

# 东北地区玉米主要气象灾害风险评估模型研究

高晓容<sup>1</sup>, 王春乙<sup>2</sup>, 张继权<sup>3</sup>, 温 煦<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京市通州区气象局, 北京 101100; <sup>2</sup>中国气象科学研究院, 北京 100081; <sup>3</sup>东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024)

**摘要:**【目的】农业生产过程中经常面临着一种以上气象灾害的威胁。目前, 农业气象灾害风险评估普遍是以单一灾种对承灾体的影响为研究对象, 无法反映真实气象条件下农业生产面临的综合风险; 作物在不同发育时期或发育阶段遭受气象灾害对最终产量的影响有所不同。本文以东北地区玉米为例, 研究基于作物不同发育阶段多种气象灾害风险评估方法与技术体系。【方法】将东北玉米生育期划分为播种—七叶、七叶—抽雄、抽雄—乳熟、乳熟—成熟 4 个发育阶段, 把冷害、干旱、涝害作为 3 种主要气象灾害, 利用玉米发育期、气象、土壤、作物面积和产量等多元资料, 根据自然灾害风险理论和农业气象灾害风险形成机制, 以一定区域自然灾害风险由自然灾害危险性、承灾体的暴露性和脆弱性及人类防灾减灾能力 4 个因素综合作用的“自然灾害风险四要素说”为理论依据, 在全面分析东北玉米发育阶段冷害、干旱、涝害的孕灾环境和致灾因子的危险性、承灾体的暴露性和脆弱性、人类防灾减灾能力四要素的基础上, 从风险四要素的内涵出发选取风险评价指标。采用孕灾环境多指标法, 从气象、作物、自然地理等方面选取指标全面反映发育阶段主要气象灾害的危险性; 从承灾体暴露性、脆弱性的内涵出发选取评估指标; 鉴于防灾减灾能力比较滞后的研究现状, 选用产量变异系数综合反映防灾减灾能力, 形成了比较完备的发育阶段主要气象灾害风险评价指标体系。由于农业气象灾害成因的多要素性、复杂性, 影响要素之间的模糊性和不确定性, 利用层次分析法确定发育阶段主要气象灾害风险四要素及危险性指标的权重。利用自然灾害风险指数法构建发育阶段主要气象灾害风险评估模型。利用加权综合评分法构建发育阶段主要气象灾害危险性评价模型, 发育阶段 3 种主要气象灾害频率之比作为权重系数反映不同发育阶段主要气象灾害的相对严重程度。【结果】在发育阶段主要气象灾害风险评价的基础上, 利用加权综合评分法构建作物生育期主要气象灾害风险评估模型, 根据作物减产率与 4 个发育阶段主要气象灾害风险指数的相关性调试确定各发育阶段风险指数的权重系数, 建立比较完备的基于发育阶段的主要气象灾害风险评价指标体系, 构建发育阶段主要气象灾害风险评价模型、发育阶段主要气象灾害危险性评价模型及生育期主要气象灾害风险评价模型, 进而初步建立了东北玉米基于发育阶段的多种农业气象灾害风险评价技术体系。【结论】对东北典型全域灾害年份及代表站点主要气象灾害典型年份关键发育阶段主要危险性指标与减产率的分析表明, 发育阶段主要气象灾害危险性指标的选取是合理的。

关键词: 东北玉米; 冷害; 干旱; 涝害; 风险评估

## A Risk Assessment System of the Main Meteorological Disasters for Maize in Northeast China

GAO Xiao-rong<sup>1</sup>, WANG Chun-yi<sup>2</sup>, ZHANG Ji-quan<sup>3</sup>, WEN Xu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Tongzhou District Meteorological Bureau of Beijing, Beijing 101100; <sup>2</sup> Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; <sup>3</sup> College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024)

**Abstract:** 【Objective】 Agricultural production is often threatened by several meteorological disasters. Presently, the risk

收稿日期: 2013-05-02; 接受日期: 2013-07-13

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAD32B00) 国家自然科学基金(41071326)

联系方式: 高晓容, E-mail: gaoxiaorong666@126.com. 通信作者王春乙, E-mail: wcy@cms1924.org

assessment of agro-meteorological disasters often focuses on the influence of single meteorological disaster on disaster-affected body, not exactly reflecting the comprehensive risks faced by agriculture under real meteorological conditions. Meteorological disasters occurred at different crop growth stages have different influences on the final crop yield. In this paper, maize in Northeast China is used as an example to study risk assessment method and technology aiming at meteorological disasters at different crop growth stages. 【Method】 The whole growth period of maize in Northeast China was divided into four growth stages, namely sowing to seven-leaf, seven-leaf to tasseling, tasseling to milky ripening and milky ripening to maturation, and chilling, drought and flood are regarded as the three main meteorological disasters. Then with data on maize development record, meteorology, soil, crop sown area and yield, etc., and in accordance with the theory of natural disaster risk, the formation mechanism of agro-meteorological disaster risk and the “Four Elements” causing natural disaster risk, namely the natural disaster risk in certain area is caused by four factors, including hazard of the natural disaster, exposure and vulnerability of the disaster-affected body and the disaster prevention and mitigation capacity of human beings, the four elements for Northeast China’s maize of each growth stage were comprehensively analyzed, and risk assessment indices were selected thereby. Multi-indexes method for environment causing the disaster was adopted to select indices on meteorology, crops, physical geography, etc. in order to fully reflect hazard of the main meteorological disasters of each growth stage; assessment indices were selected according to the connotation of exposure and vulnerability of disaster-affected body; based on the relative lag situation of disaster prevention and mitigation, variation coefficient of yield was used to comprehensively reveal the preventing and mitigating capability, and a fairly complete index system of the main meteorological disasters risk assessment was developed. Owing to multiple and complicated factors causing agro-meteorological disasters and the fuzziness and uncertainty of such indices, analytic hierarchy process (AHP) was used to judge the weights of “Four Elements” and the hazard factors for each growth stage. The main meteorological disasters risk assessment model for each growth stage was established using natural disasters risk index method. The main meteorological disasters hazard assessment model was built by adopting synthetic weighted mark method, and the weight coefficients were determined by the ratio of the frequency of the three main meteorological disasters in each growth stage, reflecting the relative seriousness of the main meteorological disasters. 【Result】 Based on the risk assessment of the main meteorological disasters in each growth stage, the model of the main meteorological disasters risk assessment of the whole growth period was established using synthetic weighted mark method, and the weight coefficients of risk indices for each growth stage were determined according to correlation relationship between yield reduction rate and the main meteorological disasters risk indices. A fairly complete index system of the main meteorological disasters risk assessment based on the crop growth stages was established, the models of the main meteorological disasters risk assessment and of hazard assessment for each growth stage were developed, and the model of the main meteorological disasters risk assessment for the whole crop growth period was also constructed. Multiple agro-meteorological disaster risk assessment technology system based on Northeast China’s maize growth stages was established basically. 【Conclusion】 The analysis of hazard indices and yield reduction rate in the key development stage of the research stations in the typical widespread disaster years and of the representative stations in the typical disastrous years in Northeast China showed that the main meteorological disasters hazard indices were well selected.

Key words: maize in Northeast China; chilling damage; drought; flood; risk assessment

## 0 引言

【研究意义】东北地区是中国玉米主产区和重要的商品粮基地,由于其地理纬度较高,积温不足,且生长季热量的年际波动较大,玉米在生长过程中极易受到低温冷害的影响<sup>[1-5]</sup>;同时,东北地区降水量地域间差异较大,年际波动亦较大,极易遭受旱涝灾害<sup>[6-7]</sup>。冷害、干旱、涝害是该地区影响玉米产量的主要气象灾害,是造成该地区玉米产量不稳定的主要因素。因此开展东北地区玉米主要气象灾害风险评价体系与方法研究,对于防灾减灾、保障国家粮食安全具有十分重要的现实意义。【前人研究进展】目前,国内外农

业气象灾害风险研究主要集中在以下 3 个方面:一是基于农业气象灾害发生可能性或灾害频率的概率风险评价,利用概率或超越概率分析不同灾情损失程度的概率风险或者利用灾害指标识别灾害事件在某一区域发生的概率及产生的后果<sup>[8-15]</sup>。其中薛昌颖等<sup>[8]</sup>利用减产率变异系数、平均减产率和减产率概率几个指标评价了河北及京津地区冬小麦产量灾害损失的风险水平;袁祝香等<sup>[10]</sup>利用 5—9 月平均气温的变异系数、正态分布风险概率、冷害强度等指标评估了东北地区低温冷害的概率风险;马树庆等<sup>[12]</sup>利用东北各地 5—9 月平均气温和的变异系数分析一般冷害、严重冷害的风险概率;李娜等<sup>[15]</sup>研究了华南地区香蕉、荔枝寒

害的风险概率。概率风险法虽然简单易行,但不能反映农业气象灾害风险的形成机制和影响因素。二是研究农业气象灾害的致灾因子危险性或承灾体脆弱性<sup>[16-21]</sup>。Hao 等<sup>[16]</sup>把干旱频率、强度作为危险性指标对中国 583 个农业气象观测站的干旱损失进行评估;陈晓艺等<sup>[17]</sup>利用干旱强度和频率评估安徽省冬小麦的干旱危险性;Wilhelmi 等<sup>[18]</sup>分别利用气候、土壤、土地利用及灌溉条件等因子评价了美国内布拉斯加州农业旱灾脆弱性;刘兰芳等<sup>[19]</sup>从生态环境、社会经济方面选取降水量、蒸发量、水利化程度等 9 个指标评估了湖南省农业干旱脆弱性;Simelton 等<sup>[20]</sup>、Fraser 等<sup>[21]</sup>认为技术、资金等社会经济因素是中国东部主要粮食作物干旱脆弱性的主要因子。三是根据自然灾害致灾机理,利用合成法对影响灾害风险各因子进行组合建立灾害风险指数<sup>[22-25]</sup>。Ngigi 等<sup>[22]</sup>利用连续无雨日数、土壤水分、作物产量及经济因子评估了肯尼亚 Laikipia 地区的干旱风险;Zhang<sup>[23]</sup>选取干旱频率、强度、持续时间、受灾面积和作物生产水平几个指标评价了中国松辽平原的玉米干旱风险;Shahid 等<sup>[24]</sup>利用危险性与脆弱性之积的方法评价孟加拉国的干旱风险;Zhang 等<sup>[25]</sup>利用可变模糊集模型从危险性、脆弱性、暴露性和抗灾能力几个方面对辽宁省农业干旱风险进行了评估。【本研究切入点】目前农业气象灾害风险评估研究仍然存在着很多不足,普遍以单一灾种对单一承灾体的影响为研究对象,而农业生产过程中经常面临一种以上气象灾害的威胁,迄今农业气象灾害风险评价尚未涉及多种气象灾害,无法反映实际气象条件下农业面临的真实风险。大多数研究基于灾害频率的致灾可能性或对影响灾害风险的不全面的几个因子进行组合构建风险指数,不能准确反映农业气象灾害风险的形成机理和影响因素。作物在不同发育期或发育阶段遭受气象灾害对最终产量的影响都会不同<sup>[26-27]</sup>,现有研究基本是基于作物生育期,少有区分灾害发生在哪个发育期或发育阶段,以及贯穿作物发育全过程的风险评估。【拟解决的关键问题】本文在前人农业气象灾害风险评价研究的基础上,探索作物不同发育阶段多种气象灾害风险评价方法。以东北地区玉米为研究对象,把冷害、干旱、涝害作为主要气象灾害,利用玉米发育期、气象、土壤、作物面积和产量等多元资料,根据自然灾害风险理论和农业气象灾害风险形成机理,研究东北玉米主要气象灾害风险评价指标体系及评价模型,构建东北玉米主要气象灾害风险评价体系,为有关部门调整农业结构及

制定防灾减灾对策和措施提供理论依据。

## 1 资料来源及处理

选取辽宁、吉林、黑龙江 3 省 48 个农业气象观测站为研究站点,所用资料:(1) 1961—2010 年逐日气象资料(温度、降水量、风速、日照时数等)来自国家气象信息中心资料室;1961—2010 年 10 km × 10 km 网格逐日温度资料来自国家气象中心。(2) 1980—2010 年玉米发育期资料来自国家气象信息中心资料室。(3) 农业气象观测站所在行政县(市)2004 年耕地面积及 1961—2010 年玉米种植面积、产量资料来自各省统计年鉴。(4) 土壤类型来自农业气象观测站的土壤观测资料。

联合国粮农组织(FAO)建议将作物生育期划分为初期、发育期、中期、后期 4 个阶段<sup>[28]</sup>,结合玉米的生理生长特点,本文把玉米生育期划分为 4 个发育阶段:阶段 1 为播种—七叶,阶段 2 为七叶—抽雄,阶段 3 为抽雄—乳熟,阶段 4 为乳熟—成熟。发育期采用当地发育期的一般日期,即多年发育期的平均值<sup>[29-30]</sup>。

## 2 主要气象灾害及其风险指标

### 2.1 气象灾害风险形成机制

联合国“国际减灾战略”(UN/ISDR)从自然灾害的角度提出灾害风险评估是对可能造成危害的致灾因子、处在灾害物理暴露之下的潜在受灾对象(生命、财产、生计和人类依赖的环境等)及其脆弱性的分析和评价<sup>[31]</sup>。联合国人道主义事务部给出的风险表达式“风险度( $R$ )=危险度( $H$ )×脆弱度( $V$ )”得到了很多研究者的赞同,目前国际上多数研究项目都按这个思路进行<sup>[32-33]</sup>,张继权等<sup>[34-35]</sup>把承灾体暴露性和防灾减灾能力两个相互独立的部分从脆弱性中分离出来,认为一定区域自然灾害风险是自然灾害危险性、承灾体的暴露性和脆弱性及防灾减灾能力 4 个因素综合作用的结果。气象灾害危险性指气象灾害异常程度;承灾体暴露性是指可能受到气象危险因子威胁的所有人和财产;承灾体脆弱性是指在给定危险地区的财产由于潜在的气象危险因素而造成的伤害或损失程度,反映了气象灾害的损失程度;防灾减灾能力表示受灾区在短期和长期内能够从气象灾害中恢复的程度,包括应急管理能力、减灾投入、资源准备等<sup>[35]</sup>。

### 2.2 主要气象灾害识别

利用发育阶段冷害指数<sup>[4]</sup>判别出苗—七叶、出苗—抽雄、出苗—乳熟、出苗—成熟是否出现冷害,然

后把冷害指数的判别结果统一到4个发育阶段,只是不再区分一般、严重冷害。具体做法:(1)认为播种—七叶与出苗—七叶的冷害判别结果相同。(2)若出苗—抽雄为一般冷害,出苗—七叶也为一般冷害,则认为七叶—抽雄正常,冷害主要发生在出苗—七叶;若出苗—抽雄为严重冷害,出苗—七叶为一般冷害或正常,则认为七叶—抽雄出现冷害。以此类推,对1961—2010年48个站点4个发育阶段是否出现冷害进行判别。利用水分盈亏指数<sup>[7]</sup>判别4个发育阶段干旱、涝害的发生情况。

农作物实际产量 $Y$ 可以分离为3个部分:随社会生产水平提高的趋势产量 $Y_t$ 、随气象条件波动的气象产量 $Y_w$ 及一般忽略不计的随机“噪声”。采用直线滑动平均法模拟48个县(市)的趋势产量 $Y_t$ ,分离出受气象灾害影响的作物产量(即气象产量) $Y_w$ ,相对气象产量( $\frac{Y_w}{Y_t} \times 100\%$ )的负值即为减产率。农业气象灾害级别通常以减产率的大小来划分,一般规定减产5%以上即为灾害年份。

### 2.3 主要气象灾害风险指标与量化

根据东北地区玉米主要气象灾害风险形成机制,分析发育阶段主要气象灾害的危险性、承灾体的暴露性和脆弱性及防灾减灾能力4个因素,综合考虑指标体系确定的目的性、系统性、科学性、可比性和可操作性原则,并结合东北三省各县市的实际情况和资料获取的难易程度选取指标。

#### 2.3.1 主要气象灾害危险性指标的选择与验证

(1)指标选择 发育阶段主要气象灾害危险性为某一地区某一时段造成气象灾害的自然变异因素、程度及其导致气象灾害发生的可能性,主要指极端的气候条件及自然地理环境。由于农业气象灾害成因复杂,单独选取某个指标往往不能真实、全面地反映灾害危险程度。具体分析不同灾害的致灾因子、孕灾环境,采用孕灾环境多指标法<sup>[31]</sup>,从气象、作物、自然地理环境等方面选取指标,综合反映主要气象灾害的危险性。

选取日平均温度0积温负距平(简称0积温负距平)反映环境积温偏少,日平均温度适宜温度界限天数(简称适宜温度界限天数)反映气温偏低对作物发育的不利影响,4个发育阶段的适宜温度界限分别为15、18、18、16,热量指数负距平反映作物热量的偏低程度,3h日照天数反映太阳辐射偏少引起的寡照程度,纬度和海拔反映自然地理环境以及作物品种熟型作为冷害危险性指标。

干旱主要由于降水持续偏少所致,降水量值、少雨时间是衡量干旱的重要指标;同时土壤蒸发、作物蒸腾增大可加剧干旱;干旱也与土壤状况有关,如果土壤蓄水保水能力差,容易发生干旱。选取最长连续无雨日数、降水负距平百分率、累积有效降水量反映气象干旱,水分亏缺百分率、累积蒸散量反映作物干旱,其中降水负距平百分率、水分亏缺百分率分别反映站点与常年相比降水的偏少幅度、作物水分的亏缺程度;累积有效降水量、累积蒸散量则可以反映空间不同站点干旱发生的可能性。由于缺乏完备的土壤湿度数据,选用土壤类型反映土壤易旱涝的特点。

涝害发生的直接原因是过量或长时间降水,间接原因主要是局部地形,暴雨日数多、暴雨频率高,涝灾频率也就比较高。选取暴雨日数(日降雨量达到或超过50mm的降雨日数)、暴雨累积量(暴雨日的降水量之和)反映暴雨性降水,降水正距平百分率、水分盈余百分率分别反映站点与常年相比降水的偏多程度、作物水分的盈余幅度,累积有效降水量则可以反映空间不同站点涝害发生的可能性。利用历年气象资料对作物系数订正得到逐日作物系数,发育阶段需水量反映了不同阶段的需水特性,水分盈亏百分率也可以反映不同阶段的需水特性及水分供需状况<sup>[7]</sup>。

(2)指标验证 对48个站点关键发育阶段典型冷害的危险性指标与相对气象产量进行相关分析可以检验危险性指标的选择是否合理。1969年,抽雄—乳熟阶段发生了典型的全域冷害,48个站点相对气象产量与抽雄—乳熟的热量指数、0积温、18天数、纬度的相关系数分别为0.614、0.462、-0.405、-0.469,均通过0.05显著性检验,与海拔相关系数-0.259,通过0.1显著性检验,与3h日照天数相关系数为0.136,未通过0.1显著性检验。

表1为白城站点抽雄—乳熟典型冷害危险性指标值与减产率的对照。可见1962年冷害主要表现为18天数偏少和寡照;1972年表现为0积温明显偏低、18天数明显偏少及寡照;1983年主要表现为0积温偏低、18天数偏少;1999年主要表现为热量指数偏小和寡照。冷害年热量指数距平百分率、0积温距平、18天数距平一般为负值;同时3h日照天数一般偏少,个别冷害年份偏少5—6d。不同冷害年的危险性指标表现各不相同,从环境积温、作物热量、太阳辐射等角度选取多个指标可以全面地反映冷害危险性,避免单个指标带来的偏差。低

温一般与寡照相伴，3 h 日照天数作为冷害危险性指标是合理的。

典型全域干旱 2009 年研究站点相对气象产量与抽雄—乳熟的最长连续无雨日数、水分盈亏百分率、降水距平百分率、累积蒸散量、累积有效降水量的相关系数分别为-0.402、0.404、0.341、-0.521、0.352，均通过 0.05 显著性检验。表 2 为白城站点抽雄—乳熟典型干旱危险性指标值与减产率的对照。可见不同干旱年份的危险性指标表现各不相同，1968 年主要表现为最长连续无雨日数偏多 7.1 d，蒸散量偏大 31.2 mm，

作物水分亏缺 68.1%；1995 年主要表现为降水偏少 79.2%，作物水分亏缺达 92.2%；2004 年表现为蒸散量偏大 36.4 mm，降水偏少 66.6%，作物水分亏缺 85.4%。从气象、作物等角度选取多个指标可以避免单个指标带来的偏差。

典型全域涝害 1995 年研究站点相对气象产量与抽雄—乳熟的暴雨日数、暴雨累积量、水分盈亏百分率、降水距平百分率、累积有效降水量的相关系数分别为-0.425、-0.408、-0.384、-0.315、-0.381，均通过 0.05 水平显著性检验。庄河代表站抽雄—乳熟典型涝

表 1 白城市玉米抽雄—乳熟典型冷害危险性指标与减产率对照

Table 1 Comparison of hazard indices from tasseling to milky ripe for maize of typical chilling damage in Baicheng

年份 Year	热量指数距平百分率 Percentage of heat index anomaly (%)	0 积温距平 Anomaly of accumulated daily mean temperature above 0 (°C·d)	18 天数距平 Anomaly of days for daily mean temperature below 18 (°C)	3 h 日照天数距平 Anomaly of days for sunshine duration below 3 h (d)	减产率 Yield reduction rate (%)
1962*	0.6	-9.4	-2.7	-2.9	-41.7
1965*	-7.1	-44.4	0.6	-2.5	-25.5
1972*	-3.0	-19.7	-6.7	-4.9	-54.1
1980	3.0	-9.8	-2.7	-0.5	-22.2
1983	-2.6	-16.6	-5.7	-0.9	-20.5
1989*	-14.1	-23.8	1.6	-5.9	-54.2
1991	-1.2	1.5	-1.4	-0.9	-19.7
1995*	-4.4	-4.2	-1.7	-2.5	-36.0
1998*	-12.8	-6.4	-1.4	-1.5	-22.3
1999*	-14.0	0.7	-0.7	-3.5	-16.0
2009*	0.7	-6.1	-1.4	-2.9	-20.3

\*表示冷害与其他灾害耦合 \*meant chilling damage coupled other disasters

表 2 白城市玉米抽雄—乳熟典型干旱危险性指标与减产率对照

Table 2 Comparison of hazard indices from heading to milky ripe for maize of typical drought in Baicheng

年份 Year	最长连续无雨日数距平 Anomaly of the longest continuous rainless days (d)	累积蒸散量距平 Anomaly of accumulated evapotranspiration (mm)	降水距平百分率 Percentage of precipitation anomaly (%)	水分盈亏百分率 Percentage of water surplus-deficit (%)	减产率 Yield reduction rate (%)
1968*	7.1	31.2	-24.8	-68.1	-53.6
1972*	6.1	30.7	-76.0	-93.8	-54.1
1975	18.1	50.9	-89.4	-99.5	-19.1
1979*	4.1	8.2	-68.8	-90.3	-13.1
1989*	3.1	14.5	-76.2	-91.0	-54.2
1995*	2.1	12.9	-79.2	-92.2	-36.0
2004	-0.9	36.4	-66.6	-85.4	-24.4
2005	-1.9	3.8	-46.3	-61.2	-22.6
2007	4.1	45	-77.7	-89.8	-33.8
2009*	2.1	16.9	-56.6	-75.3	-20.3

\*表示干旱与其他灾害耦合 \*meant drought coupled other disasters

害危险性指标值与减产率进行对照(表略),1971年主要表现为暴雨累积量偏多63%,总降水偏多45%,作物水分盈余130%;1985年表现为暴雨日数偏多4d,暴雨累积量偏多267%,总降水偏多140%,作物水分盈余达288%;7个涝害年份中有5年暴雨偏多量值在100mm以上,可以说暴雨是涝害的主要原因。

**2.3.2 发育阶段主要气象灾害暴露性指标** 暴露性一般以研究单元承灾体的数量或价值量作为评估指标。对于某县,玉米种植比例越大,意味着该县暴露于气象灾害中的承灾体越多,可能遭受的潜在损失就越大,气象灾害风险也越大。对于耕地面积不同的县(市),玉米种植面积占耕地面积的比例可以反映其玉米生产在农业中的地位。因此,玉米种植面积占耕地面积之比可以反映不同县(市)面对潜在气象灾害的相对暴露量。

**2.3.3 发育阶段主要气象灾害脆弱性指标** 承灾体脆弱性指标应表示出作物产量受主要气象灾害影响的损失程度和地域性差异,一般利用成灾面积百分率、受灾面积百分率等灾损指标刻画<sup>[35]</sup>。由于缺少完备的历年玉米受灾面积、成灾面积数据,再者这类数据也无法区分到发育阶段。有研究表明减产率与成灾面积百分率呈较强的正相关<sup>[35]</sup>,本文利用减产率作为灾损

指标刻画脆弱性。

对近50年东北地区48个县(市)玉米4个发育阶段主要气象灾害识别和相对气象产量分离,图1为近50年3个代表站4个发育阶段主要气象灾害与相对气象产量的变化。由图1可见灾害年的减产率在5%—80%变化,规律性较差,减产率的大小应该与灾害强度及受灾范围有密切关系,由于缺乏详细的发育阶段受灾面积、成灾面积数据,发育阶段灾害导致的减产情况难以具体分析。为简便起见,对多个发育阶段出现灾害导致的减产,将减产率平均分摊到每个阶段。

**2.3.4 防灾减灾能力指标** 决定防灾减灾能力的主要是一系列社会经济要素,要素种类繁多,每一要素又有多种属性,分别可用不同的指标表示,目前尚不清楚哪一要素的哪一属性与防灾减灾能力的关系最为密切,而且承灾体不同、自然灾害不同,与防灾减灾能力相关的社会经济要素就会不同,这就决定了防灾减灾能力的评估是一个十分复杂的过程。东北地区玉米单位面积产量从1961—2010年有明显的上升趋势,玉米单产的上升趋势既反映了生产力水平的提高,也反映了防灾减灾能力的不断提高。鉴于此,一些研究选取与作物产量有关的指标来综合反映防灾减灾能力<sup>[23,30,36]</sup>。

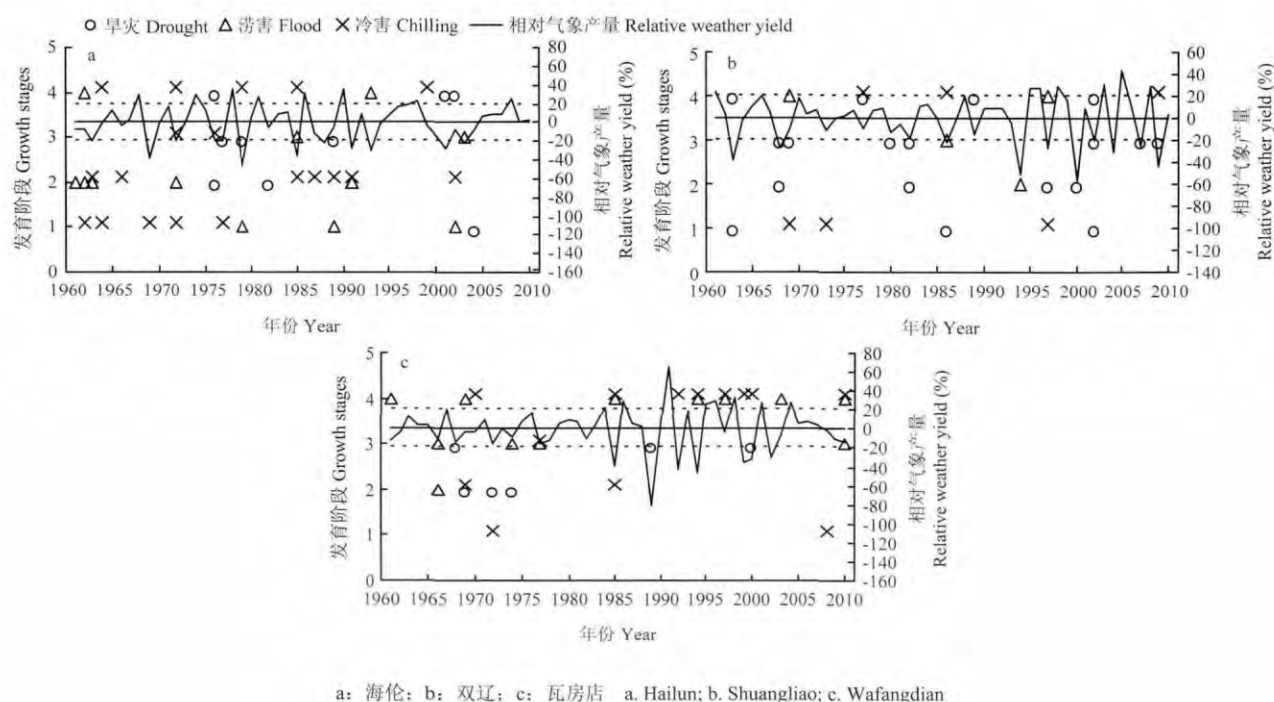


图1 近50年站点4个发育阶段主要气象灾害及气象产量变化

Fig. 1 Variations of meteorological yield and the main meteorological disasters at four growth stages of maize in representative stations during past 50 years

单位面积产量基本代表了一个区域的农业生产水平，各县（市）产量波动的差异一定程度反映了当地防灾减灾能力的高低，产量波动的差异可用变异系数表示，产量的变异系数越小，表明产量越稳定，抗灾能力越强；变异系数越大，产量波动越大，抗灾能力越弱，玉米生产面临的风险越大。本文选用产量变异系数来综合反映防灾减灾能力。

2.3.5 指标量化 利用式（1）、（2）对指标进行无量纲化处理：

$$X_{ij}^1 = \frac{(x_{ij} - x_{\min j}) \times 10}{x_{\max j} - x_{\min j}} \tag{1}$$

$$X_{ij}^2 = \frac{(x_{\max j} - x_{ij}) \times 10}{x_{\max j} - x_{\min j}} \tag{2}$$

式中， $X_{ij}$  为第  $i$  个对象的第  $j$  项指标值； $X_{ij}^1$ 、 $X_{ij}^2$  为无量纲化处理后第  $i$  个对象的第  $j$  项指标值； $X_{\max j}$  和  $X_{\min j}$  分别为第  $j$  项指标的最大值和最小值。式（1）适

用于与风险成正比的指标，式（2）适用于与风险成反比的指标， $X_{ij}^1 \in [0,1]$ ， $X_{ij}^2 \in [0,1]$ 。

对于一些不能用上式进行无量纲化处理的指标采取分级赋值法。一般来说，纬度越高，越容易发生冷害；海拔越高，也越容易发生冷害，分别对纬度、海拔采用 4 级赋值法。纬度 39—42 °N、42—44 °N、44—46 °N、46—48 °N 分别赋值为 1、2、3、4；海拔 150 m 以下、150—300 m、300—400 m、400 m 以上分别赋值 1、2、3、4。根据土壤质地易旱涝的特点将砂土、砂壤土、壤土、黏土进行赋值，干旱危险性指标中砂土、砂壤土、壤土、黏土的土壤指数分别赋值为 4、3、2、1，涝害危险性指标中则赋值为 1、2、3、4。

利用层次分析法确定风险四要素及主要气象灾害危险性各指标的权重系数，发育阶段主要气象灾害风险评价指标体系与权重系数如表 3 所示。

表 3 东北玉米发育阶段主要气象灾害风险评价指标体系  
Table 3 The system of risk assessment indicators of the main meteorological disasters at growth stages of maize in Northeast China

因子 Factor	副因子 Subfactor	指标 Indicator	权重 Weight
危险性 Hazard (H) (0.4237)	冷害危险性 Chilling damage hazard (3 种灾害的频率 之比为 C1:C2:C3, the ratio of the frequency of the main meteorological disasters is C1:C2:C3, WC=C1/(C1+C2+C3) )	热量指数负距平百分率 Percentage of heat index negative anomaly (%) ( $X_{HC1}$ )	0.4247
	0 积温负距平 Negative anomaly of accumulated daily mean temperature 0 (·d) ( $X_{HC2}$ )	适宜温度界限天数 Days for daily mean temperature below appropriate temperature (d) ( $X_{HC3}$ )	0.2420
		少于 3 h 日照天数 Days for sunshine duration below 3 h (d) ( $X_{HC4}$ )	0.1699
	品种熟型 Variety ( $X_{HC5}$ )	品种熟型 Variety ( $X_{HC5}$ )	0.0737
		纬度 Latitude (°N) ( $X_{HC6}$ )	0.0387
		海拔 Altitude (m) ( $X_{HC7}$ )	0.0301
	干旱危险性 Drought hazard (WD=C2/(C1+C2+C3))	最长连续无雨日数 Days of the longest continuous rainless (d) ( $X_{HD1}$ )	0.0208
		水分亏缺百分率 Percentage of crop water deficit (%) ( $X_{HD2}$ )	0.3913
		降水负距平百分率 Percentage of precipitation negative anomaly (%) ( $X_{HD3}$ )	0.2302
		累积蒸散量 Accumulated evapotranspiration (mm) ( $X_{HD4}$ )	0.1280
		累积有效降水量 Accumulated effective precipitation (mm) ( $X_{HD5}$ )	0.1273
		土壤指数 Soil index ( $X_{HD6}$ )	0.0835
		暴雨日数(日降水量 ≥50mm 的日数) Days of rainstorm (days of precipitation ≥50 mm) (d) ( $X_{HF1}$ )	0.0396
		暴雨累积量 (暴雨日的降水量之和) Accumulated rainstorm (the sum of precipitation of rainstorm days) (mm) ( $X_{HF2}$ )	0.4587
	涝害危险性 Flood hazard (WF=C3/(C1+C2+C3))	水分盈余百分率 Percentage of crop water surplus (%) ( $X_{HF3}$ )	0.2893
		降水正距平百分率 Percentage of precipitation positive anomaly (%) ( $X_{HF4}$ )	0.1149
		累积有效降水量 Accumulated effective precipitation (mm) ( $X_{HF5}$ )	0.0556
		土壤指数 Soil index ( $X_{HF6}$ )	0.0541
		玉米种植面积占耕地面积之比 The ratio of sown area and cultivated area (%) ( $X_E$ )	0.0274
	暴露性 Exposure (E) (0.1221)	玉米种植面积占耕地面积之比 The ratio of sown area and cultivated area (%) ( $X_E$ )	
脆弱性 Vulnerability (V) (0.2268)	减产率分配到相应灾害阶段 Yield reduction rate assigned to corresponding growth stages of disaster occurrence (%) ( $X_V$ )	减产率分配到相应灾害阶段 Yield reduction rate assigned to corresponding growth stages of disaster occurrence (%) ( $X_V$ )	
		单产变异系数 Variation coefficient of yield (Y)	
防灾减灾能力 Emergency response and recovery capability (R) (0.2269)	单产变异系数 Variation coefficient of yield (Y)	单产变异系数 Variation coefficient of yield (Y)	

### 3 主要气象灾害风险评价模型

#### 3.1 发育阶段主要气象灾害风险评价模型

利用自然灾害风险指数法建立发育阶段主要气象灾害风险评价模型：

$$DRI_j = H_j^{WH} \times E_j^{WE} \times V_j^{WV} \times (1 - R_j)^{WR} \quad (j=1,2,3,4) \quad (3)$$

式中,  $j(j=1,2,3,4)$ 代表 4 个发育阶段;  $DRI_j$ 为发育阶段主要气象灾害风险指数,其值越大,则发育阶段主要气象灾害风险程度越大;  $H_j$ 、 $E_j$ 、 $V_j$ 和  $R_j$ 分别为发育阶段主要气象灾害的危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力;  $WH$ 、 $WE$ 、 $WV$ 和  $WR$ 分别为它们的权重系数,由层次分析法确定为 0.4237、0.1221、0.2268 和 0.2269。

3.1.1 发育阶段主要气象灾害危险性指数 利用加权综合评分法和层次分析法,建立发育阶段单一灾种危险性评价模型：

$$H_j = \sum_{i=1}^m X_{Hi,j} \cdot W_{Hi} \quad (4)$$

其中,  $X_{Hi,j}$ 为第  $j$  个发育阶段主要气象灾害危险性指标  $i$  的量化值,  $m$  为危险性指标个数,  $W_{Hi}$ 为指标  $i$  的权重,由层次分析法确定(表 3)。根据评价模型,冷害危险性指数：

$$HC_j = \sum_{i=1}^m X_{HCi,j} \cdot W_{HCi} \quad (5)$$

干旱危险性指数：

$$HD_j = \sum_{i=1}^m X_{HDI,j} \cdot W_{HDI} \quad (6)$$

涝害危险性指数：

$$HF_j = \sum_{i=1}^m X_{HFi,j} \cdot W_{HFi} \quad (7)$$

利用加权综合评分法构建发育阶段主要气象灾害危险性评价模型：

$$H_j = HC_j \cdot WC_j + HD_j \cdot WD_j + HF_j \cdot WF_j \quad (8)$$

式中,  $WC_j$ 、 $WD_j$ 、 $WF_j$ 分别为第  $j$  发育阶段冷害、干旱、涝害危险性指数的权重,权重因子应该表示各种灾害发生及对产量影响的差异。发育阶段单一灾种危险性指数表示此种灾害孕灾环境的危险程度,灾害频率则表示灾害发生的可能性。当有多种灾害发生时,频率大的灾害一般就是最主要的灾害,用灾害频率之比作为权重系数可以反映 3 种主要气象灾害的相对严重程度。根据各发育阶段冷害、干旱、涝害频率之比确定权重系数,具体方法:冷害、干旱、涝害的发生

频率分别为  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ , 3 种灾害的频率之比为  $C1:C2:C3$ ,  $WC_j$ 、 $WD_j$ 、 $WF_j$ 分别取  $C1/(C1+C2+C3)$ 、 $C2/(C1+C2+C3)$ 、 $C3/(C1+C2+C3)$ 。4 个发育阶段冷害指数、水分盈亏指数的判别标准不同<sup>[4,7]</sup>, 权重因子  $WC_j$ 、 $WD_j$ 、 $WF_j$ 可以集中反映不同发育阶段主要气象灾害的危险性。

#### 3.1.2 发育阶段暴露性指数

$$E = X_E \quad (9)$$

其中,  $X_E$ 为暴露性评估指标的量化值。

#### 3.1.3 发育阶段脆弱性指数

$$V_j = X_{V,j} \quad (10)$$

其中,  $X_{V,j}$ 为第  $j$  发育阶段减产率的量化值。

3.1.4 防灾减灾能力指数 玉米产量变异系数的倒数定义为防灾减灾能力指数  $R$ ：

$$R_i = \frac{1}{\frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}}} \quad (11)$$

其中,  $R_i$ 为东北地区不同县(市)的防灾减灾能力指数,  $Y_i$ 为某县(市)第  $i$  年单产,  $\bar{Y}$ 为 50 年平均单产,  $n$ 为总年份。

#### 3.2 生育期主要气象灾害风险评估模型及区划

利用发育阶段主要气象灾害风险评价模型式(3)计算研究站点 4 个发育阶段主要气象灾害风险指数值( $DRI$ )。对 48 个县(市)50a 平均减产率与 4 个发育阶段主要气象灾害风险指数进行相关分析,减产率与乳熟—成熟风险指数的相关性最好( $r=0.515$ ,  $P < 0.01$ ),与出苗—七叶风险指数的相关性次之( $r=0.457$ ,  $P < 0.01$ ),与抽雄—乳熟相关性也比较好( $r=0.394$ ,  $P < 0.01$ ),与七叶—抽雄的相关系数为 0.256,没有达到 0.05 显著性水平。

利用加权综合评分法构建整个生育期主要气象灾害风险评估模型：

$$DRI = \sum_{j=1}^4 DRI_j \cdot W_j \quad (12)$$

其中,  $DRI$ 为东北玉米出苗—成熟生育期主要气象灾害风险指数;  $DRI_j$ 为第  $j(j=1,2,3,4)$ 发育阶段主要气象灾害风险指数;  $W_j$ 为第  $j$  发育阶段的权重系数,利用 50a 平均减产率与各发育阶段主要气象灾害风险指数的相关程度确定  $W_j$ 值的大小。当  $W_j(j=1,2,3,4)$ 分别取 0.1, 0.3, 0.4, 0.2 时,生育期风险指数与减产率的相关系数为 0.422 ( $P < 0.01$ );增加第 4、第 1 阶段的



权重系数,相关性有较明显的增加,当  $W_j (j=1,2,3,4)$  分别取 0.3、0.1、0.2 和 0.4 时,二者相关系数为 0.522;继续增大第 4 阶段的权重,当  $W_j (j=1,2,3,4)$  分别取 0.3、0.05、0.15 和 0.5 时,相关系数为 0.534,没有较明显的变化(图 2)。据此,将 4 个发育阶段主要气象灾害风险指数的权重取为 0.30、0.05、0.15 和 0.50。

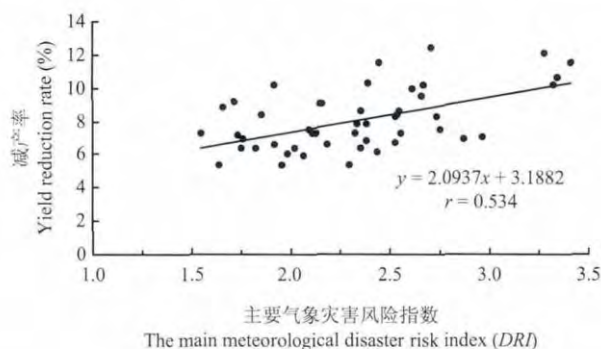


图 2 出苗—成熟主要气象灾害风险指数(DRI)与 50 年平均减产率的相关性

Fig. 2 The correlation between risk index of the main meteorological disasters from emergency to maturation and the average yield reduction rate of past 50 years

## 4 讨论

### 4.1 主要气象灾害风险评价体系及指标的建立

根据联合国人道主义事务部的风险表达式:“风险度( $R$ )=危险度( $H$ ) $\times$ 脆弱度( $V$ )”,这里的脆弱性应该称之为“广义脆弱性”,包括承灾体的暴露性、狭义脆弱性(易损性)、防灾抗灾能力。目前,狭义脆弱性(易损性)还没有一个统一、标准的定义,本文采用张继权的自然灾害风险四要素说,脆弱性(易损性)定义为承灾体由于潜在的气象危险因素而造成的损失或伤害程度,脆弱性指标应反映农作物由于气象灾害的影响而造成的损失程度。目前不同研究选取的脆弱性指标种类各不相同<sup>[18-21]</sup>,对脆弱性内涵及范围的界定需要进一步研究。

具体分析东北玉米不同发育阶段冷害、干旱、涝害的孕灾环境和致灾因子,从气象、作物、自然地理环境等方面选取多个指标全面反映主要气象灾害的危险性。农业是一个系统产业,受多种因素的影响,一些社会、人文因子在防灾减灾中往往起到关键的作用。有研究认为灌溉是缓解旱情的重要因素<sup>[18]</sup>;还有研究认为技术、资金等社会经济因素是影响防灾减灾的主

要因子<sup>[20-21]</sup>,但由于社会、经济、人文因子对农业承灾体的影响反馈过程及其复杂,过程很难量化刻画,同时这些因子的统计数据较难获得,且质量不高。鉴于此,本文选用产量变异系数综合反映防灾减灾能力,与防灾减灾有关的社会经济要素种类、属性、指标的研究将作为下一步的研究内容。

### 4.2 主要气象灾害风险评价模型的构建

不同研究选取的影响灾害风险因子不同,构建的灾害风险模型差异较大。刘锦奎等<sup>[37]</sup>、植石群等<sup>[38]</sup>分别对华南地区荔枝、香蕉寒害的发生概率、强度、减产率、易灾性(种植面积与耕地面积之比,即暴露性)、防灾抗灾能力因子进行组合建立风险指数;马树庆等<sup>[39-40]</sup>利用风险概率及多个农气指标组合构建玉米、水稻的冷害风险指数;梁书民<sup>[41]</sup>从旱灾程度和抗灾潜力两方面选取指标对旱灾风险进行评价;胡雪琼等<sup>[42]</sup>对云南省冬小麦干旱强度概率风险、减产概率风险及抗灾性能因子组合构建干旱灾损风险指数。本文通过对气象灾害风险形成机制及国内外农业气象灾害风险主要研究方向的分析,根据张继权的自然灾害风险四要素说,利用自然灾害风险指数法构建发育阶段主要气象灾害风险评估模型。利用孕灾环境指标和灾害频率综合反映主要气象灾害的危险性,发育阶段各主要气象灾害频率之比作为权重系数可以反映各站点不同发育阶段 3 种主要气象灾害的相对严重程度。在发育阶段主要气象灾害风险评价的基础上,根据作物减产率与各阶段主要气象灾害风险指数的相关程度确定各阶段风险指数的权重系数,建立作物生育期主要气象灾害风险评估模型。

### 4.3 评价指标权重的确定

采用层次分析法确定风险四要素及各危险性指标的权重。由于农业气象灾害成因的多要素性、复杂性,影响要素之间的模糊性、不确定性等,根据经验判断的主观赋权方法具有不可替代的优势;而基于数学方法的客观赋权法所需数据量大,运算复杂,一般较少应用<sup>[43]</sup>。层次分析法将主观与客观、定性与定量相结合,一定程度上弥补了主观赋权的随意性。是否可以采用更为合理的赋权方法值得进一步研究。

## 5 结论

从东北玉米发育阶段主要气象灾害危险性、承灾体暴露性、脆弱性和防灾减灾能力四要素的内涵出发选取指标,建立了较完备的主要气象灾害风险评价指标体系,并构建了发育阶段及生育期主要气象灾害风

险评价模型：发育阶段主要气象灾害风险评价模型；发育阶段单一灾种危险性评价模型；发育阶段主要气象灾害危险性评价模型；生育期主要气象灾害风险评价模型；根据减产率与4个阶段主要气象灾害风险指数的相关性调试确定发育阶段的权重系数，提出了基于作物发育阶段的多种气象灾害风险评价技术体系。

## References

- [1] 王春乙, 毛飞. 东北地区低温冷害的分布特征//王春乙, 郭建平. 农作物低温冷害综合防御技术研究. 北京: 气象出版社, 1999: 9-15.  
Wang C Y, Mao F. Distribution of chilling damage in Northeast China//Wang C Y, Guo J P. *Study on Comprehensive Defending Technique to Chilling Damage*. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 9-15. (in Chinese)
- [2] 马树庆, 刘玉英, 王琪. 玉米低温冷害动态评估和预测方法. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1905-1910.  
Ma S Q, Liu Y Y, Wang Q. Dynamic prediction and evaluation method of maize chilling damage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1905-1910. (in Chinese)
- [3] 李祎君, 王春乙. 东北地区玉米低温冷害综合指标研究. 自然灾害学报, 2007, 16(6): 15-20.  
Li Y J, Wang C Y. Research on comprehensive index of chilling damage to corn in Northeast China. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(6): 15-20. (in Chinese)
- [4] 高晓容, 王春乙, 张继权. 气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响. 生态学报, 2012, 32(7): 2110-2118.  
Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q. The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2110-2118. (in Chinese)
- [5] 高晓容, 王春乙, 张继权. 东北玉米低温冷害时空分布与多时间尺度变化规律. 灾害学, 2012, 27(4): 65-70.  
Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q. Spatial-temporal distribution and multiple-temporal scale variation laws of chilling damage of maize in Northeast China. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(4): 65-70. (in Chinese)
- [6] 周琳. 东北气候. 北京: 气象出版社, 1991: 43-52.  
Zhou L. *Climate in Northeast China*. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 43-52. (in Chinese)
- [7] 高晓容, 王春乙, 张继权, 薛绪掌. 近50年东北玉米生育阶段需水量及旱涝时空变化. 农业工程学报, 2012, 28(12): 101-109.  
Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q, Xue X Z. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years. *Transaction of the CSAE*, 2012, 28(12): 101-109. (in Chinese)
- [8] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 叶彩玲. 华北北部冬小麦干旱和产量灾损的风险评估. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 131-139.  
Xue C Y, Huo Z G, Li S K, Ye C L. Risk assessment of drought and yield losses of winter wheat in the northern part of North China. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1): 131-139. (in Chinese)
- [9] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 卢志光, 毛飞, 庄立伟, 王素艳. 灌溉降低华北冬小麦干旱减产的风险评估研究. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 131-136.  
Xue C Y, Huo Z G, Li S K, Lu Z G, Mao F, Zhuang L W, Wang S Y. Action of irrigation on decreasing yield reduction due to drought: a risk assessment of winter wheat in North China Plain. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 131-136. (in Chinese)
- [10] 袭祝香, 马树庆, 王琪. 东北区低温冷害风险评估及区划. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 98-102.  
Xi Z X, Ma S Q, Wang Q. Risk evaluation and zonation of the low temperature and cold damage in Northeast China. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(2): 98-102. (in Chinese)
- [11] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 卢志光, 庄立伟, 侯婷婷. 干旱对北方冬小麦产量影响的风险评估. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 118-125.  
Wang S Y, Huo Z G, Li S K, Lu Z G, Zhuang L W, Hou T T. Risk assessment of drought effect on yield of winter wheat in Northern China. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 118-125. (in Chinese)
- [12] 马树庆, 袭祝香, 王琪. 中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 137-141.  
Ma S Q, Xi Z X, Wang Q. Risk evaluation of cold damage to corn in Northeast China. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 137-141. (in Chinese)
- [13] 杜尧东, 毛慧勤, 刘锦奎. 华南地区寒害概率分布模型研究. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 103-107.  
Du Y D, Mao H Q, Liu J L. Study on probability distribution models of cold damage in South China. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(2): 103-107. (in Chinese)
- [14] 于飞, 谷晓平, 罗宇翔, 郑小波. 贵州农业气象灾害综合风险评价与区划. 中国农业气象, 2009, 30(2): 267-270.  
Yu F, Gu X P, Luo Y X, Zheng X B. Comprehensive risk assessment and demarcation of agro-meteorological disasters in Guizhou Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 267-270. (in Chinese)
- [15] 李娜, 霍治国, 贺楠, 肖晶晶, 温泉沛. 华南地区香蕉、荔枝寒害的

- 气候风险区划. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1244-1251.
- Li N, Huo Z G, He N, Xiao J J, Wen Q P. Climatic risk zoning for banana and litchi's chilling injury in South China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1244-1251. (in Chinese)
- [16] Hao L, Zhang X Y, Liu S D. Risk assessment to China's agricultural drought disaster in county unit. *Natural Hazards*, 2012, 61(2): 785.
- [17] 陈晓艺, 马晓群, 孙秀邦. 安徽省冬小麦发育期农业干旱发生风险分析. 中国农业气象, 2008, 29(4): 472-476.
- Chen X Y, Ma X Q, Sun X B. Risk analysis of agricultural drought for winter wheat during growing period in Anhui Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(4): 472-476. (in Chinese)
- [18] Wilhelmi O V, Wilhite D A. Assessing vulnerability to agricultural drought: A Nebraska case study. *Natural Hazards*, 2002, 25(1): 37-58.
- [19] 刘兰芳, 刘盛和, 刘沛林, 田亚平. 湖南省农业旱灾脆弱性综合分析 with 定量评价. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 78-83.
- Liu L F, Liu S H, Liu P L, Tian Y P. Synthetic analysis and quantitative estimation of the agricultural vulnerability to drought disaster in Hunan Province. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(4): 78-83. (in Chinese)
- [20] Simelton E, Fraser E D G, Termansen M, Forster P M, Dougill A J. Typologies of crop-drought vulnerability: an empirical analysis of the socio-economic factors that influence the sensitivity and resilience to drought of three major food crops in China (1961-2001). *Environmental Science & Policy*, 2009, 12: 438-452.
- [21] Fraser E D G, Termansen M, Sun N, Guan D B, Simelton E, Dodds P, Feng K S, Yu Y. Quantifying socioeconomic characteristics of drought-sensitive regions: Evidence from Chinese provincial agricultural data. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, 340: 679-688.
- [22] Ngigi S N, Savenije H H G, Rockstrom J, Gachene C K. Hydro-economic evaluation of rainwater harvesting and management technologies: farmers' investment options and risks in semi-arid Laikipia district of Kenya. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30: 772-782.
- [23] Zhang J Q. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 102(2): 133-153.
- [24] Shahid S, Behrawan H. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Natural Hazards*, 2008, 46: 391-413.
- [25] Zhang D, Wang G L, Zhou H C. Assessment on agricultural drought risk based on Variable Fuzzy Sets Model. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(2): 167-175.
- [26] 张建平. 基于作物模型的农业气象灾害对东北华北作物产量影响评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2010: 36-37.
- Zhang J P. Impact evaluation of agro-meteorological hazard to yields of crops in Northeast China and North China based on crop growth model [D]. Beijing: China Agricultural University, 2010: 36-37. (in Chinese)
- [27] 张倩. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响评估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2010: 47-48.
- Zhang Q. Study on the impact assessment of high temperature damage for rice in the Lower and Middle Reaches of Yangtze River [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2010: 47-48. (in Chinese)
- [28] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage paper 56, 1998: 95-97.
- [29] 钟秀丽, 王道龙, 李玉中, 赵鹏, 阎旭宇, 孙忠富. 黄淮海冬小麦拔节期的时空变化研究. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 22-25.
- Zhong X L, Wang D L, Li Y Z, Zhao P, Yan X Y, Sun Z F. Temporal-spatial variation of elongating time of wheat in Huang-Huai wheat production area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2): 22-25. (in Chinese)
- [30] 吴东丽. 华北地区冬小麦干旱风险评估研究[D]. 北京: 国家气候中心, 2009: 20-21.
- Wu D L. Study on the risk assessment of drought for the winter wheat in North China [D]. Beijing: National Climate Centre, 2009: 20-21. (in Chinese)
- [31] 葛全胜, 邹铭, 郑景云. 中国自然灾害风险综合评估初步研究. 北京: 科学出版社, 2008: 136-137, 173-176.
- Ge Q S, Zou M, Zheng J Y. *Integrated Assessment of Natural Disaster Risks in China*. Beijing: Science Press, 2008: 136-137, 173-176. (in Chinese)
- [32] United Nations Development Programme. Reducing Disaster Risk: a Challenge for Development. John S Swift Co., USA, 2004: 2-4.
- [33] Dilley M, Chen R S, Deichmann U, Lerner-Lam A L, Arnold M, Agwe J, Buys P, Kjekstad O, Lyon B, Yetman G. *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis-Synthesis Report*. USA: Columbia University, 2005: 4-7.
- [34] 张继权, 冈田宪夫, 多多纳裕一. 综合自然灾害风险管理——全面整合的模式与中国的战略选择. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 29-37.
- Zhang J Q, Okada N, Tatano H I. Integrated natural disaster risk management: comprehensive and integrated model and Chinese strategy choice. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(1): 29-37. (in Chinese)
- [35] 张继权, 李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用. 北京: 北京师范大学出版社, 2007: 32-34, 492-505.

- Zhang J Q, Li N. *Quantitative Methods and Applications of Risk Assessment and Management on Main Meteorological Disasters*. Beijing: Beijing Normal University Press, 2007: 32-34, 492-505. (in Chinese)
- [36] 任义方. 农业气象指数保险方法研究—以河南冬小麦干旱为例[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011: 36-37.
- Ren Y F. Study on the agricultural index insurance method- taking Henan winter wheat drought as example [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2011: 36-37. (in Chinese)
- [37] 刘锦奎, 杜尧东, 毛慧勤. 华南地区荔枝寒害风险分析与区划. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 126-130.
- Liu J L, Du Y D, Mao H Q. Risk analysis and zonation of cold damage to litchi in South China. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 126-130. (in Chinese)
- [38] 植石群, 刘锦奎, 杜尧东, 刘爱君. 广东省香蕉寒害风险分析. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 113-116.
- Zhi S Q, Liu J L, Du Y D, Liu A J. Risk analysis of cold damage to banana in Guangdong Province. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(2): 113-116. (in Chinese)
- [39] 马树庆, 王琪, 王春乙, 霍治国. 东北地区玉米低温冷害气候和经济损失风险分区. 地理研究, 2008, 27(5): 1169-1177.
- Ma S Q, Wang Q, Wang C Y, Huo Z G. The risk division on climate and economic loss of maize chilling damage in Northeast China. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1169-1177. (in Chinese)
- [40] 马树庆, 王琪, 王春乙, 霍治国. 东北地区水稻冷害气候风险度和经济脆弱度及其分区研究. 地理研究, 2011, 30(5): 931-938.
- Ma S Q, Wang Q, Wang C Y, Huo Z G. Climate risk and economy vulnerability of rice chilling damage and division in Northeast China. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 931-938. (in Chinese)
- [41] 梁书民. 中国雨养农业区旱灾风险综合评价研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 39-44.
- Liang S M. Comprehensive evaluation on the drought risk of rain-fed agriculture in China based on GIS. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(7): 39-44. (in Chinese)
- [42] 胡雪琼, 吉文娟, 张茂松, 邹丽云. 云南省冬小麦干旱灾损风险区划. 大气科学学报, 2011, 34(3): 356-362.
- Hu X Q, Ji W J, Zhang M S, Zou L Y. Drought risk regionalization for winter wheat in Yunnan Province. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2011, 34(3): 356-362. (in Chinese)
- [43] 刘小艳. 陕西省干旱灾害风险评估与区划[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010: 17-18.
- Liu X Y. Risk assessment and zoning of drought in Shaanxi Province [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2010: 17-18. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)

## 欢迎订阅 2015 年《农业资源与环境学报》

《农业资源与环境学报》Journal of Agricultural Resources and Environment 是由农业部主管, 农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会联合主办的科技期刊。被评为中国科技核心期刊、天津市优秀期刊。本刊被美国乌利希期刊指南、化学文摘 (CA)、国际农业与生物科学中心 (CABI)、中国学术文摘数据库核心版 (CSAD) 等重要数据库收录。

《农业资源与环境学报》主要报道交流农业资源、农业环境等领域新理论新技术新方法和实践经验, 为促进农业资源与环境学科发展提供理论技术支持。主要栏目有:

一、战略与综述; 二、耕地可持续利用; 三、养分资源管理; 四、水资源管理; 五、生物质资源利用; 六、产地环境与农产品质量安全; 七、生态农业; 八、生物多样性保护; 九、乡村环境; 十、检测分析方法。

《农业资源与环境学报》为双月刊, 大 16 开, 96 页, 逢双月 25 日出版, 每册定价 30.00 元, 全年 180.00 元。国际标准刊号: ISSN 2095-6819, 国内统一刊号: CN 12-1437/S, 国内外公开发行, 各地邮电局 (所) 均可订阅, 邮发代号: 6-40, 国外发行代号: BM3272。有漏订者可直接与编辑部联系订阅。

编辑部地址: 天津市南开区复康路 31 号 (邮政编码: 300191)

电话: 022-23611149; 传真: 022-23674336; 电子信箱: caed@vip.163.com; 网址: www.aed.org.cn