

基于产量灾损的冬小麦干热风综合风险区划

成 林^{1,2}, 张志红^{1,2}, 方文松^{1,2}

(1. 中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 河南 郑州 450003; 2. 河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003)

摘 要:利用河南省 118 个县气象站逐日气象资料、作物耕地面积和灌溉面积等资料,30 个农业气象观测站产量、产量结构及作物发育期资料,通过分解气象产量和假设千粒重期望值的方法,提取出了灌浆期气象产量,考虑减产风险概率、千粒重变异系数等指标,构建了干热风产量灾损风险指数。将产量灾损风险与灾害气候风险区划结果相结合,制定了干热风灾害综合风险区划。结果表明:提取的灌浆期气象产量呈正态分布,各代表站干热风发生年份的平均减产率为 7.4%;干热风产量灾损的低风险区占全区域的 43.3%,中度风险区占 36.7%,高风险区占 20%。襄城、方城、西平和驻马店等地干热风灾害综合风险指数均在 0.5 以上,是产量灾损高风险与气候高风险的重叠区,低风险区位于伊川、南阳、郑州、太康和淮河以南大部。

关键词:冬小麦;干热风;灌浆期;产量灾损;风险区划

中图分类号:S512.1⁺1;S424 **文献标志码:**A

Comprehensive risk zoning of dry-hot wind on winter wheat based on yield loss

CHENG Lin^{1,2}, ZHANG Zhi-hong^{1,2}, Fang Wen-song^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique in Henan Province/
China Meteorological Administration, Zhengzhou, Henan 450003, China;
2. Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Studying the risk of damage caused by agrometeorology disaster has important significance for scientifically defending the disasters. The information including daily meteorology data, area information such as crop planting and irrigation, et al, for 118 counties, as well as yield, yield structure, and crop developmental phases at 30 agrometeorological observation stations were used. By resolving the meteorological yield and assuming an expected value for 1000-kernel weight, the meteorological yield of grain filling stage was separated, and then, indexes as risk index of yield reduction, variable coefficient of 1000-kernel weight, et al, were considered, the index of yield loss risk of dry-hot wind was established. The outcome of yield loss risk and climatic risk of dry-hot wind were integrated to zone the comprehensive hazard risk. The results showed that: the extracted meteorological yield of grain filling stage showed normal distribution, the average loss rate for the years of the hazard was 7.4% at the representative stations. The low risk area of yield loss including 43.3% of the whole stations, 36.7% and 20% for middle and high risk areas, respectively. The high value of comprehensive risk index, which was more than 0.5, distributed at Xiangcheng, Fangcheng, Xiping and Zhumadian, et al, where the high value of yield loss risk and climatic risk overlapped. The low risk region was located at Yichuang, Nangyang, Zhengzhou, Taikang and most of south of Huai-River in the Province.

Keywords: winter wheat; dry-hot wind; grain filling state; yield loss; risk division

冬小麦是我国最重要的粮食作物之一,保证冬小麦产量水平稳定对我国粮食安全有重要意义。

干热风是对北方冬小麦生长后期灌浆攻籽威胁最严重的农业气象灾害,在冬小麦几个月的生长过程中,往往持续几天的干热风天气,就可导致冬小麦灌浆异常,粒重大幅降低,严重的可减产 10% 以上^[1]。虽然气候变化背景下不同区域干热风灾害发生格局有一定差异,如黄淮局部干热风灾害的强度、频率与上世纪六、七十年代相比整体趋于减弱^[2-5],河套平原、西北等麦区干热风灾害却随气候干暖化危害加重^[6-7],但进入 21 世纪以来,北方干热风频率、天数和范围均有增加趋势^[8-9],2004、2007、2013 等年份,均有较大范围的干热风灾害发生,尤其 2017 年 5 月我国冬小麦主产区河南、河北和山东省多次出现大范围重度干热风天气,受灾明显的河南省西部、南部部分麦区小麦成熟期明显提前,丘陵岗地小麦千粒重大幅减少。因此,干热风是农业防灾减灾管理中不可忽视的灾害。

开展灾害风险研究可为农业气象灾害风险管理提供基础与核心支撑^[10]。我国研究学者早已意识到干热风的危害性,在灾害指标、防御措施等方面已有较为成熟的研究成果^[11-13]。但与干旱、晚霜冻等其他灾种相比,干热风灾害风险研究成果相对较少,如杨霏云等^[4]通过构建干热风强度风险指数、综合抗灾指数等对华北冬小麦主产区干热风灾害风险进行了评估;李香颜等^[14]利用层次分析法制定了河南省冬小麦干热风灾害风险区划。专门针对干热风产量灾损的研究更不多见,主要原因是干热风的影响时段比冬小麦的生育期短,灾害造成的产量损失易被掩盖,也不易从生长前期多种不利因素中分离出来。干热风风险研究成果的匮乏不利于充分认识灾害的危害程度,更不能满足现代农业生产对风险管理的要求。因此,研究干热风影响下的产量灾损风险,是全面综合认识灾害风险和准确评估灾害损失的必然要求,对提高防灾减灾工作的针对性有重要意义。

本文通过提取灌浆期气象产量与干热风灾害典型年结合的方法,对河南省冬小麦干热风灾害引起的产量灾损进行提取分析,开展全省产量灾损风险区划研究,并与气候风险区划成果相结合,得到干热风灾害风险的综合区划结果,为农业防灾减灾提供技术支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文所用的河南省 118 个县地面气象观测站(分布图略)1981–2014 年冬小麦灌浆期逐日气象

数据,30 个农业气象观测站(分布见图 1)1981–2014 年冬小麦发育期观测资料及作物观测地段产量和产量结构分析数据均来源于河南省气象局。各县小麦历年播种面积、耕地面积及灌溉面积资料源于河南省统计部门。

干热风灾害指标参考中华人民共和国气象行业标准(QX/T 82–2007)^[15]中规定的灾害等级。

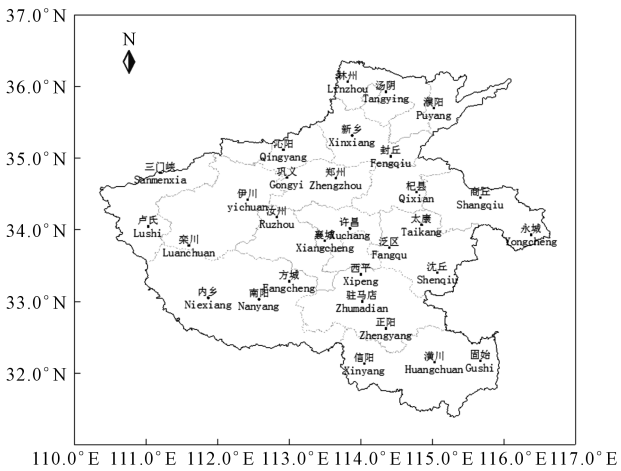


图 1 河南省农业气象观测站分布

Fig.1 Distribution of agrometeorological observation stations in Henan Province

1.2 干热风灾害气候风险区划

农业气象灾害的气候风险区划已有相对成熟的方法可以借鉴,重点考虑气象灾害发生的危险性特征,通常用不同等级灾害发生的强度与其概率的乘积来表达^[16-18]。干热风灾害气候风险区划指数用 D 表示:

$$D = \sum_{i=1}^n W_i \times d_i \times p_i \tag{1}$$

式中, W_i 为干热风强度指数, d_i 为历年不同等级干热风出现的平均天数, p_i 是第 i 种干热风的发生概率, i 为强度种类, $i = 1, 2$ 。

与高温、霜冻等单因子气象灾害不同,干热风灾害由温、湿、风 3 个气象因子共同作用,为了量化表达其强度,第 i 种强度的 W 计算参考下式:

$$W = a \frac{T - T_0}{T_0} + b \frac{U_0 - U}{U_0} + c \frac{V - V_0}{V_0} \tag{2}$$

式中, a 、 b 、 c 为权重系数,根据前人研究成果^[19],分别取值 0.73、0.24 和 0.03。 T 、 U 、 V 分别为台站历年出现轻、重干热风日的平均日最高气温、14 h 平均相对湿度和 14 h 平均风速。 T_0 、 U_0 和 V_0 的取值分别为 32℃、30% 和 3 m · s⁻¹。

1.3 灌浆期气象产量提取

冬小麦单产通常可以分解成趋势产量和气象

产量,其中趋势产量随社会技术进步表现出相对固定的增长规律,可以利用数学函数进行拟合^[20];而气象产量受冬小麦不同生长发育阶段气象条件的影响,又可以看作是冬小麦抽穗前气象产量和抽穗后气象产量的和。因此,抽穗后即灌浆期气象产量用(3)式表达:

$$Y_{w2} = Y - Y_t - Y_{w1} \tag{3}$$

式中, Y 为冬小麦单产($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), Y_t 为趋势产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),在此利用三次多项式拟合。 Y_{w1} 和 Y_{w2} 分别为抽穗前气象产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和抽穗后即灌浆期气象产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。干热风造成的灾损,主要是对 Y_{w2} 的影响。

在产量构成的三要素中,穗密度和穗粒数主要由抽穗前的气象条件决定,受灌浆期气象条件的影响相对较小,灌浆期气象条件主要影响千粒重。假定 W' 为该地区千粒重的期望值, $Y_E = Q \times K \times W' \times i$,即可看作不受灌浆期气象条件影响的期望产量, i 为经济系数, W' 可用正常年份千粒重的平均值代替。用与提取 Y_t 相同的方法,从 Y_E 中分离出的气象产量即 Y_{w1} 。将 Y 、 Y_t 和 Y_{w1} 代入(1)即得 Y_{w2} 。

为便于比较,将 $Y_{w2}/Y_t \times 100\%$ 记为灌浆期相对气象产量,该值为负时表示灌浆期气象条件对产量不利,取其绝对值表示灌浆期气象产量的减产率,以下简称减产率。

1.4 干热风产量灾损风险指数构建

1.4.1 减产风险指数 虽然干热风不是冬小麦灌浆期气象产量减少的唯一原因,但干热风灾害会使减产风险增大,构建减产风险指数时,首先考虑不同减产率的风险概率:

$$R = \int_{x_1}^{x_2} f(x) \text{d}x \quad (x_1 \leq x \leq x_2) \tag{4}$$

式中, R 为风险概率, $f(x)$ 为灌浆期相对气象产量的概率分布密度函数, x_1 和 x_2 为减产率。根据灌浆期产量减少的实际情况,重点将减产率 $\geq 5\%$ 、 $\geq 10\%$ 和 $\geq 20\%$ 的概率作为评价指标。用不同减产率与对应减产概率的乘积,并对其求和来构建冬小麦灌浆期减产风险指数,用 I 表示:

$$I = \sum_{i=1}^n (J_i \times R_i) \tag{5}$$

式中, J_i 为第 i 个等级范围的减产率, R_i 为相应减产率出现的概率。

求算减产率风险概率时,要对灌浆期气象产量进行分布检验,选择合适的概率分布密度函数求算风险概率。

1.4.2 干热风年平均减产率 对出现干热风且灌

浆期气象产量为减产的年份进行筛选,求算各站干热风年减产率的算术平均值,用 Y_h 表示。

1.4.3 千粒重的变异系数 干热风灾害对冬小麦千粒重有重要影响。由于农业气象观测要求观测地段土壤肥力水平、种植习惯、品种属性和田间管理方式等相对连续和稳定,除了品种特性改变引起千粒重波动外,气象条件是引起千粒重年际间变化的重要因素。千粒重的变异系数用 V_k 表示:

$$V_k = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (W_j - \bar{W})^2}}{\bar{W}} \tag{6}$$

式中, W_j 表示第 j 年的实际千粒重, $\bar{W}$ 为多年平均千粒重。

1.4.4 干热风产量灾损风险指数 灌浆期气象产量的减产风险指数、干热风年平均减产率和千粒重变异系数均能够正向表征干热风灾害风险的高低,在此将 I 、 Y_h 、 V_k 进行极差标准化处理后,利用等权重加法模型构建干热风产量灾损风险指数 H :

$$H = I + Y_h + V_k \tag{7}$$

1.5 干热风灾害综合风险指数

干热风产量灾损风险已在一定程度上体现了农业抗灾能力、承灾体脆弱性以及冬小麦生长中后期的生产管理水平。因此构建综合风险指数时,将干热风灾害气候风险区划结果与产量灾损风险区划结果叠加,并主要考虑灾害的暴露性指标。综合风险指数用 Q 表示:

$$Q = \alpha D + \beta H + \lambda E \tag{8}$$

式中, E 代表干热风灾害的暴露性特征,用冬小麦播种面积占耕地面积的比例计算; α 、 β 、 λ 为各指标的权重系数。

采用Kringking插值法,将单点结果进行空间插值分析。

2 结果与分析

2.1 干热风灾害气候风险

根据(1)式的计算结果可以看出,河南省黄河以北大部、豫西北的洛阳北部、焦作、济源一带,豫东开封、商丘、周口局部干热风灾害气候风险较高;豫中南的许昌、驻马店大部为中度风险区;而豫西山区和中部平原局部、南阳盆地以及淮南地区干热风气候风险较低(图2)。

2.2 不同减产率的风险概率

作物产量形成过程中的不确定因素主要由气象因子波动造成,而光照、气温等气象因子大多符合正态分布,因此大多数情况下气象产量也符合正

态分布^[21]。经检验发现,利用 1.3 节的方法提取的所有站点灌浆期气象产量也有较好的正态性。图 3 中例举了河南省东、南、西、北方位的 4 个代表站点的灌浆期气象产量的正态概率图,图中纵坐标为某样本的理论分位点,即与分位数 $(i-0.5)/n$ 相匹配的正态分布值, i 为把一组数从小到大排序后第 i 个

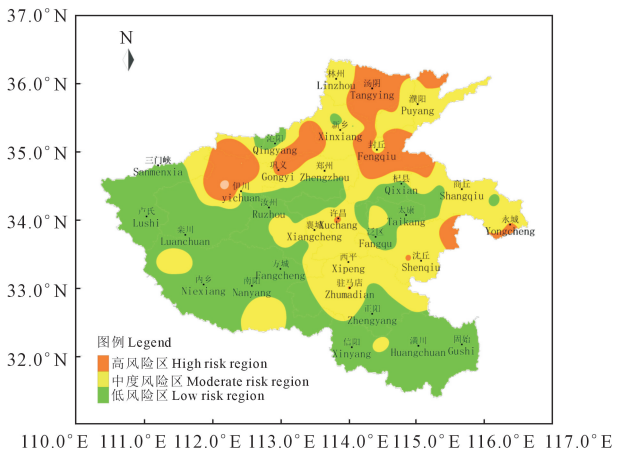


图 2 河南省冬小麦干热风灾害气候风险区划
Fig.2 Distribution of climatic risk of dry hot wind hazard

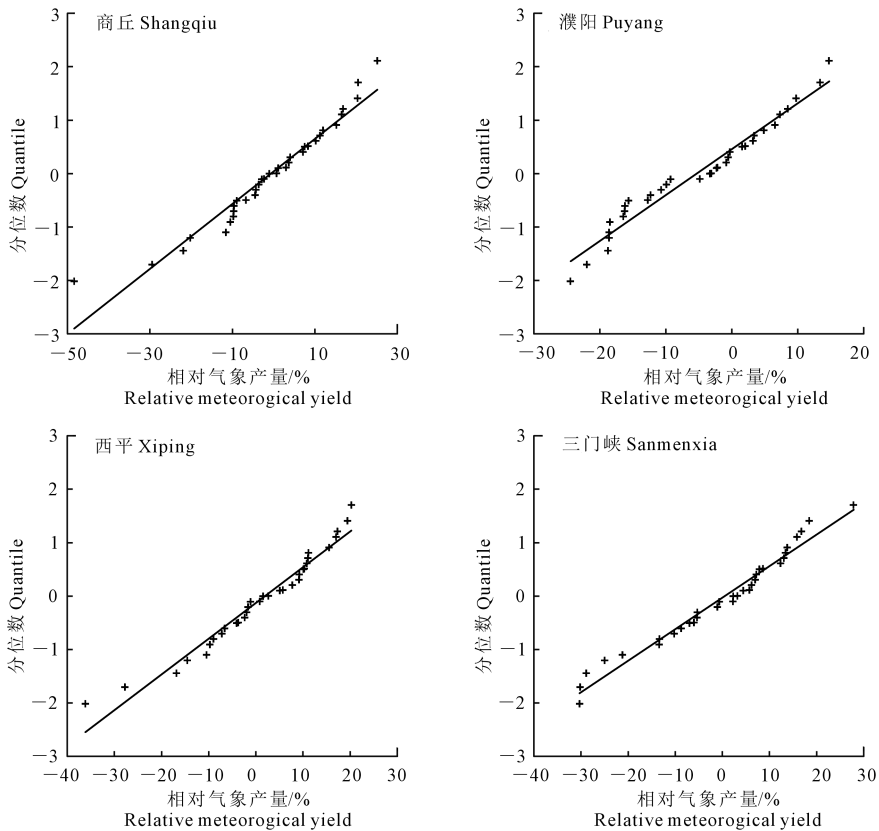


图 3 代表站点灌浆期相对气象产量的正态概率
Fig.3 Normal distribution plot of relative meteorological yield for grain filling stage at representative stations

数据的位置, n 为样本容量^[22]。可见提取的灌浆期相对气象产量与期望值极显著线性相关,表明资料呈显著的正态分布特征。

因此求算减产概率时利用样本平均值 μ 代替总体数学期望,用样本均方差 σ 代替总体方差,利用正态分布函数构建灌浆期相对气象产量的概率分布密度函数(方程略)。利用(4)式计算不同减产率的风险概率,结果见图 4。灌浆期气象产量减产率 $\geq 5\%$ 的高风险区(主要分布在豫东北濮阳、封丘以及南阳地区大部驻马店西部和信阳地区大部),风险概率达 30%以上,全省大部分区域的风险概率为 20%~30%。豫东北、豫西地区也是减产率 $\geq 10\%$ 的高风险区,风险概率在 20%以上,濮阳地区达 30%以上,其他大部分区域的风险概率为 10%~20%。减产率 $\geq 20\%$ 的高风险区,主要集中在豫北林州、豫东杞县、商丘,豫西西部,以及豫中的汝州、方城、驻马店、襄城一带,其风险概率在 8%以上;除了豫北汤阴、豫中郑州、许昌,豫西南南阳局部以及信阳大部等地以外,其他各地减产率 $\geq 20\%$ 的风险概率在 4%~8%之间。

2.3 减产风险指数分布

图 5 为归一化处理后的减产风险指数空间分布,从图中可见,豫南固始地区是全省减产风险指数最低的区域;而豫北濮阳、林州,豫西三门峡、卢氏,以及豫南方城地区是灌浆期气象产量减产的高

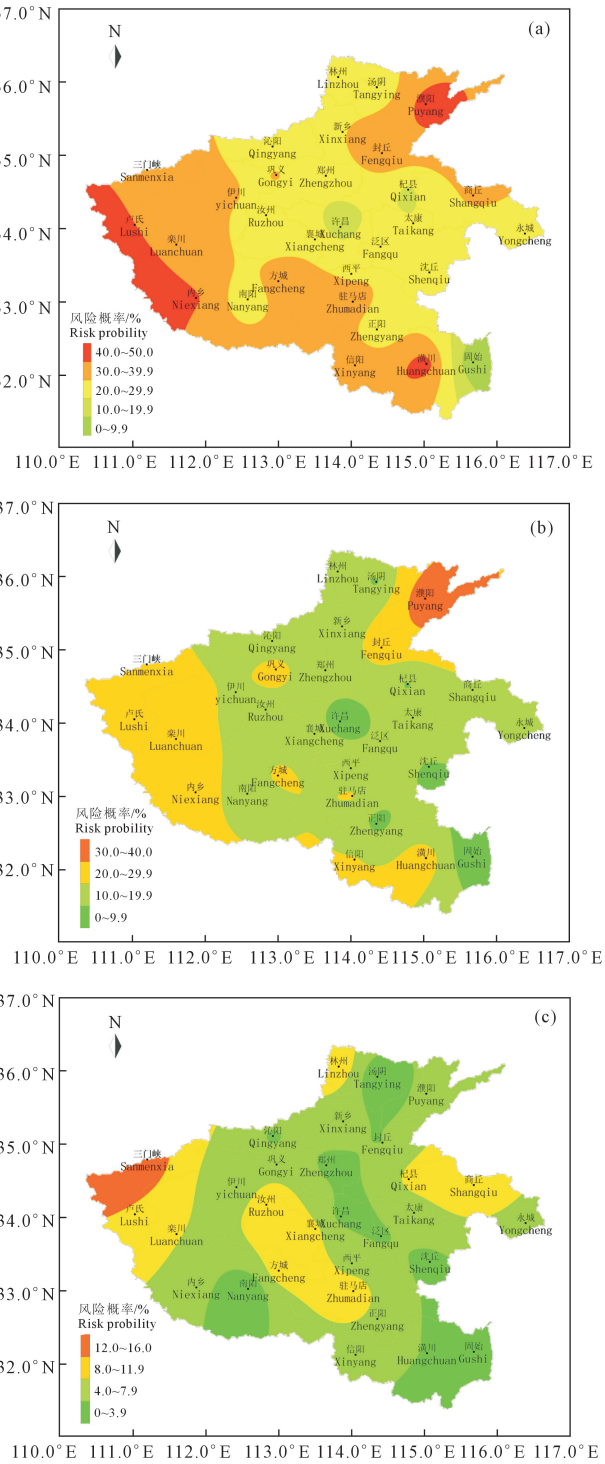


图 4 减产率 $\geq 5\%$ (a)、 $\geq 10\%$ (b) 和 $\geq 20\%$ (c) 的风险概率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the probability risk for yield reduction greater than or equal to 5% (a)、10% (b) and 20% (c)

风险区,减产风险指数大于 0.8;豫东北大部,京广线以西大部减产风险指数在 0.5~0.8 之间,为次高风险区,其他地区减产风险在 0.2~0.5 之间。

2.4 干热风灾害年减产率分布

干热风灾害造成减产的主要原因是千粒重的降低,图 6 为各研究站点干热风出现年份千粒重减少率与提取的减产率的相关关系图,可以看出二者围绕在 1 : 1 线周围,相关系数达 0.8025,表明提取的灌浆期气象产量能够反映出冬小麦生长后期受气象条件的影响,得出的产量灾损基本可以体现冬小麦受灾情况。

出现干热风的年份中,灌浆期减产率较高的区域主要集中在河南省东北部、中南部以及豫东的部分地区,减产率在 8% 以上,其中濮阳、泛区和方城地区减产率在 12% 以上。豫西山区小麦产量受干热风影响较小,平均减产率在 4% 以下,全省其他大部分地区平均减产率在 4%~8% 之间,平均值为 7.4% (图 7)。

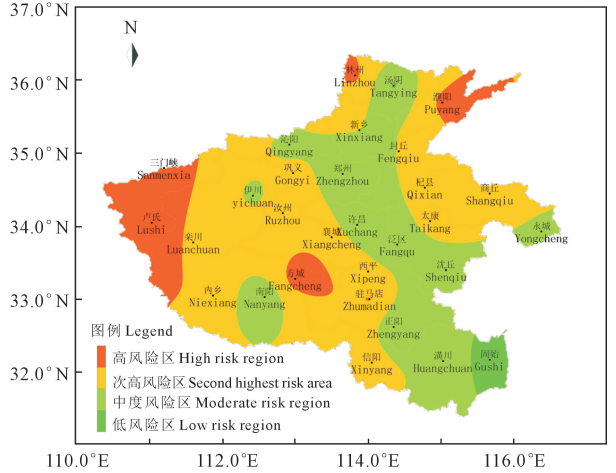


图 5 干热风减产风险指数分布

Fig.5 Distribution of index of yield reduction risk by dry-hot wind

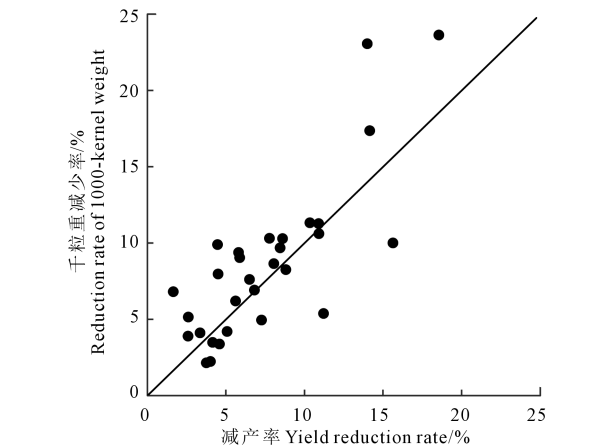


图 6 干热风年减产率与千粒重减少率散点图

Fig.6 Scatter plot between reduction rate of yield and 1000-kernel weight

2.5 千粒重变异系数的空间分布

由图 8 可以看出,豫东北平原局部冬小麦千粒重相对稳定,变异系数小于 0.13;豫西卢氏、栾川地区冬小麦千粒重相对低,变化率也较小。而在豫中南部,冬小麦千粒重易受多种因素影响,千粒重波动较大,变异系数在 0.19 以上,是全省冬小麦千粒重的主要不稳定区。全省其他大部分地区冬小麦千粒重的变异系数在 0.13~0.16 之间。

2.6 干热风产量灾损风险指数分布

根据(7)式的计算结果,全省的产量灾损风险指数在 0.688~2.703 之间,为了使产量灾损风险类型有序,且便于与干热风灾害的气候风险结合分析,对 D 进行归一化处理,并划定 $D \leq 0.25$ 为低风险区, $0.25 < D \leq 0.5$ 为中度风险区, 0.5 以上为高风险区,空间分布结果见图 9。

由图中可见,黄河以北局部、豫中郑州、许昌,豫西伊川,西南部的南阳,以及东南部局部是干热风产量灾损的低风险区,占全部研究区的 43.3%。风险较低的主要原因是这些区域小麦千粒重变异系数小,灌浆期减产风险指数相对较低。

中度风险区站点比例为 36.7%,包涵了广大的东部平原区和南阳盆地局部,如产量大县的商丘、太康县、泛区、内乡县等,也包括西部浅山区,这些地区小麦灌浆期易受灾害影响,千粒重易波动,减产风险指数多在 0.5~0.8 之间。

高风险区占总研究区的 20%,其中:林州、三门峡等非灌浆农业区,减产风险指数在 0.8 以上,是产量灾损风险高的重要因素;濮阳以及方城、西平、驻马店农业灌浆农区的减产风险指数也在 0.5 以上,且出现减产率 $\geq 20\%$ 的风险概率较高,出现干热风的平均减产率达 8%以上,易出现重灾损失,也是产量灾损的高风险区,需重点防范。

2.7 包含产量灾损的河南省冬小麦干热风灾害综合风险

将图 10 与图 2 对比可知,干热风气候风险较高的豫西北、豫北中部以及豫东局部地区,干热风造成的产量灾损风险并不高,而中南部地区,包括许昌南部、驻马店大部地区,干热风产量灾损风险和气候风险均较高,是冬小麦灌浆期气象灾害的重点防范区;豫东北濮阳、豫乐商丘等地区是气候风险和

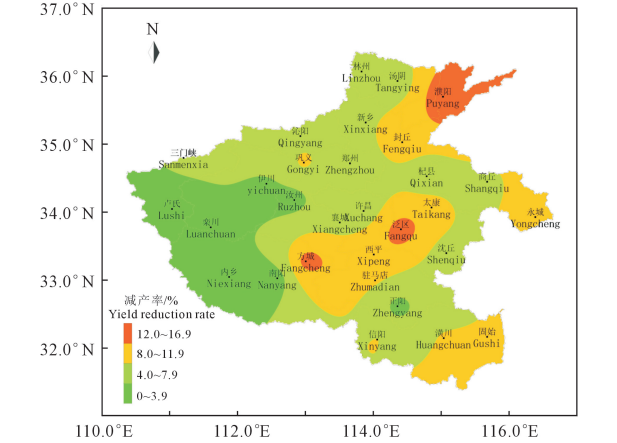


图 7 出现干热风年份的平均减产率

Fig.7 Average yield reduction rate for years by dry-hot wind

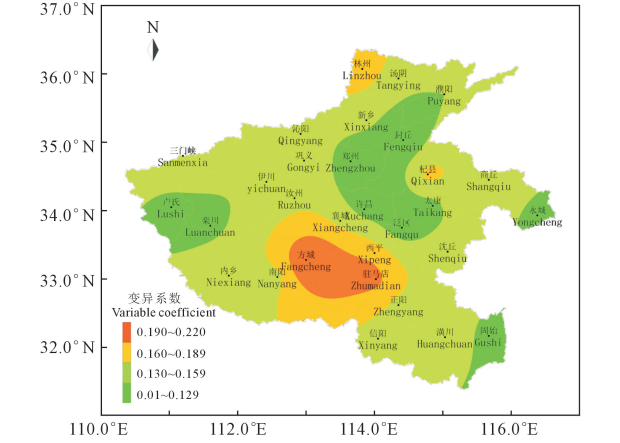


图 8 千粒重变异系数的空间分布

Fig.8 Distribution of variation coefficient for 1000-kernel weight

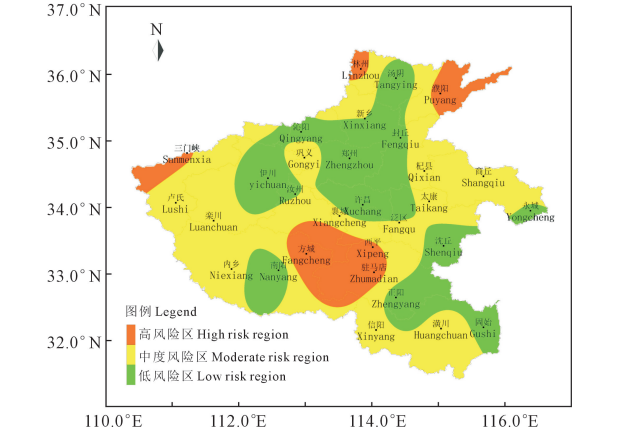


图 9 干热风产量灾损风险指数分布

Fig.9 Distribution of index of yield loss risk by dry-hot wind

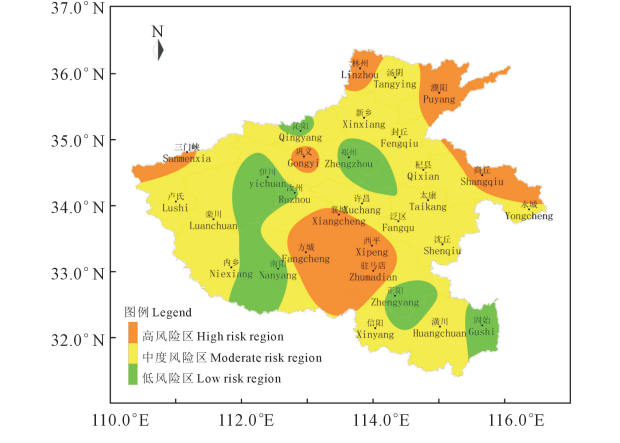


图 10 干热风灾害综合风险分布

Fig.10 Distribution of comprehensive risk of dry-hot wind

灾损风险的中度风险区,也需提高风险管理意识。

利用熵权法^[23]确定(8)式中各因子的权重系数,得 $\alpha=0.4533$, $\beta=0.4380$, $\lambda=0.1087$,干热风灾害综合风险区划结果见图 10。可以看出,考虑了产量灾损的干热风灾害高风险区主要位于河南省中南部,包括襄城、方城、西平和驻马店等地,并在林州、濮阳、巩义和商丘局部等地零星分布;低风险区位于伊川、南阳,以及豫中郑州、太康等地,淮河以南大部也属于低风险区。

3 结论与讨论

干热风灾害造成的产量灾损风险是开展灾害风险研究的重要步骤。受冬小麦生长后期麦田的土壤肥力、墒情、品种抗逆特性、田间管理水平等影响,干热风发生时的强度与造成的实际灾损并不一定相吻合,因此干热风产量灾损的提取也是干热风灾害风险研究的难点问题。本研究的创新点在于:通过假设千粒重期望值的方法,将灌浆期气象产量从全生育期气象产量中分离出来,从而提取出受干热风影响的产量灾损,并基于产量灾损风险进行了干热风灾害综合风险区划,具有更强的科学性。研究发现,河南省干热风灾害造成的平均减产率达 7%,干热风产量灾损高风险区主要位于林州、濮阳、三门峡以及豫南的方城、西平和驻马店等地,占总研究区的 20%,产量灾损风险高的主要原因是灌浆期气象产量的减产风险概率较高。

灾害的气候风险即农业气象灾害致灾因子的危险性特征,干热风灾害气候风险区划指数分析结果显示:河南省中南部的许昌、驻马店大部干热风灾害气候风险较高,这一区域与产量灾损高风险区重叠,是干热风灾害防御与风险管理的重点区域。综合来看,许昌南部、南阳东部和驻马店大部以及林州、濮阳、巩义和商丘局部等地灾害综合风险较高。

与李香颜等^[14]考虑灾害发生日数与概率构建的干热风灾害危险性指数相比,本研究中的干热风灾害气候风险还同时考虑了温度、湿度和风速三个气象因子共同作用的灾害强度,2 种方法所得的空间分布区域相似;但现有成果中未见专门针对灌浆期产量灾损提取和分析的报道,而本文以干热风灾损风险为重点开展区划研究,因此干热风综合风险的空间分布与前人成果存在一定差异。

本研究剔除了抽穗前气象条件的影响,充分考虑了承灾体受灾的产量损失风险。但仅采用数理统计方法对大样本资料进行分析,未结合灾害影响机制、千粒重变异的具体原因等因素分析产量灾损风

险,仍具有一定的片面性,因此数理统计方法与田间试验相结合的灾损提取方法^[24-25]有待进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 李香颜,张金平.基于 GIS 的河南省小麦干热风时空分布特征及危险性分析[J].气象与环境科学,2017,40(2):49-54.

[2] 陈怀亮,邹春辉,付祥建,等.河南省小麦干热风发生规律分析[J].自然资源学报,2001,16(1):59-64.

[3] 陈怀亮,张雪芬,邹春辉,等.河南省小麦青枯发生规律的 EOF 分析[J].气象科技,2005,33(增):131-135.

[4] 杨霁云,朱玉洁,刘伟昌.华北冬麦区干热风发生规律及风险区划[J].自然灾害学报,2013,22(3):112-121.

[5] 赵俊芳,赵艳霞,郭建平,等.过去 50 年黄淮海地区冬小麦干热风发生的时空演变规律[J].中国农业科学,2012,45(14):2815-2825.

[6] 邓振镛,张强,倾继祖,等.气候暖干化对中国北方干热风的影响[J].冰川冻土,2009,31(4):664-671.

[7] 屈振江,郑小华,李星敏.陕西省冬小麦干热风分布特征及预测研究[J].中国农学通报,2013,29(18):50-56.

[8] 史印山,尤凤春,魏瑞江,等.河北省干热风对小麦千粒重影响分析[J].气象科技,2007,35(5):699-702.

[9] 成林,张志红,常军.近 47 年来河南省冬小麦干热风灾害的变化分析[J].中国农业气象,2011,32(3):456-460.

[10] 许凯,徐翔宇,李爱花,等.基于概率统计方法的承德市农业旱灾风险评估[J].农业工程学报,2013,29(14):139-146.

[11] 北方小麦干热风科研协作组.小麦干热风气象指标的研究[J].中国农业科学,1983,16(4):68-75.

[12] 华北农业大学干热风科研协作组.干热风的危害和防御措施的研究概况[J].气象科技,1978,(2):26-27.

[13] 朱云林,顾大路,杨文飞.苏北地区干热风的危害与防治[J].江西农业学报,2007,19(3):116-117.

[14] 李香颜,张金平,陈敏.基于 GIS 的河南省冬小麦干热风风险评估及区划[J].自然灾害学报,2017,26(3):63-70.

[15] 霍治国,姜燕,李世奎,等.QX/T82-2007 小麦干热风灾害等级[S].北京:气象出版社,2007.

[16] 钱永兰,毛留喜,周广胜.全球主要粮食作物产量变化及其气象灾害风险评估[J].农业工程学报,2016,32(1):226-235.

[17] 徐虹,张丽娟,赵艳霞,等.黄淮海地区夏玉米花期阴雨灾害风险区划[J].自然灾害学报,2014,23(5):263-272.

[18] 张雪芬,余卫东,王春乙.基于作物模型灾损识别的黄淮区域冬小麦晚霜冻风险评估[J].高原气象,2012,31(1):277-284.

[19] 赵俊芳,赵艳霞,郭建平,等.基于干热风危害指数的黄淮海地区冬小麦干热风灾损评估[J].生态学报,2015,35(16):5287-5293.

[20] 罗蒋梅,王建林,申双和,等.影响冬小麦产量的气象要素定量评价模型[J].南京气象学院学报,2009,32(1):94-99.

[21] 邓国,王昂生,周玉淑.粮食生产风险水平的概率分布计算方法[J].南京气象学院学报,2002,25(4):481-488.

[22] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M].北京:气象出版社,2007:35-39.

[23] 张星,张春桂,陈惠,等.熵权理论在定量评价农业气象综合灾情中的应用[J].生态学杂志,2007,26(11):1907-1910.

[24] 张志红,成林,李书岭,等.我国小麦干热风灾害研究进展[J].气象与环境科学,2013,36(2):72-76.

[25] 张志红,成林,李书岭,等.干热风天气对冬小麦生理的影响[J].生态学杂志,2015,34(3):712-717.