

北方冬小麦不同生育期干旱风险评估

张 蕾¹, 杨冰韵²

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 基于北方 6 省市和 61 个市县 1981—2012 年冬小麦产量和逐日气象资料, 有效分离冬小麦减产率, 通过典型干旱年份冬小麦减产率与水分亏缺距平指数、降水距平百分率的相关分析筛选致灾因子; 基于减产率分级, 利用冬小麦不同生育期减产率与致灾因子数学模型构建干旱等级指标; 综合冬小麦干旱等级的强度及其风险概率, 进行冬小麦生育期干旱风险评估。结果表明: 冬小麦减产率与水分亏缺距平指数的相关系数达 0.355~0.656, 明显大于降水距平百分率, 在各生育阶段内均通过 0.05 的显著性检验, 确定为干旱致灾因子; 在冬小麦不同生育期内, 通过冬小麦减产率-致灾因子线性模型得到的轻、中、重、特重干旱等级指标, 以 0.297、0.351、0.214、0.159、0.316、0.547、0.149 分别为苗期、越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、成熟期和全生育期发生干旱的临界值; 不同生育期冬小麦干旱风险分布形式存在一定地区差异, 这与地区降水量对冬小麦需水的满足情况相符, 其中, 河北南部和山东西北部在各生育期均属于冬小麦干旱的高危险性地区。

关键词: 冬小麦; 干旱; 作物水分亏缺距平指数; 风险

中图分类号: S162 **文献标志码:** A

Risk assessment of drought damage during growing stages for winter wheat in North China

ZHANG Lei¹, YANG Bing-yun²

(1. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China;

2. National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Using yield data and meteorological data from 1981—2012 in north China, an appropriate method was selected to fit tendency yield for winter wheat in each province, and the key factor was selected by comparing yield reduction rate with water deficit anomaly index and precipitation anomaly percentage in typical drought years. Based on grade criteria of yield reduction rate, drought damage index was calculated upon the model of yield reduction rate and key factor during different period. Risk assessment model was constructed considering drought grade and its risk probability. The drought risk assessment at growth period of winter wheat was conducted considering drought grade and its risk probability. The results indicated that the correlation coefficient between yield reduction rate and water deficit anomaly index varied from 0.355 to 0.656 at the level of $P < 0.05$, being greater than that between yield reduction rate and precipitation anomaly percentage. This finding indicated that water deficit anomaly index was appropriate to be selected as the key factor for drought. The mathematical relationship of yield reduction rate and water deficit anomaly index differed during different growth period, and the critical value determining drought occurrence was 0.297, 0.351, 0.214, 0.159, 0.316, 0.547 and 0.149 for seedling stage, wintering stage, regreening stage, jointing stage, heading stage, maturation stage and whole growth stage, respectively. Drought damage risk for winter wheat differed during different period that matched well with supplement of precipitation and water requirement in region. Overall, high drought risk for winter wheat was in southern Hebei and northwest Shandong during each period.

Keywords: winter wheat; drought; water deficit anomaly index; drought risk

华北、黄淮地区是我国冬小麦主产区, 冬小麦产量的高低对全国粮食产量有举足轻重的影响。其中, 河北、河南、山东、山西、北京和天津 6 省市冬小麦种植面积占全国总种植面积的 50.9%, 产量占全

国总产的 58.2%。北方地区光热资源丰富,但降水有限且分布不均,干旱频发,若只靠播前底墒和自然降水仅能满足冬小麦需水量的 60%~70%,缺水率在 30%以上的年份概率达 60%左右^[1]。冬小麦发生干旱,导致生理特性改变^[2]、灌浆速率下降^[3]、干物质积累下降以及光合产物分配格局改变^[4],严重影响冬小麦产量。因此,对冬小麦干旱进行及时监测和评估,对制定合理的灌溉措施、减避干旱灾害有重要意义。

目前,不少学者针对冬小麦干旱灾害,从危险性、灾损和防灾能力角度进行风险分析与评估^[5-8],上述研究多是针对冬小麦全生育期进行。选择合适的干旱指标是进行干旱风险分析的基础,已经得到广泛应用的干旱指标大致可以分为三类:一类是降水负距平^[9]、时段内降水量^[10]等,指标简单易获,但缺少与实际作物受灾的对应;一类是自然水分亏缺^[11]、相对湿度指数^[12]等,指标考虑了水分供需平衡;一类是 CVTI^[13]、LSA-SAFET^[14]等,指标基于 RS、GIS 和作物模型技术,拓宽了干旱监测评估的范围。以往冬小麦干旱分析中等级的划分主要是基于百分位数法或是与灾情进行对比分析^[9-11],较少从冬小麦实际灾损角度进行划分。

本研究从业务上应用较多的农业干旱指标出发,以全生育期和不同生育期冬小麦减产率与指标的相关程度和数学模型确定致灾因子临界指标阈

值,避免了划分致灾因子等级的主观性,综合干旱等级的强度和风险概率,进行冬小麦干旱风险评估,以期进行冬小麦干旱监测预警、防御和减轻干旱灾害提供技术支撑。

1 资料来源与分析方法

1.1 数据来源

本文所用的北方冬小麦产量资料来源于中国种植业信息网和农业气象观测报表,主要包括河北省、河南省、山东省、山西省、北京市、天津市 6 省市 1981—2012 年逐年冬小麦总产、种植面积和单产。站点冬小麦资料来自于全国农业气象观测报表和中国种植业信息网,包括上述 6 省市共 61 个市县(图 1),1981—2012 年(部分市县不足 32 a,则以现有年份数据为准)的冬小麦单产、总产和种植面积等,对个别缺测数据采用 5 年平均法进行插值。市县冬小麦生育期资料来自全国农业气象观测报表和《中国主要农作物气候资源图集》^[15]。气象资料来自国家气象信息中心,华北和黄淮地区共 160 个气象站点,包括 1980—2012 年逐日平均温度、最高温度、最低温度、降水量、日照时数、风速、气压等,对个别缺测数据采用历年同期均值进行插值。冬小麦干旱灾情资料来自 6 省市《中国气象灾害大典》^[16-21]和中国种植业信息网。

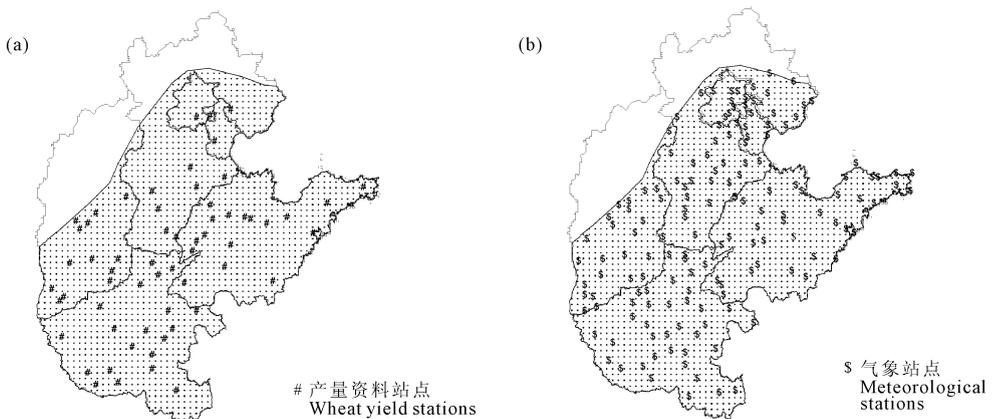


图 1 北方冬麦区产量资料站点(a)和气象站点(b)

Fig.1 Stations of yield for winter wheat and meteorological observation

1.2 资料处理

1.2.1 冬小麦减产率 冬小麦产量是在各种自然因素和非自然因素的综合影响下形成的,其影响因素可以划分为农业技术措施、气象条件和随机“噪声”,分别对应趋势产量、气象产量、噪音产量(实际计算中可以忽略不计)。冬小麦减产率可以用实际

产量低于趋势产量的百分率表示:

$$y' = \frac{y - y_t}{y_t} \times 100\% \quad (1)$$

其中, y' 为冬小麦减产率, y 为实际产量, y_t 为趋势产量。通过趋势产量分离出的气象产量应该符合其对气候因子,尤其是农业气象灾害的响应规律,本文

在分析干旱时主要考虑典型干旱年份由干旱造成的冬小麦减产。本文中,采用二次曲线^[22]、直线滑动平均法^[23]、灰色系统 GM(1,1) 模型^[24]、HP 滤波法^[25] 4 种方法,对河北省、河南省、山东省、山西省、北京市和天津市冬小麦趋势产量进行拟合,结果河北省、河南省、山东省、北京市和天津市以直线滑动平均法拟合精度最高,平均相对误差分别为 4.71%、4.04%、4.40%、3.58% 和 4.60%;山西省以 GM(1,1) 模型拟合效果最好,平均相对误差为 9.28%。

1.2.2 冬小麦水分亏缺距平指数 冬小麦水分亏缺指数反映出冬小麦水分需求与供给之间的差值,但季节、区域差别较大,难以用统一的标准表达各区域水分亏缺程度。因此,用作物水分亏缺距平指数以消除区域与季节差异。某时段作物水分亏缺距平

指数(CWDIa)计算如下:

$$CWDIa = CWDI - \overline{CWDI} \quad (2)$$

其中,CWDIa 为某时段冬小麦水分亏缺距平指数;CWDI 为某时段冬小麦水分亏缺指数; \overline{CWDI} 为多年同期的 CWDI 均值。

作物水分亏缺指数(CWDI) 表示为:

$$CWDI = \frac{ET_m - P}{ET_m} = 1 - \frac{P}{ET_m} \quad (3)$$

其中, P 为计算时段内的累积降水量, ET_m 为相应时段内冬小麦需水量。 ET_m 是由当地气候条件下潜在蒸散量和作物特性决定,计算如下:

$$ET_m = K_c \times ET_0$$

其中, K_c 为作物系数(表 1), ET_0 为参考作物蒸散量,由 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算^[23]。

表 1 冬小麦作物系数 K_c 值

Table 1 Value of crop coefficient (K_c) for winter wheat

地区 Region	10月 October	11月 November	12月 December	1月 January	2月 February	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June
山西 Shanxi	0.58	0.76	0.4	0.14	0.24	0.58	1.04	1.24	0.84
河北 Hebei	0.85	0.92	0.54	0.33	0.24	0.42	1.14	1.42	0.73
河南 Henan	0.63	0.83	0.93	0.31	0.50	0.91	1.40	1.29	0.60
山东 Shandong	0.67	0.70	0.74	0.64	0.64	0.90	1.22	1.13	0.83
北京 Beijing	0.85	0.92	0.54	0.33	0.24	0.42	1.14	1.42	0.73
天津 Tianjin	0.85	0.92	0.54	0.33	0.24	0.42	1.14	1.42	0.73

1.2.3 降水距平百分率 农业干旱的直接原因是降水量异常偏少,降水量可作为农业干旱综合指标的基础指标之一,在雨养农业区和土壤水分观测资料缺乏的地区较为实用。

降水距平百分率是指某时段的降水量与常年同期降水量相比的百分率,计算方法如下:

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (4)$$

其中, P_a 为降水距平百分率, P 为某时段降水量, \bar{P} 为多年平均同期降水量。

1.2.4 冬小麦干旱指标构建 在冬小麦典型干旱年份,对不同生育期冬小麦减产率与水分亏缺距平指数、降水距平百分率进行相关分析,筛选关键因子。

基于关键因子,将冬小麦全生育期和不同生育阶段(苗期、越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、成熟期) 站点典型干旱年份的减产率与该关键因子进行回归分析,建立相应生育期内的数学模型。其中,不同生育期的冬小麦减产率以年度减产率与水分敏感系数的乘积表示:

$$y'_i = y' \times k_{wi} \quad (5)$$

其中, y'_i 为不同生育期的冬小麦减产率, y' 为冬小麦年度减产率, k_{wi} 为不同生育期水分敏感系数^[26](表 2)。

表 2 北方冬小麦水分敏感系数

Table 2 Water sensitive coefficient for winter wheat

苗期 Seedling stage	越冬期 Wintering stage	返青期 Regreening stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturation stage
0.1721	0.0411	0.0591	0.1694	0.3108	0.1895

依据冬小麦减产率 5% ~ 10%、10% ~ 20%、20% ~ 30%、> 30%,分别对应冬小麦轻度、中度、重度、特重干旱。基于减产率等级和减产率与干旱因子数学模型,构建不同生育期冬小麦干旱等级指标。

1.2.5 冬小麦干旱危险性评估 综合考虑冬小麦不同干旱等级指标及其出现的风险概率,构建冬小麦干旱灾害风险指数评估模型:

$$Q = \sum_{i=1}^n J_i F_i \quad (6)$$

其中, Q 为冬小麦干旱的风险指数; J_i 为第 i 个干旱

等级的强度,这里取值为全生育期和不同生育期不同干旱等级下致灾关键因子的均值; F_i 为第*i*个干旱等级出现的风险概率,研究中*i*取1、2、3等级,这里风险概率的估算采用信息分配的方法,信息分配方法采用一维线性信息分配函数,通过选定步长(本文为0.01),对序列进行有序地信息离散处理,即得到较为合理的概率值,回避了分布函数的检验。

2 结果与分析

2.1 冬小麦减产率变化

基于各省市产量分离计算得到冬小麦历年减产率年际间波动较大,在不同地区的变化存在明显差异(图2)。从各省市减产率与历史典型灾害年进行对比分析来看:2000—2003年北方冬麦区连续遭受旱灾,对冬小麦产量影响较大,尤其是2003年受灾程度较高,计算得到2000—2003年6省市冬小麦单产除了个别年份外,均有不同程度减产,平均减产率

为0.8%~9.5%。2007年由于降水分布不均,山西省遭受严重干旱,且从5月中旬开始出现干热风天气,造成冬小麦明显减产,计算的2007年山西省冬小麦单产减产率为5.35%。2009年初,北方冬小麦主产区发生30年一遇、部分地区50年一遇的严重干旱,但由于各级农业部门及时有效地做好了预警、防御工作,最大限度减轻了灾害损失,以计算得到的2009年北方各省的冬小麦减产情况看,仅山西省减产较大(12.9%),山东省、河南省单产略有减少,而河北省、北京市和天津市并未出现减产。河北省历史上春季气温偏高的年份,如1981、1982、2000—2003年,冬小麦均出现不同程度的减产,计算得到河北省上述年份的冬小麦单产减产率分别为24.18%、19.50%、1.61%、5.57%、3.10%、0.80%。从上述历史典型年份对比情况,可见本文分离的减产率是符合实际的。

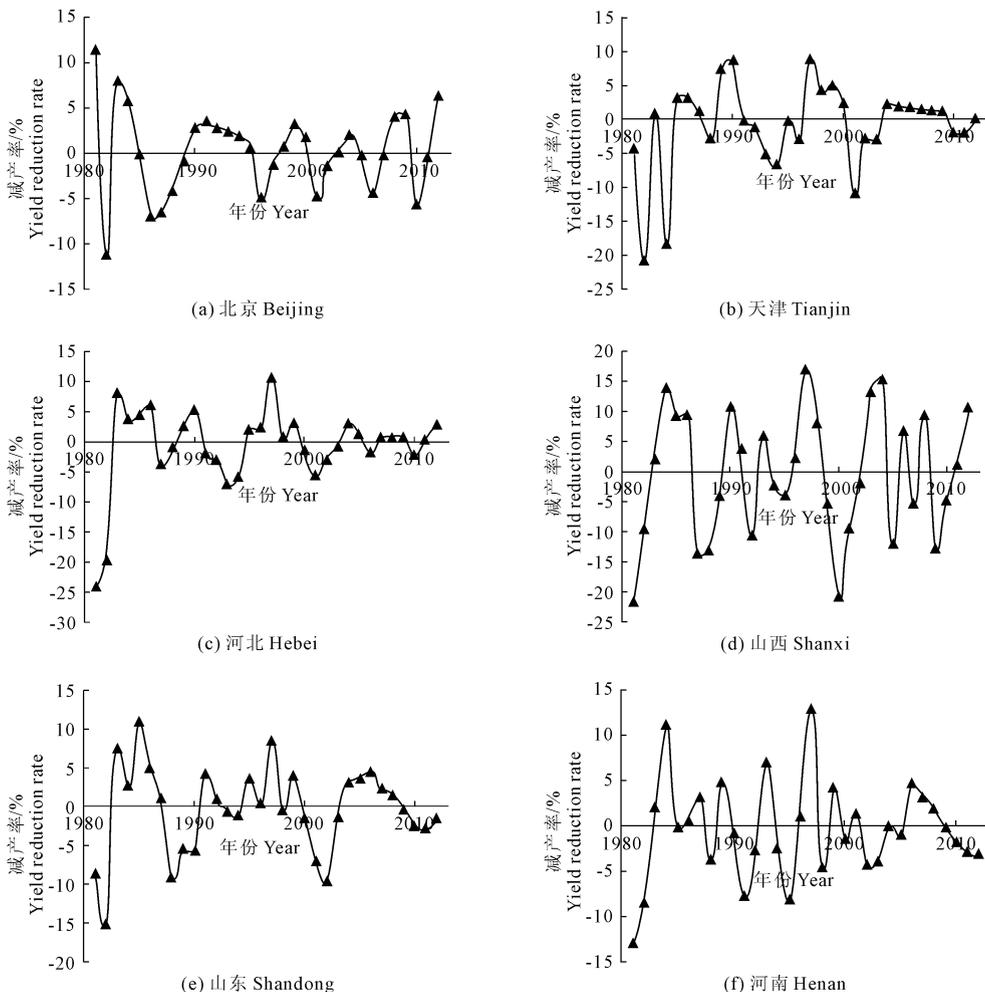


图2 北方6省市通过分离趋势产量得到的减产率

Fig.2 Yield reduction rate of winter wheat in six provinces and municipality

2.2 关键致灾因子筛选

从全生育期和不同生育期典型干旱年份不同站点冬小麦减产率与致灾因子的关系(表 3)可以看出,在大部分生育期内,冬小麦减产率与降水距平百分率达到显著相关,但在越冬、返青和拔节期没有达

到显著性水平,这主要是由于没有考虑冬小麦需水的情况。而在全生育期和不同生育期减产率与 CWDIa 的相关系数普遍高于降水距平百分率,且均达到 0.05 的显著性水平。因此,以 CWDIa 作为冬小麦干旱致灾因子。

表 3 不同生育期减产率与致灾因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between yield reduction rate for winter wheat and factors

因子 Factor	苗期 Seedling stage	越冬期 Wintering stage	返青期 Regreening stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturation stage	全生育期 Whole growth stage
CWDIa	0.527*	0.355*	0.334*	0.455*	0.497*	0.426*	0.656*
P_a	0.373*	0.179	0.160	0.198	0.372*	0.318*	0.506*

注: * 代表达到 0.05 的显著性水平。

Notes: *, significant at the level of $P < 0.05$.

2.3 冬小麦干旱指标

利用典型干旱年份建立的冬小麦减产率与 CWDIa 回归模型(表 4)均达到了 0.05 的显著性水平。在不同生育期内,从冬小麦减产率与 CWDIa 的回归模型拟合效果可以看出,相比于其他生育期,越冬期和返青期的拟合系数较小,这与不同生育期的水分敏感系数的分配相一致。将全生育期减产率按照

5% ~ 10%、10% ~ 20%、20% ~ 30%、 $\geq 30\%$ 分别对应轻度、中度、重度、特重减产,基于全生育期减产率与 CWDIa 的回归模型,得到轻度、中度、重度、特重干旱的 CWDIa 临界值分别为:0.149、0.171、0.215、0.259。同样,基于不同生育期冬小麦减产率与 CWDIa 的回归模型,按相应的减产率分级可以得到不同生育期干旱等级指标(表 4)。

表 4 冬小麦生育期干旱等级指标

Table 4 Drought grade index during different period for winter wheat

生育期 Growth stage	方程 Equation	R^2	轻度干旱 Light drought	中度干旱 Medium drought	重度干旱 High drought	特重干旱 Heavy drought
全生育期 Whole growth stage	$y = 0.0044x + 0.1268$	0.3722	0.149 ~ 0.171	0.171 ~ 0.215	0.215 ~ 0.259	≥ 0.259
苗期 Seedling stage	$y = 0.0991x + 0.2121$	0.4462	0.297 ~ 0.383	0.383 ~ 0.553	0.553 ~ 0.724	≥ 0.724
越冬期 Wintering stage	$y = 0.1598x + 0.3178$	0.1347	0.351 ~ 0.383	0.383 ~ 0.449	0.449 ~ 0.515	≥ 0.515
返青期 Regreening stage	$y = 0.0725x + 0.1922$	0.2282	0.214 ~ 0.235	0.235 ~ 0.278	0.278 ~ 0.321	≥ 0.321
拔节期 Jointing stage	$y = 0.0202x + 0.1416$	0.2152	0.159 ~ 0.176	0.176 ~ 0.210	0.210 ~ 0.244	≥ 0.244
抽穗期 Heading stage	$y = 0.0202x + 0.2842$	0.3036	0.316 ~ 0.347	0.347 ~ 0.410	0.410 ~ 0.473	≥ 0.473
成熟期 Maturation stage	$y = 0.0957x + 0.4568$	0.1646	0.547 ~ 0.638	0.638 ~ 0.820	0.820 ~ 1.001	≥ 1.001

2.4 冬小麦干旱风险评估

在 Arcgis 中,将冬小麦全生育期干旱风险指数按自然断点法分为 3 级,对应冬小麦干旱的低风险区、中等风险区和高风险区,冬小麦干旱风险总体上从北向南逐渐减弱(图 3a)。冬小麦干旱高风险区域主要集中在天津、河北中南部和山东北部地区,中等风险地区在北京、河北中部、山东中南部、山西西南部和河南北部地区,低风险区集中在河北东北部、山西中东部和河南中南部。在冬小麦全生育期内,降水量(图 3b)从南往北减少,大部地区普遍为 150 ~ 300 mm,只有在河南南部降水量超过 300 mm,而全生育期内冬小麦需水量(图 3c)从南往北逐渐增加,一般在 250 ~ 500 mm,导致大部分地区全生育内

自然降水不能满足冬小麦生长需水,一般亏缺水量达到 100 ~ 300 mm,且水分亏缺量从南往北增加,河北东部和山东北部亏缺水量在 200 ~ 345 mm。因此,从自然降水对冬小麦需水的满足程度看,冬小麦干旱发生程度南部轻、北部重,河北东部和山东北部地区属于高风险区,这与吴东丽等^[27]研究显示冬小麦干旱较高风险区分布在环渤海的冀东南部和冀东北基本一致,且河北东部地区属于冬小麦干旱减产的高风险区^[1],南部旱灾发生频次高^[28];低风险区与刘荣花等^[29-30]研究认为低风险区包括河南西部和南部、山东东南沿海和山西中南部是基本一致的。

同样,对冬小麦不同生育期干旱风险进行分级区划(图 4),总体上各生育期内冬小麦干旱风险从南往北逐渐增加。苗期冬小麦干旱的高风险区主要

在北京、天津、河北大部、山东北部和东部部分地区;越冬期冬小麦干旱的高风险区集中在北京、天津、河北中东部和山东北部;返青期冬小麦干旱的高风险区分布在北京、天津、河北中部、山东中北部;拔节期冬小麦干旱的高风险区主要集中在天津、河北东南

部、山东中北部;抽穗期冬小麦干旱的高风险区主要在北京南部、天津、河北中南部、山东西北部;成熟期冬小麦干旱的高风险区在河北东南部、山东西部和山西西南部。

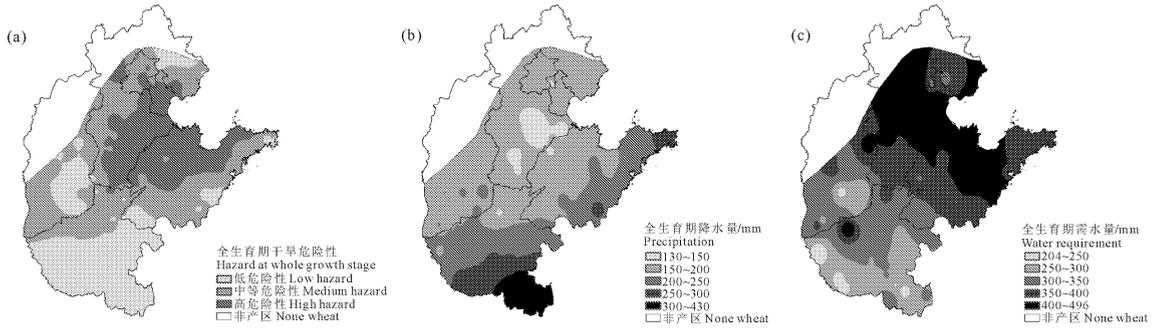


图 3 冬小麦全生育期干旱危险性与降水及需水量区划

Fig.3 Regionalization of drought risk, precipitation and water requirement for winter wheat

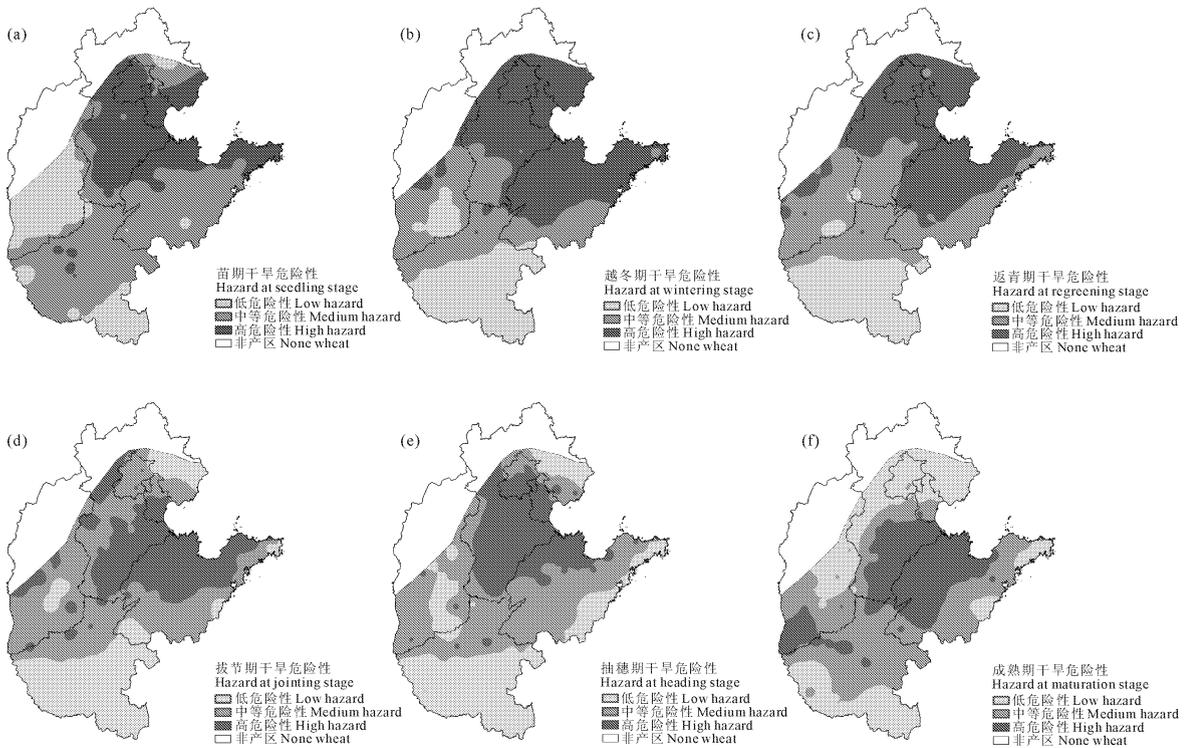


图 4 冬小麦不同生育期干旱风险区划

Fig.4 regionalization of drought risk for winter wheat during different period

从冬小麦不同生育期内自然降水和冬小麦需水情况来看,大部分地区冬小麦存在明显的水分亏缺,苗期冬小麦水分亏缺量一般为 10~50 mm,河北大部、北京、天津和山东西北部亏缺量达 25~50 mm;越冬期冬小麦需水少,水分亏缺比较少,亏缺量高的地区主要在河北东部、北京、天津和山东北部地区,亏缺量有 20~30 mm;随着冬小麦返青,对水分的需

求逐渐增加,水分亏缺逐渐加重,大部分地区水分亏缺在 10~80 mm,河北中东部、北京、天津和山东北部水分亏缺量为 40~80 mm;拔节期是冬小麦需水关键期,水分亏缺会影响冬小麦成穗数和穗粒数,此时段内各地冬小麦普遍缺水 30~100 mm,河北东部、北京、天津和山东西北部地区缺水达 70~100 mm;抽穗期冬小麦普遍缺水 20~140 mm,河北大部、

北京、天津、山东西北部缺水 70 ~ 140 mm; 进入成熟期, 水分对冬小麦的影响相对较小, 缺水较多的地区在河北东南部和山东西北部地区, 一般有 5 ~ 15 mm。因此, 在不同生育期, 河北南部和山东西北部地区均属于冬小麦干旱的高风险区, 除了自然降水对冬小麦需水满足程度弱以外, 该区自然条件相对较差, 灌溉面积较少、可利用水资源不足, 多为盐碱土壤、土壤肥力差。

3 结论与讨论

本文基于冬小麦不同生育阶段, 以冬小麦减产率等级作为划分标准, 构建了冬小麦干旱等级指标, 可以在不同阶段对冬小麦干旱程度进行动态监测分析。综合冬小麦干旱等级的强度及其风险概率, 评估冬小麦不同生育期干旱风险。在冬小麦全生育期和不同生育期干旱风险均呈现从南往北加重的趋势, 分布存在一定差异, 高风险区均包含河北南部和山东西北部地区, 这种分布与自然降水对冬小麦需水的满足程度相一致。

本文中冬小麦趋势产量拟合符合实际情况, 冬小麦产量存在明显的地域差异。其中, 山西省冬小麦单产拟合的平均相对误差明显高于其他省份, 单产波动幅度偏大, 其中有 7 a 减产率超过 10%, 明显多于其他省份(最多有 3 a), 分析发现山西省冬小麦年际间的播种面积差异较大, 播种面积的变异系数偏大(0.13), 造成冬小麦产量的不稳定, 且山西省农业自然条件具有多样性和不稳定性特点, 加上灌溉面积萎缩、用水效率低, 冬小麦生产力不高且不稳定。

基于不同的干旱指标或评估方法, 得到的冬小麦干旱风险区划结果存在一定的差异。本文在高风险区的分布上与部分已有的分析结果相一致, 但也存在一定的差异, 如本文得到全生育期内北京、天津属于高风险区, 而吴东丽等^[27]的研究中北京属于中低风险、天津属于较高风险区, 王素艳等^[31]研究认为北京、天津均属于较低风险区; 本文中河北中南部属于较高风险区, 而张文宗等^[32]研究结果为该地区属于低风险区。上述差异可能是采用了不同的风险指数, 或是针对不同区域时得到的指标有所差异所致。因此, 有必要对冬小麦研究区域进行划分, 进行精细化的区域冬小麦干旱指标构建和风险分析。

本研究中分析发现冬小麦减产率与水分亏缺距平指数的拟合系数并不高, 其原因可能是由于各地逐步采取灌溉措施, 灌溉面积不断扩大, 减轻了干旱的影响, 尽管自然降水不能满足冬小麦需水, 但采取灌溉措施之后, 冬小麦不一定减产, 这使得减产率与

水分亏缺距平指数相关性下降。因此, 有必要考虑地区灌溉措施和水利设施等防灾水平。当然, 影响冬小麦生产的农业气象灾害除了干旱外, 还有干热风、晚霜冻等, 这些灾害均会造成冬小麦减产。因此, 下一步可以开展结合孕灾和防灾能力以及多种灾害的综合风险分析。

参考文献:

- [1] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 等. 华北北部冬小麦干旱和产量灾损的风险评估[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 131-139.
- [2] Wu X L, Bao W K. Statistical analysis of leaf water use efficiency and physiology traits of winter wheat under drought condition[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(1): 82-89.
- [3] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 不同发育期干旱对冬小麦灌浆和产量影响的模拟[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1158-1165.
- [4] 谷艳芳, 丁圣彦, 高志英, 等. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1167-1173.
- [5] 朱琳, 叶殿秀, 陈建文, 等. 陕西省冬小麦干旱风险分析及区划[J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 201-206.
- [6] 霍治国, 李世奎, 王素艳, 等. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(6): 692-703.
- [7] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 华北平原冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1068-1072.
- [8] 杨小利, 吴颖娟, 王丽娜, 等. 陇东地区主要农作物干旱灾损风险分析及区划[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 83-90.
- [9] 康西言, 李春强, 代立芹. 河北省冬小麦生产干旱风险分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 232-237.
- [10] Zhang JQ. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 102(2): 133-153.
- [11] 肖晶晶, 霍治国, 金志风, 等. 冬小麦节水灌溉气象等级指标[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2521-2528.
- [12] 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.
- [13] 李艳, 王鹏新, 刘峻明, 等. 基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价Ⅲ—干旱对冬小麦产量的影响评估[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 218-222.
- [14] Guadalupe S C, Jürgen V, Alirio A, et al. Assessment of the EU-METSAT LSA - SAF evapotranspiration product for drought monitoring in Europe[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 30: 190-202.
- [15] 崔读昌, 刘洪顺. 中国主要农作物气候资源图集[M]. 北京: 气象出版社, 1984.
- [16] 温克刚, 王宗信. 中国气象灾害大典(天津卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [17] 温克刚, 谢璞. 中国气象灾害大典(北京卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [18] 温克刚, 臧建升. 中国气象灾害大典(河北卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008.

- 50-59.
- [15] 中国气象局. GB/T 20481 - 2006. 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 程玉琴, 张少文, 徐玉强. 赤峰地区夏季干旱强度预测方法研究[J]. 气象, 2010, 36(1): 49-53.
- [17] 钱锦霞, 王振华. 山西省春旱趋势及对农业的影响[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(4): 105-110.
- [18] 钱锦霞, 卫丽萍. 山西南部春旱特征分析[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(1): 180-181.
- [19] 王华兰, 赵同应, 魏宗记, 等. 黄土高原旱地农业防春旱措施研究初报[J]. 中国农业气象, 1999, 20(4): 26-29.
- [20] 贺德先, 周继泽, 王晨阳, 等. 河南省麦田春旱的原因及对策[J]. 河南职业技术师范学院学报, 1992, 20(4): 22-28.
- [21] 张建军, 盛绍学, 王晓东. 安徽省夏玉米生长季节干旱时空特征分析[J]. 干旱气象, 2014, 32(2): 163-168.
- [22] 姚永明, 陈玉琪, 张啟祥, 等. 淮北夏玉米生育期气候资源特点和增产栽培技术[J]. 中国农业气象, 2009, 30(Z2): 205-209.
- [23] 陈素英, 张喜英, 刘孟雨. 玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 34-37.
- [24] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 94-96, 116.
- [25] 王 昕, 贾志宽, 韩清芳, 等. 半干旱区秸秆覆盖量对土壤水分保蓄及作物水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 196-202.
- [26] 姜凯喜, 刘建洲, 钟晓玲, 等. 旱地双沟覆膜集雨蓄水效果试验研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5): 155-155.
- [27] 孙 琦, 张世煌, 郝转芳, 等. 不同年代玉米品种苗期耐旱性的比较分析[J]. 作物学报, 2012, 38(2): 315-321.
- [28] 祁 宦. 夏玉米干旱综合防御技术试验分析[J]. 气象, 2004, 30(6): 52-55.
- [29] 陈立娟, 王瑞华. 伏旱对玉米生长的影响及防御对策[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(7): 57-58.
- [30] 王位泰. 干旱与冬小麦和玉米产量关系的分析[J]. 中国农业气象, 2002, 23(3): 27-30.
- [31] 郭海英, 赵建萍, 黄 斌, 等. 冬小麦生产年土壤水分变化及其对农业生产影响分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 246-248, 252.
- [32] 科学技术部. 农业抗旱减灾实用技术手册(小麦篇)[M]. 北京: 科学技术出版社, 2009: 30-46.
- [33] 王同花, 李援农. 起垄覆膜沟播对冬小麦土壤水分利用效率及土壤温度的影响[J]. 中国农村水利水电, 2011, (1): 46-49.
- [34] 刘庆建, 高志强, 赵红梅, 等. 旱地小麦休闲期深翻覆盖配套不同播种方式对幼苗抗旱性的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(9): 946-949.
- [35] 王豫生. 青海省旱地农业区“秋雨春用”的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1984, 2(4): 22-27.
- [36] 苏艺华, 李杏桔, 庞其贞. 农机深松保墒小麦抗旱增产应用技术与推广的研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1): 161-164.
- [37] 李友军, 段变芳, 闫兴斌, 等. 旱地小麦抗旱播种方式研究[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 21-26.
- [38] 刘庚山, 安顺清, 吕厚荃, 等. 华北地区不同底墒对冬小麦生长发育及产量影响的研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(增刊): 170-177.
- [39] 徐玉花, 吴俊祥, 范志军, 等. 秋冬季初春连旱对冬小麦产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(14): 7420-7422.
- [40] 王祝荣, 聂新富. 顶凌破雪碎土保墒技术[J]. 新疆农机化, 1998, (1): 19-19.
- [41] 张秉祥. 河北省冬小麦干旱预测技术研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 231-235, 246.
- [42] 勾芒芒, 李 兴, 程满金, 等. 北方半干旱区集雨补灌技术与灌溉制度研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, (6): 95-98.
- [43] 李玉中, 王春乙, 程延年. 农业防旱抗旱减灾工程技术与应用[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 85-88, 95.
- [44] 姜凯喜, 刘建洲, 钟晓玲. 旱地双沟覆膜集雨蓄水效果试验研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5): 155-158.
- [45] 山 仓. 科学应对农业干旱[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 1-5.

(上接第 280 页)

- [19] 温克刚, 庞天荷. 中国气象灾害大典(河南卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [20] 温克刚, 刘庆桐. 中国气象灾害大典(山西卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [21] 温克刚, 王建国, 孙典卿. 中国气象灾害大典(山东卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [22] 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.
- [23] 霍治国, 刘荣花, 姜 燕, 等. QX/T 81 - 2007. 小麦干旱灾害等级[S]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [24] Li X K, Huang S X, Zhou J M, et al. Study on POPs emissions prediction based on GM(1,1) model[J]. Fuzzy Information and Engineering, 2009, 62: 1639-1644.
- [25] Jone L J. Inverting the Hodrick - Prescott Filter[J]. Computational Economics, 2002, 20: 117-138.
- [26] 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): 1-3, 8.
- [27] 吴东丽, 王春乙, 薛红喜, 等. 华北地区冬小麦干旱风险区划[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 0760-0769.
- [28] 吴荣军, 史继清, 关福来, 等. 干旱综合风险指标的构建及风险区划—以河北省冬麦区为例[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 145-152.
- [29] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 华北平原冬小麦干旱区划初探[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 140-144.
- [30] 刘荣花, 王友贺, 朱自玺, 等. 河南省冬小麦气候干旱风险评估[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 1-4.
- [31] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 等. 北方冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 作物学报, 2005, 31(3): 267-274.
- [32] 张文宗, 赵春雷, 康西言, 等. 河北省冬小麦旱灾风险评估和区划方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 10-15.