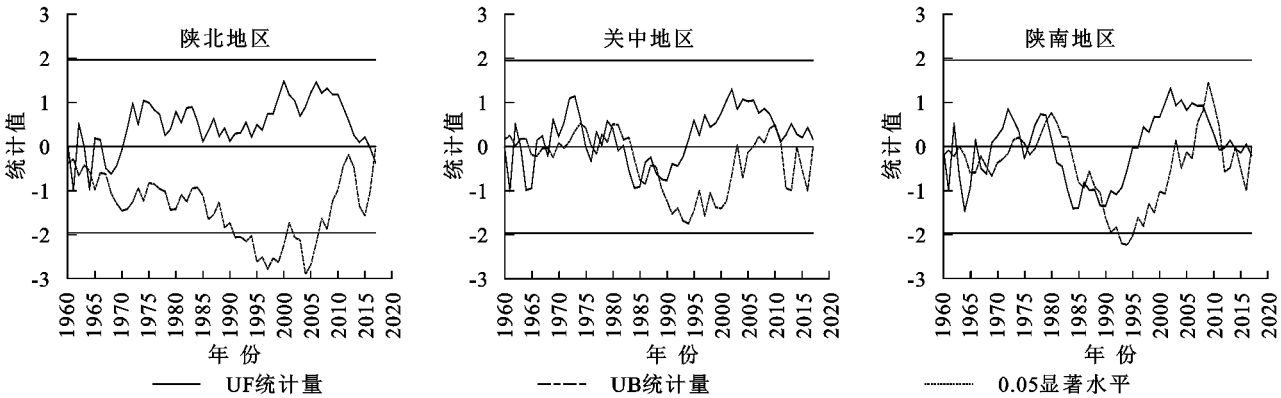


图 6 陕北、关中、陕南地区干燥度年际变化 M-K 突变检验

表 4 陕西省各年代际季节性干旱频率

年份	1960—1970 年	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2010 年	2011—2017 年	1960—2017 年	倾向率/10a	变化
春季/%	59.3	69.6	65.9	66.7	74.2	68.9	67.2	1.53	增加
夏季/%	48.1	48.2	36.1	46.7	40.7	43.3	44.0	-0.96	减少
秋季/%	35.7	44.9	46.7	49.9	44.6	35.1	43.4	0.02	增加
冬季/%	89.9	84.1	84.6	88.8	81.2	89.6	86.5	-0.18	减少
总计/%	58.3	61.7	58.3	63.0	60.2	59.2	60.3	0.14	增加

2.4 干旱发生频率空间分布

对陕西省各气象站点的干旱发生频率进行计算并做克里金插值后得到干旱频率的空间分布情况(图 7)。由图 7 中可以看出近 58 a 陕西省年干旱发生频率分布规律大致为:陕北地区普遍较大,范围在 60%~80%,年干旱频率最大值在横山和定边附近,达到了 80%以上;陕南地区整体较小,在 44%~55%范围内,干旱频率最大值在商州附近,为 54.2%左右,

石泉、佛坪附近干旱发生频率最低,为 44%左右;关中地区介于陕北与陕南之间,范围在 45%~70%,蒲城附近干旱发生频率最大,为 68%左右。全省干旱频率从北向南呈从陕北向关中先逐渐减小后又略微增大,从关中向陕南又逐渐减小的分布格局。陕北西北部地区干旱发生频率最大,关中中部地区比东西部干旱频率大,陕南中部干旱发生频率最小。陕西省年干旱频率空间分布差异较为明显。

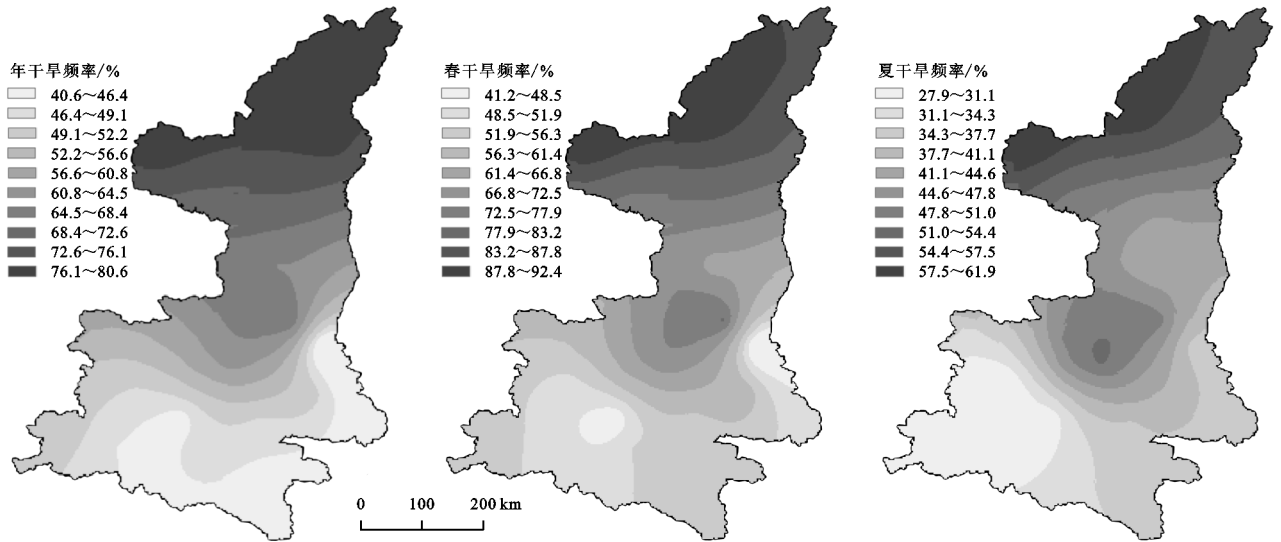


图 7 陕西省年、春、夏季干旱发生频率空间分布

春季干旱发生频率地区差异较大,陕西北部和中 部是干旱频率最大的区域,为 81%~92%,最大频率出现在定边附近,达 92.3%左右,表明陕北地区春季极易发生干旱,干旱频率呈由北向南逐渐减小分布;

陕南地区干旱频率普遍较小,在 46%~54%范围内,其中频率最小的为佛坪、安康附近,为 46%左右,干旱频率呈西北向东南逐渐减小趋势;关中地区除华山附近外,均在 50%~78%范围内,东部华山附近干

旱频率最小,为 40%左右,西、中部蒲城附近最大,达到了 78%,干旱频率呈从中部向东西两边递减分布。陕西省春季干旱发生频率南北跨度较大,最大可相差约 50%左右。夏季干旱频率空间分布特征与年干旱频率大致相同,陕北北部与关中中西部是干旱发生频率较大的地区,陕南的西南部一带是频率最小的地区。陕北地区干旱发生频率最大,范围为 36%~67%,关中地区为 26%~60%,陕南地区为 20%~41%。秋季干旱频率陕北地区最大,关中地区除蒲城附近较高,呈中部高于西部,东部最小分布,陕南地区干旱频率较小,呈从东向西逐渐减小分布。冬季干旱发生频率空间分布地区差异较大,陕北地区频率最大,其次是关中与陕南西部的太白、略阳一带和东南部安康、石泉附近,频率最小的地区在华山附近,冬季干旱在全省范围内普遍发生且频率在各季节中最大。

2.5 不同等级干旱时空变化

陕西省微旱发生频率呈南大北小的特征(图 8),整体为从西北向东南逐渐增大的趋势,微旱频率较大的地区为关中东部与陕南东南部地区,全省微旱发生

频率最大的是华山附近,达 9.1%左右,最小为定边、横山附近,不到 4%。陕西省全省微旱发生频率整体较低,各站点均不到 10%。图 9 显示微旱在夏季发生频率最大,达 9.8%,其次为秋季,7.8%,表明陕西省微旱多出现在夏、秋两季。中旱发生频率呈中部大南北小的空间分布特点(图 8),从陕北向关中先逐渐增大,之后又向陕南逐渐减小,关中中部和东部地区为中旱主要发生地区,频率最大的是华山和长武附近,为 9%左右,最小为定边附近,仅 3.1%,其次是关中的太白附近。全省中旱发生频率与微旱相同,整体较低,不到 10%。中旱在夏季发生频率最大(图 9),达 8.6%,其次为秋季,6.2%左右,表明陕西省中旱多出现于夏季。大旱发生频率空间分布特征为北大南小(图 8),关中地区由中部向东西两边逐渐减少。大旱发生频率较大地区主要为陕北和关中部,频率最大点为定边附近,达到了 73%,最小为华山附近,为 21%左右。全省大旱发生较为频繁,大旱发生频率远大于微旱和中旱。大旱发生频率在冬季最大(图 9),达 81%,其次为春季,54.8%,最后是夏季与秋季,为 30%左右。

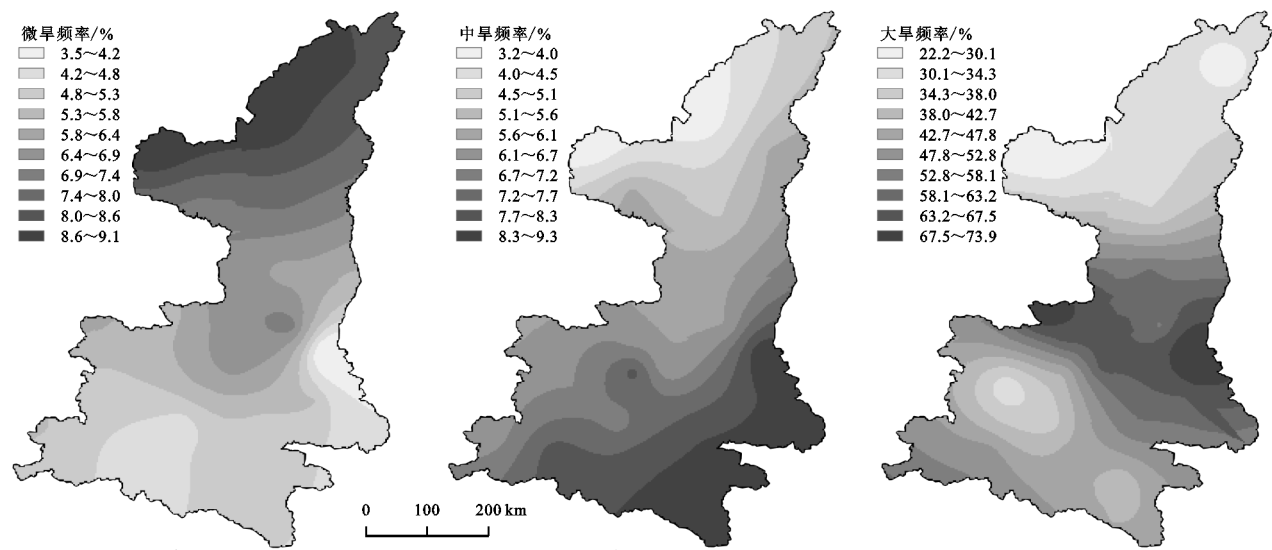


图 8 陕西省不同等级干旱发生频率空间分布

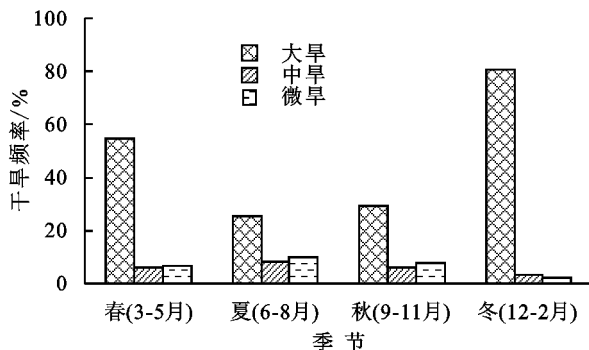


图 9 陕西省各季节不同等级干旱发生频率

现中旱和大旱都称之为旱年,不旱年是指一年中 4—9 月(暖半年)都不出现干旱的年份<sup>[36]</sup>。由表 5 可知,陕南地区的不旱年数较多,年份最多的为佛坪,近 58 a 之内出现了 20 次,其余地区大部分也为 10 次以上;相比而言陕北地区不旱年数较少,榆林、神木、定边、横山均为 0,其余地区 58 a 内平均只出现 1~2 次,表明陕北干旱十分严重。关中地区介于南北之间,地区差异较明显,其中不旱年数较多的为太白和华山,分别是 16,15 a,蒲城和咸阳仅为 0,其余地区为 1~3 a。春、夏、盛夏、秋旱年总次数从北向南均为陕北>关中>陕南。

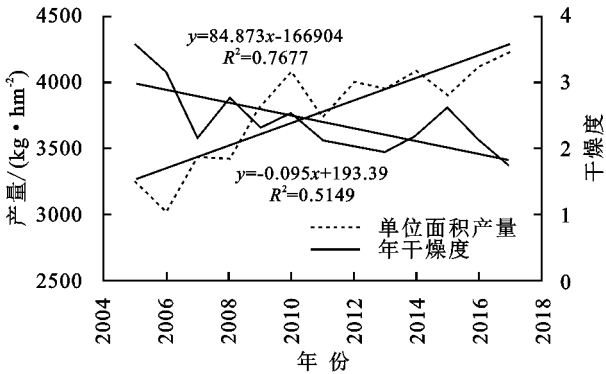
表 5 中的旱年是指记录年代中的某年中只要出

表 5 陕西省各站点不早年数与暖半年各季旱年数统计

站点	不早年	春旱年 (3—5 月)	夏旱年 (6—8 月)	盛夏旱年 (7—8 月)	秋旱年 (9 月)
榆林	0	56	57	43	35
神木	0	58	55	37	31
定边	0	58	55	45	31
吴旗	1	54	53	35	20
横山	0	58	57	48	34
绥德	1	57	54	41	28
延安	2	56	48	28	22
洛川	1	53	47	21	19
长武	1	52	49	39	14
蒲城	0	53	55	38	26
太白	16	39	15	8	3
永寿	1	51	53	38	18
武功	3	48	47	37	15
华山	15	31	31	12	7
咸阳	0	51	56	44	22
略阳	11	42	23	12	3
汉中	12	39	32	21	6
佛坪	20	34	20	9	4
商县	7	43	40	21	13
镇安	11	35	34	22	13
石泉	12	37	29	20	9
安康	13	33	34	25	10

2.6 干旱对粮食单产的影响

具体探究气象干旱对单位面积粮食产量的影响，



考虑到关中与陕南地区可通过灌溉来调节作物需水量，会在一定程度上减弱干旱对粮食作物造成的不良影响，所以在这里特别就以旱作为主的陕北地区作为研究对象，分析干燥度及降水量单位面积粮食产量的影响。其中粮食单产所统计的作物种类包括谷物、豆类和薯类。对陕北各县整体分析，粮食单产与干燥度的直线回归的决定系数是 0.588，达极显著水平，与降水量的直线回归的决定系数是 0.437，达显著水平。年干燥度每下降 0.1 个单位，粮食产量增加约 56 kg/hm<sup>2</sup>，降水量每增加 10 mm，粮食产量增加约 30.2 kg/hm<sup>2</sup>。

图 10 分别为陕北地区 2005—2017 年单位面积粮食产量与年干燥度和年降水量的年际变化趋势对比。陕北地区单位面积粮食产量呈较明显上升趋势，年干燥度呈微弱下降趋势，两者都通过显著性检验，达到了 99% 置信度，通过相关性分析发现两者呈强负相关，且通过了 0.01 的显著性检验，说明陕北地区干燥度对粮食产量的影响显著，干燥度越小，单位面积产量越大。年降水量 13 a 间呈波动变化，整体呈上升趋势，通过分析单位面积粮食产量与年降水量之间的相关性，发现两者呈较强正相关，且通过了 0.05 的显著性检验，说明陕北地区降水量对粮食产量的影响较为显著，降水量越大，单位面积产量越大。

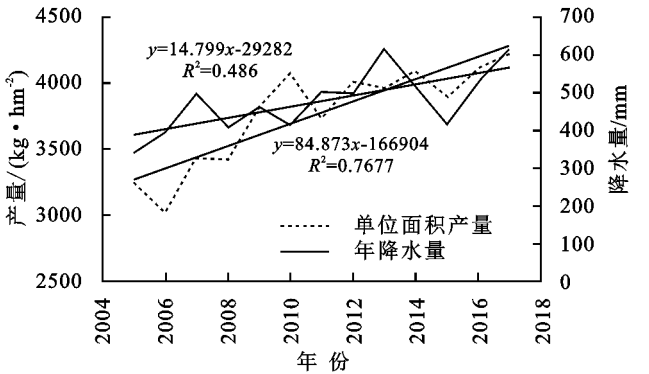


图 10 陕北地区年干燥度、年降水量与单位面积粮食产量年际变化

3 结论

本研究在 FAO56-Penman-Monteith 公式计算的潜在蒸散量基础上对陈明荣干旱指标进行了重新界定，分析了陕西省近 58 a 来干旱发生的时空变化情况及干旱与粮食单产之间的关系，主要得到以下结论：

(1) 全省大多数地区年干燥度呈增加趋势，年干燥度呈上升趋势的气象站点占总数 68.2%，呈下降趋势的站点居少数。

(2) 陕西省分为干旱、半干旱、半湿润和湿润 4 种干湿气候类型，对应的由 FAO56-PM 公式界定的干湿区划界限值分别为 2.36, 1.77, 1.17, 各气象站点多年平均年干燥度范围为 1.03~3.65，整体呈由北向

南逐渐减小分布。干燥度界限值等值线年代际波动较为明显，干旱气候区在 20 世纪 90 年代面积达到最大，湿润气候区在 80 年代达到最大。

(3) 陕西省多年来干旱发生频率整体呈增加趋势，全省各年代干旱频率线性趋势率为 0.14%/10 a。干旱频率在 1991—2000 年之间最大，达 63%。春、秋季干旱发生频率呈增加趋势，夏、冬季呈减少趋势。干旱频率空间分布不均匀，呈从陕北向关中先逐渐减小后又略微增大，再从关中向陕南又逐渐减小分布。干旱的季节性差异显著，冬季干旱发生频率最大，其次为春季，夏、秋两季相对较低。

(4) 全省不同等级干旱分布规律不同。微旱发生频率是北小南大，中旱为中部最大，大旱是北大南



小,大旱发生频率整体高于微旱和中旱。中旱和微旱多发于夏季,大旱主要发生于冬季与春季。

(5) 通过回归分析发现,干燥度和降水量对于以旱作为主的陕北地区的粮食单产的影响较为显著,单位面积粮食产量与干燥度呈强负相关,与降水量呈正相关,表明干燥度越小或降水量越大,单位面积产量越大。

参考文献:

[1] Qian W H, Shan X L, Zhu Y F. Ranking regional drought events in China for 1960—2009[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011,28(2):310-321.

[2] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years[J]. *Nature*, 2012, 491(7424):435-438.

[3] 刘晓云,李栋梁,王劲松.1961—2009年中国区域干旱状况的时空变化特征[J].*中国沙漠*,2012,32(2):473-483.

[4] 张强,韩兰英,张立阳,等.论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J].*地球科学进展*,2014,29(1):80-91.

[5] 李星敏,杨文峰,杨小丽,等.干旱指标在陕西省应用的敏感性分析[J].*中国沙漠*,2009,29(2):342-347.

[6] 陈少勇,郭江勇,韩通,等.中国西北干旱半干旱区近46 a秋季气候变暖分析[J].*中国沙漠*,2009,29(3):544-550.

[7] Liu Z P, Wang Y Q, Shao M A, et al. Spatiotemporal analysis of multiscale drought characteristics across the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534:281-299.

[8] 王利娜,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.

[9] 胡娜娜,延军平,李双双,等.气候暖干化背景下黄土高原旱涝时空演变特征[J].*干旱区研究*,2013,30(4):705-711.

[10] 景毅刚,张树誉,乔丽,等.陕西省干旱预测预警技术及其应用[J].*中国农业气象*,2010,31(1):115-120.

[11] Zarch M A A, Sivakumar B, Sharma A. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index(SPI)and Reconnaissance drought index(RDI)[J]. *Journal of Hydrology*, 2015,526:183-195.

[12] 乔丽,杜继稳,江志红,等.陕西省生态农业干旱区划研究[J].*干旱区地理*,2009,32(1):112-118.

[13] 蔡新玲,贺皓,王繁强,等.陕西省近47 a来降水变化分析[J].*中国沙漠*,2010,30(2):445-451.

[14] Wang X L, Hou X Y, Li Z, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Meteorological Drought in Shandong Province, China, from 1961 to 2008 [J]. *Advances in Meteorology*, 2014,2014:1-11.

[15] 李忆平,李耀辉.气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J].*干旱气象*,2017,35(5):709-723.

[16] 杨建平,丁永建,陈仁升,等.近50年来中国干湿气候界线

的10年际波动[J].*地理学报*,2002,57(6):655-661.

[17] 余慧倩,张强,孙鹏,等.干旱强度及发生时间对华北平原五省冬小麦产量影响[J].*地理学报*,2019,74(1):87-102.

[18] 杨艳颖,毛克彪,韩秀珍,等.1949—2016年中国旱灾规律及其对粮食产量的影响[J].*中国农业信息*,2018,30(5):76-90.

[19] 李柏贞,周广胜.干旱指标研究进展[J].*生态学报*,2014,34(5):1043-1052.

[20] 王劲松,郭江勇,周跃武,等.干旱指标研究的进展与展望[J].*干旱区地理*,2007,30(1):60-65.

[21] Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010,23:1696-1718.

[22] Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Lorenzo-Lacruz J, et al. The NAO impact on droughts in the mediterranean region [J]. *Advances in Global Change Research*, 2011,46:23-40.

[23] 毛飞,孙涵,杨红龙.干湿气候区划研究进展[J].*地理科学进展*,2011,30(1):17-26.

[24] 韦开,王全九,周蓓蓓,等.基于降水距平百分率的陕西省干旱时空分布特征[J].*水土保持学报*,2017,31(1):318-322.

[25] 李斌,解建仓,胡彦华,等.基于标准化降水指数的陕西省干旱时空变化特征分析[J].*农业工程学报*,2017,33(17):113-119.

[26] 周丹,张勃,任培贵,等.基于标准化降水蒸散指数的陕西省近50 a干旱特征分析[J].*自然资源学报*,2014,29(4):677-688.

[27] 高茂盛.气象灾害对陕西省粮食生产的影响[J].*陕西气象*,2017(4):1-5.

[28] 高茂盛,范建忠,吴清丽.旱涝灾害对陕西省粮食生产的影响研究[J].*中国农业大学学报*,2012,17(3):149-153.

[29] 王连喜,边超钧,李琪,等.陕西省干旱变化特征及其对玉米产量的影响[J].*自然灾害学报*,2014,23(6):193-199.

[30] 陈明荣.陕西省的干旱及其防御[J].*西北大学学报:自然科学版*,1977,65(2):21-31.

[31] 石忆邵.陕西省干旱类型区划分的研究[J].*干旱地区农业研究*,1993,11(2):89-96.

[32] 陈明荣.对于干湿气候区划指标问题的探讨[J].*西北大学学报:自然科学版*,1974,62(2):111-119.

[33] 寸待贵.黄土高原台原阶地乾县试区干湿气候分析[J].*干旱地区农业研究*,1990,8(3):31-37.

[34] 西北大学地理系《陕西农业地理》编写组.中国农业地理丛书:陕西农业地理[M].西安:陕西人民出版社,1979.

[35] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.

[36] 陈明荣.黄土高原的干旱特点[J].*西北大学学报:自然科学版*,1983,71(1):96-104.