

陕西省冬小麦干旱时空变化特征分析

王连喜^{1,2} 繆森^{1,2} 李琪^{1,2} 薛兴权^{1,2} 孙晓宇^{1,2} 吴东丽³

(1. 江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 210044;
3. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 利用陕西省 1981-2013 年 22 个气象站点的逐日气象数据、冬小麦生育期及产量资料, 在考虑水分敏感系数与底墒期降水的基础上, 分生育期构建了陕西省冬小麦的干旱指数, 并且采用统计模型分离干旱对产量的影响程度, 按关键生育期划分干旱指数等级范围并分析其时空变化规律。结果表明: 陕西省冬小麦整个生育期干旱频率与干旱减产率有北高南低的分布规律; 陕北、关中及陕南部分地区近 30a 冬小麦干旱有增强趋势, 而各生育期的减产率变化趋势则不尽相同。

关键词: 陕西; 冬小麦; 干旱指数; 时空变化; 特征
中图分类号: S16 文献标志码: A

Analysis of spatiotemporal variation characteristics of winter wheat drought in Shaanxi Province

WANG Lianxi^{1,2}, MIAO Miao^{1,2}, LI Qi^{1,2}, XUE Xingquan^{1,2}, SUN Xiaoyu^{1,2}, WU Dongli³

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China;
2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
3. Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on daily meteorological data and the information about breeding period and yield of winter wheat from 22 stations of Shaanxi Province for different growth period during 1981-2013, the winter wheat drought index of the province was established according to growth period and in consideration of sowing water sensitive coefficient and precipitation before planting. Also, statistical model was used to separate the degree of drought impact on production. The drought index level range was divided on the basis of key growth period and its spatiotemporal change law was analyzed. The results showed that, drought frequency and drought output reduction rate of winter wheat in Shaanxi Province in whole growth period had a distribution law that higher values showed in north and lower values showed in south; there was an increasing trend of winter wheat drought in north Shaanxi, Guanzhong and part of south Shaanxi in recent 30 years, and the change trend of output reduction rate in different growth period was completely different.

Key words: Shaanxi; winter wheat; drought index; spatiotemporal variation; characteristic

陕西省位于我国西北地区东部的黄河中游, 属于大陆性季风气候区。该省地处干旱和东南湿润区的过渡带上, 地域狭长, 高原、平原、山地等多种地貌类型俱全, 南北气候差异十分明显。近年来随着全球气候变暖, 作物生长期, 尤其是关键生育期干旱发生频率及强度的增加, 给当地农作物生长发育造成较大的威

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2015-10-10

基金项目: 国家公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY20156001-6)

Supported by: Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest of China (Major Projects) (Grant No. GYHY201506001-6)

作者简介: 王连喜(1959-), 男, 教授, 主要从事农业气象与生态气象研究。E-mail: wlx4533@sina.com

胁^[1-2]。冬小麦是陕西省主要粮食作物,干旱是陕西最常见的气象灾害之一,因此,建立理想的干旱指标,分析干旱灾害时空特征,对开展抗旱工作,确立相应政策方针有重要的现实意义。

目前应用于各类干旱评估与影响分析的指标很多,从大的层面来看,主要包括气象指标、土壤墒情指标、作物生理生态指标以及其他综合监测指标^[3]。而用于干旱监测的气象指数方法大致可以分为两类:一类单纯以降水为评价指标,包括标准化降水指数、降水距平百分率等;另一类基于土壤水分平衡原理,如帕默尔干旱指数(PDSI)、相对湿度指数 M 等。目前在业务上普遍应用的综合气象干旱指数则融合了标准化降水指数和相对湿度指数^[4-5]。其中,相对湿度指数(M)是中国气象局 2005 年《干旱监测和影响评价业务规定》中推荐的干旱指标之一,它是降水量与实际蒸散量的比值,能较好反映土壤水分的收支平衡。近年来,众多学者对此展开研究,Champagne^[6]、Rhee^[7]及 Caccamo^[8]及对干旱指标的优化进行一系列探索,姚玉璧等^[9]及任菊章等^[10]认为,以相对湿度指数为农业干旱指标能较好地反映作物干旱情况。冯建设^[5]、姚瑶等^[11]人则订正相对湿度指数并与其他指标对比分析,但围绕该地区冬小麦各生育期干旱特征的深入研究不多。

本文拟在相对湿度指数(M)的基础上,进一步考虑水分敏感系数与底墒期降水,分生育期构建陕西省冬小麦干旱指数,对冬小麦各生育期时空变化规律进行分析,为陕西冬小麦布局和防灾减灾提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域及资料

本文选取资料包括气象资料和冬小麦相关资料。气象资料来自中国气象数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>),为陕西省 22 个气象站 1981 - 2013 年历年逐日气象要素,包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、风速、水汽压等;冬小麦相关资料主要源自《陕西统计年鉴》,包括陕西省 1987 - 2013 年各市冬小麦生育期资料、产量资料等。

1.2 气象产量提取

产量按其影响因素不同可分为趋势产量、气象产量与噪声(亦称随机产量)3 部分,即:

$$y = y_t + y_w + \varepsilon \tag{1}$$

式中: y 为农作物产量, y_t 为趋势产量, y_w 为气象产量, ε 为噪声。这里的趋势产量代表气象条件变化之外的其他所有自然和非自然因素对产量的影响;而气象产量则代表气象因素对产量的影响。噪声则主要受随机因素影响,所占份量较小,一般可以略去^[12]。趋势产量,通常可采用拉格朗日插值法、函数法、滑动平均法、正交多项式法模拟。本文对陕西省分 3 个地区进行趋势产量的多种方法模拟,最终分别选取较为符合实际且分离的气象产量与气象要素相关性好的趋势产量模拟方法进行后续计算。

为消除量纲影响,本文选取相对气象产量 Y 进行分析,即:

$$Y = \frac{y - y_t}{y_t} \times 100\% \tag{2}$$

式中 y_t 为选取合适的方法模拟的趋势产量, Y 为其所对应的相对气象产量^[13]。

1.3 干旱指数及序列的构建

相对湿度指数 M 是以自然水分收支平衡为基础的干旱评估指标。它根据降水量和可能蒸散量来反映降水与蒸散的平衡关系,是一个具有时空变化的气候意义上的旱涝评价指标。考虑到农业旱涝指标应与作物生长过程中的水分供求状况相关联,本文拟用作物潜在蒸散量代替参考作物蒸散量,建立能够反映降水与农田蒸散量二者平衡关系的相对湿度指数^[14-15]。为更好体现作物各生育期生长特点,本文采用划分生育期的方法来描述水分在不同生育期对作物生长发育影响程度与作用的差异。各生育期相对湿度指数的计算公式如下:

$$M_i = \frac{P - E_{TM}}{E_{TM}} \tag{3}$$

$$E_{TM} = K_c \times E_{T0} \tag{4}$$

式中, M_i 为各生育期相对湿度指数; P 为相应时段降水量,单位: mm; E_{TM} 为相应时段作物潜在蒸散量,使用 FAO 推荐的 Penman - Monteith 方法计算,单位: mm; K_c 为相应时段的作物系数^[2]。根据冬小麦生长发育特点,可将其划分为 6 个生育期:冬前生长期、越冬一返青期、返青一拔节期、拔节一抽穗期、抽穗一灌浆期、灌浆到成熟期。采用由 Jensen 相乘模型求出的水分胁迫敏感系数^[16]标准化后作为各生育期相对湿度指

数 M_i 的权重系数,各生育期作物系数与水分胁迫敏感系数如表 1 所示。

表 1 陕西省冬小麦不同发育阶段作物系数和水分胁迫敏感系数

Table 1 Crop coefficients and water stress sensitivity coefficients of winter wheat in Shaanxi Province at different growth stages

发育阶段	作物系数	水分胁迫敏感系数
冬前生长期	0.757	0.1
越冬—返青	0.614	0.088
返青—拔节	0.847	0.123
拔节—抽穗	1.036	0.142
抽穗—灌浆	1.153	0.192
灌浆—成熟	0.738	0.177

由此构建冬小麦整个生育期的干旱指数(I'') ,其具体表达式为:

$$I'' = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times \frac{P_i - E_{TM_i}}{E_{TM_i}} \tag{5}$$

式中: λ_i 为作物不同生育期水分胁迫敏感系数 P_i 为相应生育期降水量,单位: mm; E_{TM_i} 为相应生育期作物潜在蒸散量,单位: mm; $\lambda_i \times \frac{P_i - E_{TM_i}}{E_{TM_i}}$ 为各生育期干旱指数。

由于前期降水对作物生长有一定影响,因此,为进一步优化相对湿润度指数,选取冬小麦冬前生长期的前 3 个月作为底墒期,采用底墒期降水距平百分率及其贡献率来优化整个生育期干旱指数,最终构建陕西省冬小麦干旱指数(I) ,其具体表达式为:

$$I = I' + I'' = a_0 \frac{P_0 - \bar{P}_0}{P_0} + a_1 \sum_{i=1}^n \lambda_i \times \frac{P_i - E_{TM_i}}{E_{TM_i}} \tag{6}$$

式中 I 和 I'' 分别为底墒期和全生育期干旱指数; P_0 和 \bar{P}_0 分别为底墒期降水量与底墒期多年平均降水量,单位: mm; a_0 和 a_1 分别为底墒期和全生育期降水对冬小麦产量贡献率。根据罗俊杰等^[17]的研究,底墒期对冬小麦产量贡献率为 38.6%,任义方等^[14]的研究贡献率为 19%,由于陕西省气象条件南北差异显著,因此本文将分为陕北、关中、陕南三个地区,采用协调权重系数法来确定各地区底墒期贡献率。分别对 a_0 和 a_1 所组成的 I 的各种组合与相对气象产量进行相关普查,以相关系数绝对值最大并且稳定时的组合作为最终结果,从而确定底墒期与全生育期的贡献率,得到陕北地区 a_0 取值为 0,即考虑底墒期对干旱指数的优化意义不大,这可能是由于产量是市级水平的的面数据,而气象资料是点数据,由于陕北地区冬小麦种植少且分布不均匀,因此可能会造成数据的不匹配或不对应,也可能是由于该地区地处毛乌素沙地,地表质地疏松且偏沙质,不利于存储水分,从而影响分析结果; 关中与陕南地区 a_0 取值为 19%, a_1 取值 81%,这与任义方^[14]等的研究结果相似。

1.4 冬小麦干旱指数合理性检验

为检验冬小麦干旱指数是否合理,能否有效体现不同生育期干旱情况对作物的影响并反映作物干旱敏感性,将常用气象监测指标相对湿度指数 M 与各生育期冬小麦干旱指数 I 对比分析(见图 1),对干旱指数进行合理性检验。

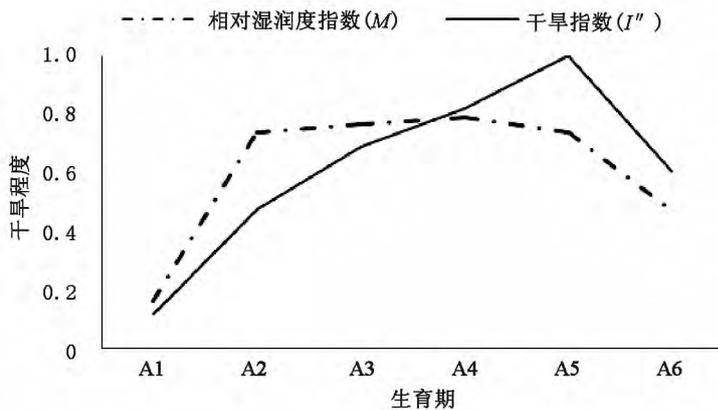


图 1 陕北地区冬小麦各生育期干旱指数和相对湿度指数变化趋势

Fig 1 Change trend of drought index and relative wetting index of winter wheat in north Saanxi region in each growth period

图中 A1 - A6 分别代表冬前生长、越冬—返青、返青—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆、灌浆—成熟 6 个生育期 相对湿度指数 M 和干旱指数 I 的值用绝对值表示。

以陕北地区为例 由冬小麦各生育期相对湿度指数和干旱指数变化趋势可知 两个指数所表示的干旱程度具有相似的变化规律 即冬前生长期干旱程度最小 随着冬小麦生长发育 干旱情况出现先升后降的趋势。其中 越冬—返青期(A2) 干旱指数的绝对值明显低于相对湿度指数 其主要原因是在常规气象干旱监测方法中 由于未考虑作物水分敏感性等因素 因此在一定程度上会夸大该生育期干旱对冬小麦生长发育的影响。越冬—返青期由于温度下降 冬小麦几乎停止生长 需水量极少 而相对湿度指数数值却偏大 与实际不符 因此这一时期干旱指数明显优于相对湿度指数。抽穗—灌浆期(A5) 干旱指数值高于相对湿度指数 这也与此时冬小麦生长迅速 需水量急剧增加 而降水不能满足其生长需要有关。综上所述 新构建的干旱指数考虑各生育期水分敏感性及底墒期干旱对冬小麦生长发育的影响 较相对湿度指数能更好反映陕西省冬小麦干旱情况。

按减产率大小划分干旱灾害等级 减产率为 2% ~ 5% 5% ~ 10% 10% ~ 20% 以及大于 20% 分别表示轻旱、中旱、重旱和特旱 4 个等级 减产率小于 2% 则认为是随机波动。

2 结果与分析

2.1 冬小麦干旱评估模型

相对气象产量实际上是气象条件综合作用的结果。对于陕西冬小麦而言 其中的不利气象条件主要包括干旱、涝灾、冰雹、干热风、霜冻等。为分离出干旱对产量的影响 进而能更准确地描述干旱对产量的影响 本文采用逐年分站小麦相对气象产量与整个生育期干旱指数回归分析后 筛选合适的气象产量进一步分析 得到陕北、关中和陕南地区回归方程如下：

$$Y_a = 8.181 + 52.720 I_a; \tag{7}$$

$$Y_b = -4.758 + 35.116 I_b; \tag{8}$$

$$Y_c = -9.718 + 13.963 I_c;$$

$$n_1 = 201 \quad n_2 = 185 \quad n_3 = 176 \quad \text{Sig} < 0.001 \tag{9}$$

式中: Y_a, Y_b, Y_c 分别为陕北、关中、陕南地区相对气象产量值; I_a, I_b, I_c 分别为 3 个地区考虑底墒期后整个生育期干旱指数值。以陕北地区 Y_a 为例 常数项 8.181 表示除干旱以外其他气象条件对气象产量的贡献平均值 回归系数 52.720 则为干旱对气象产量的贡献平均值(即干旱减产率) 也表明陕北地区干旱指数 I 对气象产量 Y 的影响强度。根据 I 的系数可反推各等级干旱对 I 的阈值范围 如特旱减产率阈值为 20% 则对应 I 阈值为: $-20/52.720 = -0.379$ 其余类推 可得到各地区考虑底墒期后整个生育期各等级的干旱标准(见表 2)。

将 6 个生育期干旱指数和气象产量进行逐步回归分析 得到各生育期干旱指数的回归模型如下：

$$Y_a = 14.267 + 26.273 I_5 + 18.017 I_4 + 8.3 I_6 + 6.128 I_1; \tag{10}$$

$$Y_b = 3.545 + 5.551 I_4 + 4.482 I_1 + 4.239 I_3 + 3.115 I_2 - 7.225 I_6; \tag{11}$$

$$Y_c = -2.726 + 6.386 I_3 + 5.993 I_4 + 5.623 I_5 + 3.552 I_2; \tag{12}$$

$$n_1 = 201 \quad n_2 = 185 \quad n_3 = 176 \quad \text{Sig} < 0.001.$$

式中 Y_a, Y_b, Y_c 分别为陕北、关中、陕南地区相对气象产量; $I_1 - I_6$ 分别为冬前生长期、越冬—返青、返青—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆、灌浆—成熟期干旱指数。未进入模型的其他生育期干旱指数 表明这些生育期干旱发生频率很低或者未达统计意义的显著水平。根据 I 的系数同样可反推各等级干旱所对应 I 的阈值范围(见表 2)。

表 2 陕西省冬小麦各生育期干旱等级标准

Table 2 Classification criteria of winter wheat drought for each growth period

		轻 旱	中 旱	重 旱	特 旱
陕北	全生育期 (I)	$-0.095 \leq I < -0.038$	$-0.190 \leq I < -0.095$	$-0.379 \leq I < -0.190$	$I \leq -0.379$
	冬前生长期 (I_1)	$-0.816 \leq I_1 < -0.326$	$-0.81 \leq I_1$		
	拔节—抽穗期 (I_4)	$-0.278 \leq I_4 < -0.111$	$-0.555 \leq I_4 < -0.278$	$-0.555 \leq I_4$	
	抽穗—灌浆期 (I_5)	$-0.190 \leq I_5 < -0.076$	$-0.381 \leq I_5 < -0.190$	$-0.761 \leq I_5 < -0.381$	$I_5 \leq -0.761$
	灌浆—成熟期 (I_6)	$-0.602 \leq I_6 < -0.241$	$-0.602 \leq I_6$		

		轻 旱	中 旱	重 旱	特 旱
关中	全生育期 (I)	$-0.142 \leq I < -0.057$	$-0.285 \leq I < -0.142$	$-0.570 \leq I < -0.285$	$I \leq -0.5695$
	冬前生长期 (I_1)	$I_1 \leq -0.446$			
	越冬-返青 (I_2)	$I_2 \leq -0.642$			
	返青-拔节 (I_3)	$I_3 \leq -0.472$			
	拔节-抽穗期 (I_4)	$-0.901 \leq I_4 < -0.360$	$I_4 \leq -0.901$		
陕南	全生育期 (I)	$-0.358 \leq I < -0.143$	$-0.716 \leq I < -0.358$	$I \leq -0.716$	
	越冬-返青 (I_2)	$I_2 \leq -0.563$			
	返青-拔节 (I_3)	$-0.783 \leq I_3 < -0.313$	$I_3 \leq -0.783$		
	拔节-抽穗期 (I_4)	$-0.834 \leq I_4 < -0.334$	$I_4 \leq -0.834$		
	抽穗-灌浆期 (I_5)	$-0.890 \leq I_5 < -0.356$	$I_5 \leq -0.890$		

对陕北而言,冬前生长期、拔节—抽穗期、抽穗—灌浆期、灌浆—成熟期干旱指数值对气象产量的变化有一定影响,且拔节—抽穗与抽穗—灌浆期对产量影响相对较大,这主要是由于冬小麦在此阶段生长发育速度加快,需水量迅速增加,而降水不能满足其生长发育需要,因此成为限制产量的关键因素。总体而言,陕北地区降水较少,各生育期干旱指数与气象产量均成正比关系,增加降水或灌溉对其产量的增加有积极作用。关中地区灌浆—成熟期干旱指数的回归系数为负值,这可能是由于该地区降水基本能满足冬小麦生长发育需求,初夏汛期降水过多反而会造成涝灾或导致光照不足与热量条件不好,从而影响冬小麦产量。

2.2 冬小麦干旱发生频率

各站点各生育期不同干旱等级发生频率 F :

$$F = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{13}$$

式中, n 为第 i 个生育期干旱发生年次数, N 为统计资料总年数。

根据表中冬小麦干旱等级标准,统计得到陕北、关中、陕南 3 个地区冬小麦全生育期的干旱发生频率为 99.57%、96.42% 和 51.18%。陕北以重旱与极端干旱为主,关中地区以中旱和重旱为主,而陕南地区以轻旱和无旱为主。表明陕北和关中地区受旱相对严重,而陕南相对较轻,这应该与陕南地区降水丰沛有关。陕西省冬小麦全生育期干旱频率呈北高南低分布,且拔节—抽穗期受旱相对严重。

从不同生育期看,以陕北地区为例,由表 2 可得,冬前生长期 (I_1)、拔节—抽穗期 (I_4)、抽穗—灌浆期 (I_5)、灌浆—成熟期 (I_6) 是冬小麦干旱减产的关键时期。由表 3 可得,在这 4 个时期中,冬前生长期以轻旱和无旱为主,共占 97.4%,说明这一时期作物生长缓慢,需水量较小,此时降水基本能满足其生长需要;拔节—抽穗和抽穗—灌浆期均以重旱及以上干旱为主,分别占 89.61% 和 92.21%,在这一时期,由于作物生长速度加快,需水量迅速增加,降水不能满足其生长发育需要,从而限制其生长,是生长发育的关键时期。灌浆—成熟期以中旱和轻旱为主,共占 75.76%,这一时期,陕北逐渐进入汛期,降水量逐渐增加但仍不能满足其生长发育需要,水分仍然是冬小麦生长发育的重要制约因素。

表 3 陕西省冬小麦各生育期干旱发生频率

Table 3 Frequency of winter wheat drought in Shaanxi Province in each growth period

		%				
生育期		无 旱	轻 旱	中 旱	重 旱	特 旱
陕北	冬前生长期 (I_1)	48.48	48.92	2.60	0.00	0.00
	拔节-抽穗 (I_4)	1.73	0.87	7.79	89.61	0.00
	抽穗-灌浆 (I_5)	1.73	2.16	3.90	34.63	57.58
	灌浆-成熟 (I_6)	24.24	31.17	44.59	0.00	0.00
	冬前生长期 (I_1)	86.07	13.93	0.00	0.00	0.00
关中	越冬-返青 (I_2)	44.49	55.51	0.00	0.00	0.00
	返青-拔节 (I_3)	37.50	62.50	0.00	0.00	0.00
	拔节-抽穗 (I_4)	19.07	72.47	8.46	0.00	0.00
陕南	越冬-返青 (I_2)	75.32	24.68	0.00	0.00	0.00
	返青-拔节 (I_3)	18.61	47.62	33.77	0.00	0.00
	拔节-抽穗 (I_4)	24.68	70.13	5.19	0.00	0.00
	抽穗-灌浆 (I_5)	31.60	64.07	4.33	0.00	0.00

关中地区干旱程度较陕北地区有明显下降,冬前生长期以无旱为主,占 86.07%;越冬—返青、返青—拔节、拔节—抽穗期均以轻旱为主,分别占 55.51%、62.5%、72.47%。其中,拔节—抽穗期中旱占 8.46%,另外两个时期基本不发生中旱及以上旱情,说明这三个生育期的干旱情况对关中地区产量有一定影响,拔节到抽穗期是容易发生干旱的关键时期。

陕南地区越冬—返青期以无旱为主,占 75.32%,这一时期冬小麦生长缓慢,需水量较少,而陕南地区降水较为充沛,因此很少会出现干旱而影响其产量。返青—拔节期以轻旱和中旱为主,共占 81.39%;拔节—

抽穗期和抽穗—灌浆期则以轻旱为主,分别占 70.13% 和 64.07%。

2.3 冬小麦干旱减产率分析

干旱减产率表示农作物受干旱影响而造成减产的结果。根据式(7) - (9)中,陕北、关中、陕南地区冬小麦全生育期干旱减产率($52.720 \times I_a$)、($35.116 \times I_b$)、($13.963 \times I_c$)可得,陕北地区多年平均干旱减产率在 23.01% ~ 39.66% 之间,平均为 33.64%,除延安和洛川外,减产率均在 33.30% 以上,干旱频率相对较高;关中地区年均干旱减产率为 10.11% ~ 17.88%,平均值为 13.16%;陕南地区在 4.56% ~ 1.54% 之间,平均值为 2.84%。综合陕西全省来看,陕北地区干旱减产率(33.64%) > 关中地区(13.16%) > 陕南地区(2.84%),有明显的北高南低分布趋势,其空间分布与干旱频率的分布类似。

从不同生育期看,以陕北地区为例,由表 3 可得,冬前生长期(I_1)、拔节—抽穗期(I_4)、抽穗—灌浆期(I_5)、灌浆—成熟期(I_6)是冬小麦干旱减产的关键时期。由图 2 可知,在这四个时期中,拔节—抽穗、抽穗—灌浆期平均减产率较高且分布较为广泛,分别达到 40.57% 和 41.53%。而越冬—返青期虽然干旱分布范围较广,但减产率仅为 16.81%,这应该是因为在这一时期,天气寒冷,冬小麦生长速度减缓甚至是停止生长,需水量大大下降,水分对产量的影响作用也大为降低;而拔节—抽穗等生育期是其生长发育的关键时期,因此充足的水分至关重要。关中地区,拔节—抽穗和抽穗—灌浆期平均减产率相对较高,分别为 22.25% 和 21.18%,越冬—返青期的平均减产率最小,仅为 5.89%;陕南地区,返青—拔节和拔节—抽穗时期减产率相对较高,分别为 8.00% 和 7.19%,最低的仍然是越冬—返青期,为 1.69%。

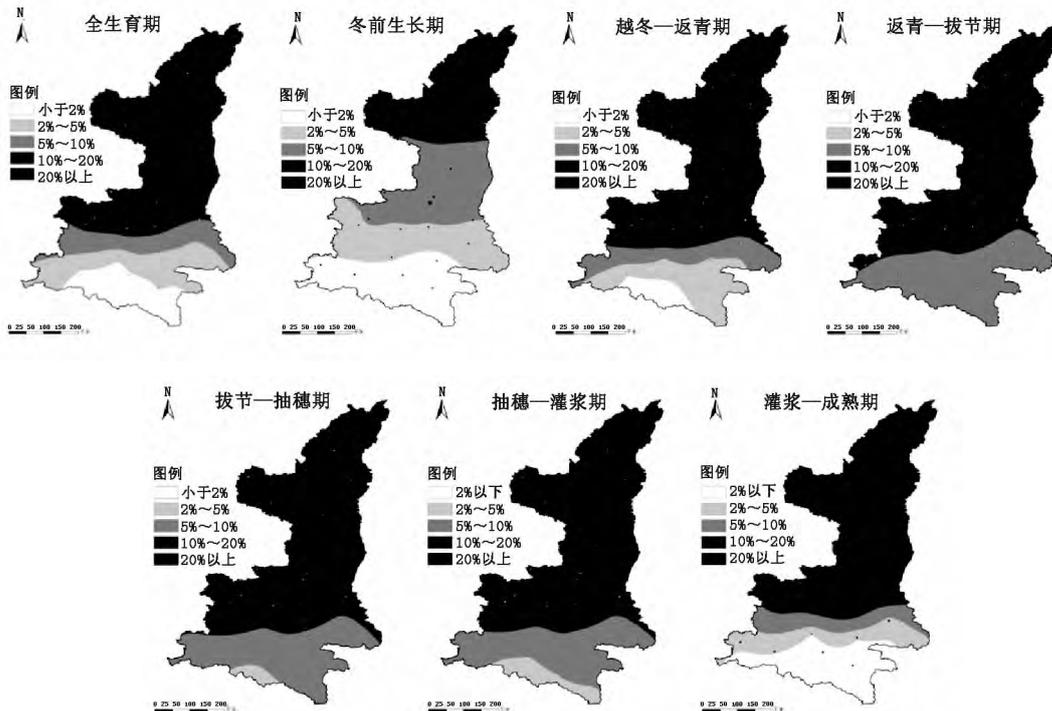


图 2 陕西省冬小麦不同生育期干旱减产率分布图

Fig 2 Distribution map of output reduction of winter wheat in Shaanxi Province in different growth periods

2.4 近 30a 冬小麦干旱减产率变化趋势

针对陕北、关中、陕南 3 个地区考虑底墒期后全生育期干旱减产率进行分析,由图 3 可以看出近 30a (1988 - 2013 年) 3 个地区干旱最严重的年份均为 1995 年,干旱减产率分别达到 42.22%, 21.88% 和 5.86%。陕北地区灾情最严重的年份依次为 1995, 1999, 2011, 2005 年,最轻的依次为 2001, 2011, 1990 年,这与《陕西统计年鉴》基本一致。

总体上看,陕北地区干旱减产率波动较大,而关中、陕南地区则相对平稳;关中地区减产率呈波动上升趋势,以 1988—1994 年上升较为明显,而陕北地区也有轻度上升趋势。从不同生育期看,冬前生长期,除凤翔与长武外,陕北、陕南以及关中大部分地区多年平均减产率呈下降趋势,返青—拔节和拔节—抽穗期总体趋势与之类似;越冬—返青期,陕北大部、关中和陕南地区年均减产率呈上升趋势;抽穗—灌浆期陕北地区年均减产率下降,关中和陕南大部分地区上升;而灌浆—成熟期则是除陕南地区外,大部分地区均有下降趋势。

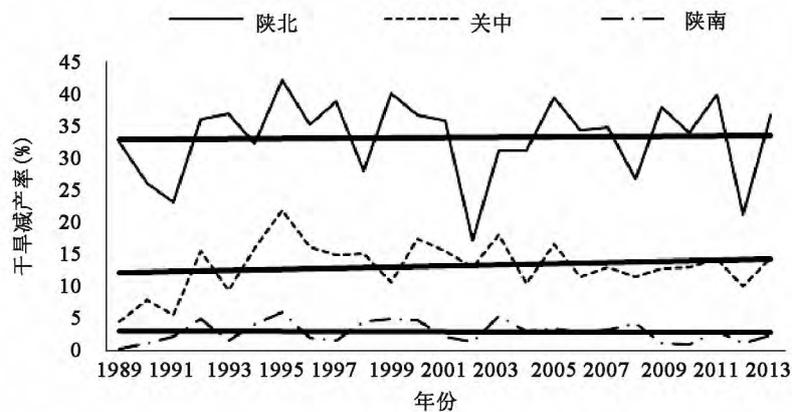


图3 陕西省冬小麦逐年平均干旱减产率及其变化趋势

Figure3 Yearly average drought output reduction rate of winter wheat in Shaanxi Province and its change trend

3 结论与讨论

本文以陕西省冬小麦干旱为例,在考虑水分敏感系数与底墒期降水的基础上,分生育期构建陕西省冬小麦干旱指数。并且采用统计模型分离干旱对产量的影响程度,按关键生育期划分干旱指数等级范围进行分析,得出以下结论:

(1) 以相对湿度指数为基础,根据作物特性与水分敏感程度,结合底墒期降水对作物产量的影响,构建适用于陕西省冬小麦的干旱指数,在分生育期的干旱情况描述上较相对湿度指数有明显优势。对趋势产量的模拟,采用拉格朗日插值法、函数法、滑动平均法等择优选取,进一步克服不同方法在计算中的局限性,提升分离气象产量的效果。为考虑底墒期降水对冬小麦产量的影响,将陕西省分为陕北、关中、陕南3个地区,采用协调权重系数法来确定关中和陕南地区底墒期贡献率为19%,这与任义方等^[14]的研究成果相似。但陕北地区考虑底墒期降水对干旱指数精度的提高意义不大,具体原因有待进一步探讨。

(2) 对陕西省近30a(1989-2013年)干旱频率进行分析,可得陕北、关中、陕南3个地区冬小麦全生育期干旱发生频率分别为99.57%、96.42%和51.18%,并大致呈纬向分布,由北向南干旱频率递减,这与乔丽等^[19]、刘小艳^[18]的研究结果相似。从生育期看,在作物生长过程中起关键作用的返青-拔节、拔节-抽穗、抽穗-灌浆等时期对降水的需求量比较大,干旱频率较高;而冬前生长期等干旱频率较低。

(3) 陕西省近30a减产率空间分布与干旱频率的分布类似,也存在明显的北高南低的地带性分布特征。从生育期看,3个地区越冬-返青期多年平均干旱减产率均为最低,其他生育期则相对较高。陕西省冬小麦干旱发生频率与干旱减产率分布特征具有较好的一致性。

(4) 对陕西省近30a冬小麦干旱减产率分析可知,陕北、关中及陕南部分地区干旱有增强趋势,陕北波动明显,这与雷向杰等^[21]研究结果一致。而各生育期的减产率变化趋势则不尽相同。

(5) 本文按生育期构建陕西省冬小麦干旱模型,在相对湿度指数的基础上,考虑底墒期降水,并用统计模型分离干旱对产量的影响程度,进一步量化单一灾种对作物产量的影响,一定程度上克服了传统等级分类方法对不同生育期干旱敏感性差异刻画的局限性。

受资料限制,本文只选取了陕西省22个站点气象数据,而冬小麦产量、面积等资料则只有市级数据,一定程度上影响了模拟精度。冬小麦生育期内干旱的发生有着极其复杂的机理,各自然因素(降水、温度、光照等)、人为因素、土地性质、作物种类等都对其产生直接或间接的影响,在今后冬小麦干旱指标的选择时应进一步考虑更多因素的综合影响。

参考文献:

- [1] 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.
WANG Lianxi, BIAN Chaojun, LI Qi, et al. Characteristics of drought change in Shanxi Province and their influence on corn yield[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 193-199. (in Chinese)
- [2] 孔坚文. 陕西省冬小麦气象灾害风险评估及区划[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.

- Kong Jianwen. Risk Assessment and Regionalization of Winter Wheat Meteorological Disasters in Shanxi Province[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [3] 李柏贞,周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052.
LI Bozhen ZHOU Guangsheng. Advance in the study on drought index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1043-1052. (in Chinese)
- [4] 张倩,赵艳霞,王春乙. 我国主要农业气象灾害指标研究进展[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(6): 40-54.
ZHANG Qian, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi. Advances in Research on Major Agro-meteorological Disaster Index in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(6): 40-54. (in Chinese)
- [5] 冯建设,王建源,王新堂,等. 相对湿度指数在农业干旱监测业务中的应用[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 766-772.
Feng Jianshe, Wang Jianyuan, Wang Xintang, et al. The application of relative humidity index to agricultural drought monitoring[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(6): 766-772. (in Chinese)
- [6] Champagne C, McNairn H, Berg A A. Monitoring agricultural soil moisture extremes in Canada using passive microwave remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(10): 2434-2444.
- [7] Rhee J, Im J, Carbone G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(12): 2875-2887.
- [8] Caccamo G, Chisholm L A, Bradstock R A, et al. Assessing the sensitivity of MODIS to monitor drought in High biomass ecosystems[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(10): 2626-2639.
- [9] 姚玉璧,王劲松,尚军林,等. 基于相对湿度指数的西南春季干旱10年际演变特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 547-554.
YAO Yubi, WANG Jingsong, SHANG Junlin, et al. Decadal variations of spring drought based on relative moisture index in Southwest of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(4): 547-554. (in Chinese)
- [10] 任菊章,黄中艳,郑建菊. 基于相对湿度指数的云南干旱气候变化特征[J]. 中国农业气象, 2014, 35(5): 567-574.
REN Juzhang, HUANG Zhongyan, ZHENG Jianmeng. Analysis on drought climate change in Yunnan based on relative moisture index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(5): 567-574. (in Chinese)
- [11] 姚瑶,张鑫,马全,等. 青海省东部农业区作物生长期不同气象干旱指标应用研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 177-184.
YAO Yao, ZHANG Xin, MA Quan, et al. Application research on different drought indices in crop growing period at East agricultural region of Qinghai Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 177-184. (in Chinese)
- [12] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 13-18.
FANG Shibao. Exploration of method for discrimination between trend crop yield and climatic fluctuant yield[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 13-18. (in Chinese)
- [13] 王萍,那济海,朱海霞,等. 黑龙江省粮食产量结构与影响产量的气象因子分析[J]. 气象科技, 2008, 36(4): 449-452.
WANG Ping, NA Jihai, ZHU Haixia, et al. Analysis of yield components and meteorological factors affecting yields in Heilongjiang Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 36(4): 449-452. (in Chinese)
- [14] 任义方,赵艳霞,王春乙. 河南省冬小麦干旱保险风险评估与区划[J]. 应用气象学报, 2011, 22(5): 537-548.
REN Yifang, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi. Winter wheat drought disaster insurance risk assessment and regionalization in Henan Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(5): 537-548. (in Chinese)
- [15] 杨艺,周继良,吴明作. 河南省各地区主要作物生态需水研究[J]. 河南科学, 2008, 26(6): 677-680.
YANG Yi, ZHOU Jiliang, WU Mingzuo. Ecological water demand research on Henan Province's main crop[J]. Henan Science, 2008, 26(6): 677-680. (in Chinese)
- [16] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等. 中国主要农作物分生育期 Jensen 模型研究[J]. 节水灌溉, 2008(7): 1-8.
XIAO Junfu, LIU Zhandong, DUAN Aiwang, et al. Study on Jensen model at each growing stage for main crops in China[J]. Water Saving Irrigation, 2008(7): 1-8. (in Chinese)
- [17] 罗俊杰,黄高宝. 底墒对旱地冬小麦产量和水分利用效率的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 1-4.
LUO Junjie, HUANG Gaobao. Effects of different soil water before sowing on winter wheat yield and WUE in semi-arid areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(3): 1-4. (in Chinese)
- [18] 刘小艳. 陕西省干旱灾害风险评估及区划[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010.
Liu Xiaoyan, Risk Assessment and Zoning of Drought Disaster in Shaanxi Province[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2010. (in Chinese)
- [19] 乔丽,杜继稳,薛春芳,等. 干旱指标在陕西省适用性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 1-6.
QIAO Li, DU Jiwen, XUE Chunfang, et al. Applicability of drought indices in Shanxi Province[J]. Agricultural Research in The Arid Areas, 2010, 28(2): 1-6. (in Chinese)
- [20] 王春乙,娄秀荣,王建林. 中国农业气象灾害对作物产量的影响[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 37-43.
WANG Chunyi, LOU Xiurong, WANG Jianlin. Influence of agricultural meteorological disasters on output of crop in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(5): 37-43. (in Chinese)
- [21] 雷向杰,蔡新玲,王娜. 气象灾害灾情评估指标研究与应用——以陕西为例[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 22-27.
LEI Xiangjie, CAI Xinling, WANG Na. Study and application of meteorological disaster assessment index——take shaanxi as an example[J]. Disaster Science, 2011, 26(3): 22-27. (in Chinese)