

基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价

王春乙^{1,2}, 蔡菁菁^{1,3}, 张继权⁴

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 海南省气象局, 海口 570203; 3. 中国民用航空深圳空中交通管理站, 深圳 518128;
4. 东北师范大学城市与环境科学学院自然灾害研究所, 长春 130024)

摘 要: 为了分析干旱、冷害灾害对农作物生长的综合影响, 全面评价其综合风险, 该文利用东北地区 35 个农业气象站 1961—2010 年气象资料、1981—2010 年玉米发育期资料、1961—2010 年产量面积资料、近 50 a 东北三省的灾情资料以及近 10 a 东北三省各县的社会经济统计资料, 以玉米出苗—抽雄、抽雄—成熟 2 个生长阶段发生的干旱及冷害为研究对象, 基于水分亏缺指数和热量指数分别建立了干旱指标和冷害指标, 对东北地区玉米干旱、冷害进行风险分析。建立了包括危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力 4 个方面的东北地区玉米干旱、冷害风险评价模型, 指出危险性和防灾减灾能力是风险评价模型中最重要的两个影响因子。研究结果为, 东北地区玉米干旱、冷害高风险值区位于黑龙江西南部和东北部, 以及辽宁西部建平县一带, 风险指标值在 0.8 以上; 吉林西北部、东南部、辽宁东北部为次高值区, 风险指标值在 0.6~0.7 之间; 低值区位于辽宁中南部及辽东半岛, 风险值在 0.3 左右。研究结果可为东北地区防灾减灾工作提供客观依据。

关键词: 作物; 气象; 风险评价; 玉米; 干旱; 冷害

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.06.033

中图分类号: P49

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-06-238-08

王春乙, 蔡菁菁, 张继权. 基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 238—245.

Wang Chunyi, Cai Jingjing, Zhang Jiquan. Risk assessment of drought and chilling injury of maize in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 238—245. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

农业气象灾害及其风险评价是当前灾害学研究领域中的热点问题。中国对农业气象灾害风险评估的相关研究大致开始于 20 世纪 90 年代, 这一阶段主要是以灾害影响分析技术方法为核心, 探讨了农业气象灾害风险分析理论、方法和模型^[1-2]。21 世纪以来, 农业气象灾害风险评估开始注重灾害影响评估的风险化、数量化技术方法, 旨在构建由风险分析、风险评估、灾后评价、防灾减灾组成的综合技术体系, 如李世奎等^[3]从灾害风险分析的角度构建了一个组合的灾害风险评估体系。在评价方法上, 侧重于以灾害发生可能性或频率为基础, 采用概率风险评价模式对灾害进行评价^[4-8]。

东北三省是中国玉米的最大产区, 玉米产量占各类粮食总产量的 40% 左右。但是由于东北三省纬度较高, 其热量资源极其有限, 同时, 夏季气温易出现波动, 导致低温冷害时有发生, 易造成各类农作物的减产^[9]。进入 21 世纪以后, 东北地区的总体气候变化呈现出了暖干化态势, 在夏季尤为显著^[10], 因此, 在影响农作物产量的

各类农业气象灾害中, 干旱的危害逐渐显现, 对干旱的防御引起了广泛关注。在这种情况下, 开展东北地区玉米干旱、冷害风险研究, 建立科学合理的符合农业气象灾害成灾机理和特点的风险评价模型, 为政府防灾减灾工作提供客观依据, 显得极具现实意义。

针对东北地区玉米冷害和干旱风险评价已有大量研究成果^[11-15], 但大多针对单一灾害。在实际生产中, 多种灾害交替发生是较为常见的, 但是由于在风险认识上还存在差异, 在风险评价的方法上还缺乏实用性和操作性强的评价模型^[16], 在气象灾害对作物影响和风险评价方面的研究也偏重于单一灾种, 因此, 开展多种灾害并发对作物影响和风险评价的研究是农业气象灾害研究的发展趋势之一。本文以东北地区玉米为研究对象, 综合分析不同生长阶段的干旱和冷害发生情况及影响程度, 结合气象灾害风险理论和农业气象灾害风险形成机制, 从致灾因子的危险性、承灾体暴露性、承灾体脆弱性和防灾减灾能力 4 个方面入手, 采用典型年份灾情数据分离出各影响因子的差异从而确定权重系数, 并结合灰色关联分析方法, 对不同生长阶段的干旱、冷害综合危险进行评价, 为当地农业气象灾害风险评价和预警提供理论依据。

1 资料与处理

1.1 研究区概况

东北地区位于 38°—54°N, 118.5°—135°E 范围内,

收稿日期: 2014-07-13 修订日期: 2014-12-03

基金项目: “十二五”农村领域国家科技支撑计划资助项目 (2011BAD32B004)

作者简介: 王春乙, 男, 辽宁人, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业气象灾害风险评估、气候变化对农作物的影响研究。北京 中国气象科学研究院

100081 Email: wcy@cms1924.org

包括辽宁、吉林、黑龙江三省,是中国纬度最高的地区。北部、东部和西部三面均有中、低山环绕,中部为广阔的三江平原、松嫩平原和辽河平原。东北地区属于温带大陆性季风气候,冬季低温干燥,夏季较温暖湿润,年平均气温一般为 $-5\sim 10^{\circ}\text{C}$,降水时空分布不均匀,全年降水量 $400\sim 1\,000\text{ mm}$,但地域间差别较大,基本由东南向西北减少。无霜期由辽南及东南沿海向北逐渐减少,为 $160\sim 200\text{ d}$,由于无霜期短,作物一年一熟^[17]。东北地区面积辽阔,地势平坦,土壤肥沃,主要种植大豆、玉米、高粱、春小麦、水稻等农作物,是中国商品率最高的商品粮基地^[18]。其农业气候资源有着独特的特点:一是热量资源不足,且年际间变化较大,低温年常发生农作物冷害;二是水资源比较丰富,但降水量的地区分布季节分配差异大,西部地区降水偏少,春旱频繁^[19]。

1.2 资料

本研究所用到的资料包括气象资料、作物资料和社会统计资料。以东北地区有农业气象观测资料记录的测站为主,选取了35个测站参与研究。气象资料为1961—2010年50 a逐日地面气候资料。作物资料为1981—2010年30 a各站玉米播种、出苗、三叶、七叶、拔节、抽雄、开花、吐丝、乳熟、成熟的普遍日期,以及各站所在县历年玉米单产、总产和播种面积数据。社会统计资料来源于《黑龙江统计年鉴》、《吉林统计年鉴》、《辽宁统计年鉴》2003—2010年社会、经济、生产等方面的统计数据,以及《中国气象灾害大典》黑龙江卷、吉林卷、辽宁卷中关于气象灾害的统计资料。

1.3 资料处理

1.3.1 发育期资料处理

采用各地发育期的多年平均值表示该地的一般发育期。为了更加准确合理地进行灾害分析,使其不仅可以反映灾害的发生情况,同时还具有农学和生物学意义,本研究考虑分阶段进行灾害的风险分析和评估。将玉米整个生长季划分为前期和后期2个生长阶段,前期从出苗到抽雄,以营养生长为主;后期从抽雄到成熟,以生殖生长为主。根据处理后的发育期资料,得到各站生长前期和后期的具体时间范围。

1.3.2 产量资料处理

农作物产量可以分离为3个部分:趋势产量、气象产量和随机“噪声”。趋势产量主要反映农业生产水平的提高对产量的影响,会随着生产水平的提高而提高,具有渐进性和相对稳定性,本研究采用直线滑动平均法对其进行模拟^[20-21];气象产量受气象因子年际变化影响,具有逐年波动性。在该研究中,用气象产量与趋势产量的比值表示减产率。

2 玉米干旱、冷害指标的确定

2.1 干旱指标

本研究以玉米生育阶段内潜在蒸散量作为需水指标,以同一阶段有效降水量作为供水指标,采用水分亏缺指数确定干旱指标,反映不同发育阶段作物的水分供需平衡。

$$DI_i = \begin{cases} 1 - P_{ei} / ET_{ci} & ET_{ci} \geq P_{ei} \\ 0 & ET_{ci} < P_{ei} \end{cases} \quad (1)$$

式中: DI_i 为第*i*阶段干旱指数,即水分亏缺指数, P_{ei} 为有效降水量(mm),可由下式计算:

$$P_{ei} = \sum_{u=1}^n (\alpha_u \times P_u) \quad (2)$$

式中: P_u 为第u次降水的降水量,mm; α_u 为有效利用系数。一般情况下, α 的取值如下:当 $P_u \leq 5\text{ mm}$ 时, $\alpha_u=0$;当 $5\text{ mm} < P_u \leq 50\text{ mm}$ 时, $\alpha_u=0.9$;当 $P_u > 50\text{ mm}$ 时, $\alpha_u=0.75$ ^[22]。

ET_{ci} 为某阶段潜在蒸散量(mm),可由下式计算:

$$ET_{ci} = k_c \cdot ET_0 \quad (3)$$

ET_0 为逐日参考蒸散量(mm),采用联合国粮农组织(Food and agriculture organization of the United Nations, FAO)的Penman-Monteith公式计算^[23]。 k_c 为逐日作物系数。参照FAO建议,将全生育期作物系数的变化过程进行分段计算。采用FAO推荐的标准作物系数和修正公式^[23-24],对作物生长前期、中期和后期3个生育阶段的标准作物系数进行修订。

采用聚类分析方法,对各站各年的干旱指数进行聚类分析,分成4类,即无旱、轻旱、中旱、重旱,参考农业干旱等级标准,并与各站产量丰歉及有历史资料的干旱年作对比,进行调整和验证,确定干旱指标(表1)。

表1 基于作物水分亏缺指数的玉米干旱指标

Table 1 Drought index of maize based on crop water deficit index

干旱等级 Drought category	干旱指标 Drought index DI
无旱 Non-drought	$DI \leq 0.2$
轻旱 Light drought	$0.2 < DI \leq 0.35$
中旱 Mid-drought	$0.35 < DI \leq 0.6$
重旱 Heavy drought	$DI > 0.6$

为检验指标的准确性,随机选取泰来、白城和朝阳3个代表站,将这3个站50 a来用干旱指标判别得到的干旱年,与《中国气象灾害大典》中所记载的历史灾情进行对比,除了个别年份无记载或者记载十分简略外,本方法判定的灾害结果与历史记载基本吻合。

2.2 冷害指标

热量指数考虑了作物不同发育阶段的适宜温度、下限温度和上限温度,反映了农作物对环境热量状况的响应及作物的生物学特性,其公式为^[25]:

$$F(T) = [(T - T_1)(T_2 - T)^B] / [(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B] \quad (4)$$

$$B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1) \quad (5)$$

式中: $F(T)$ 为热量指数, T 为日平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 、 T_1 、 T_2 分别为某日所在发育期的适宜温度, $^{\circ}\text{C}$ 、下限温度, $^{\circ}\text{C}$ 和上限温度, $^{\circ}\text{C}$,且当 $T \leq T_1$ 或 $T \geq T_2$ 时, $F(T)=0$ 。

由于东北地区幅员辽阔,热量指数分布会受到纬度、地形地势等众多因素的影响,采用统一的指标无法准确反映低温冷害的发生情况。因此采用热量指数距平百分率作为冷害指数^[26],判断分析不同发育阶段冷害的发生

情况。各站各年的冷害指数计算公式如下:

$$CI_i = \frac{F(T)_i - \overline{F(T)}}{\overline{F(T)}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: CI_i 为第 i 阶段冷害指数, $F(T)_i$ 为第 i 阶段热量指数, $\overline{F(T)}$ 为该站历年热量指数平均值。

采用聚类分析方法, 将各站各年的冷害指数进行聚类分析, 分成 3 类, 并与各站产量丰歉及有历史资料的冷害年作对比, 进行调整和验证, 确定冷害指标 (表 2)。

表 2 玉米冷害指标

Table 2 Chilling injury index of maize	
冷害等级 Chilling injury category	冷害指标 Chilling injury index CI
无冷害 Non-chilling injury	$CI \geq -2\%$
一般冷害 Light chilling injury	$-5\% \leq CI < -2\%$
严重冷害 Heavy chilling injury	$CI < -5\%$

为检验指标的准确性, 从各省随机选取一个代表站, 将判别结果与行业标准的判别结果进行比对, 结果表明, 行业标准能判断出来发生冷害的年份, 本研究所用的冷害指标均能够判别出来; 行业标准不能判断出的冷害过程, 本研究也能判别出来, 除了个别年份灾害大典上缺少相关记载外, 冷害指标判别出来的发生冷害的年份, 绝大多数都是合理的。由此可见, 冷害指标的选取是合理的。

3 东北地区玉米干旱、冷害风险评价模型构建

3.1 风险评价模型建立

灾害风险是指在未来致灾因子发生及其对人类生命财产造成损失的可能。一般而言, 一定区域气象灾害风险是由气象灾害的危险性、承灾体暴露性和脆弱性 3 个因素相互作用而形成的^[27]。但是, 风险不仅具有自然属性, 还具有社会属性, 因此, 防灾减灾能力也是制约和影响灾害风险的重要因素。由此可见, 灾害风险评价应从危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力 4 个方面入手, 构建合理的风险评价模型。

本研究采用加权综合评价法综合考虑各个因子对总体对象的影响程度, 用一个指标把各个因子综合集中起来, 用以描述整个评价对象的优劣。其公式为:

$$C_v = \sum_{i=1}^m Q_{iv} W_i \quad (7)$$

式中: C_v 是评价因子 v 的总值; Q_{iv} 是对于因子 v 的指标 i 量化值; W_i 是指标 i 的权重系数; m 是评价指标个数。

由于在构成灾害风险的 4 个要素中, 灾害的危险性、脆弱性、暴露性和灾害风险生成的作用方向是相同的, 而防灾减灾能力与灾害风险生成的作用方向是相反的, 即某区域的防灾减灾能力越强, 灾害危险性、脆弱性和暴露性对灾害生成的作用力就会受到一定的抑制, 从而减少灾害的风险度^[28]。在实际应用时, 应考虑到防灾减灾能力的反向作用力, 因此, 基于以上认识, 将灾害风险评价模型定义为^[29]:

$$R = H \cdot W_H \times V \cdot W_V \times E \cdot W_E \times \left(\frac{1}{C} \right) \cdot W_C \quad (8)$$

式中: R 表示风险指数值, H 、 V 、 E 、 C 分别表示危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力因子指数值, W_H 、 W_V 、 W_E 、 W_C 分别为危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力对应的权重。

3.2 危险性评价

气象灾害的危险性, 是指气象灾害的异常程度, 主要是由气象危险因子活动规模 (强度) 和活动频次 (概率) 决定的^[30]。一般气象危险因子强度越大, 频次越高, 气象灾害所造成的损坏损失越严重, 气象灾害的风险也越大。针对单一灾种, 危险性评价可以仅用危险因子的变异强度和灾害的发生频次表示; 但是当同时考虑多种灾害时, 仅靠变异强度和频次就不能完全反映危险因子引发的风险所造成的影响程度, 因为不同灾害本身对承灾体的影响程度就存在差异, 如果忽略危险因子本身的差异, 仅用变异强度和频次来描述危险性, 势必会平滑掉危险因子本身的特点, 在刻画综合灾害危险性时产生偏差。因此, 本研究引入权重的概念, 将某一灾害自身特点用权重来反映, 采用干旱指标和冷害指标作为危险性评价因子, 利用灾害判别结果与典型年份灾情资料相结合的方式, 确立合理的权重, 进行危险性评价。

本文定义的权重系数是灾害发生频率和单一灾害造成的损失。利用干旱指数和冷害指数判定 35 个测站 50 a 干旱和冷害发生情况, 结合各站灾情资料, 提取出所有单独发生干旱或冷害的年份, 得到指定发育阶段单独发生不同等级灾害造成的平均减产, 建立灾害等级与减产率的关系; 再用某一等级灾害发生的频率乘以对应的减产率, 得到各站在特定发育阶段发生单一灾害可能造成的总减产; 最后根据总减产之比确定各地两种灾害的权重系数。

$$w_{ai} = \frac{\sum a_{ij} m_{ij}}{\sum a_{ij} m_{ij} + \sum b_{ij} n_{ij}} \quad (9)$$

$$w_{bi} = \frac{\sum b_{ij} n_{ij}}{\sum a_{ij} m_{ij} + \sum b_{ij} n_{ij}} \quad (10)$$

式中: w_{ai} 、 w_{bi} 为某站第 i 阶段干旱、冷害对应的权重, a_{ij} 、 b_{ij} 表示该站第 i 阶段第 j 等级干旱、冷害造成的平均减产, m_{ij} 、 n_{ij} 表示该站第 i 阶段第 j 等级干旱、冷害发生的频率。

同理, 对于整个生长阶段, 提取出所有只在生长前期或后期发生灾害的年份 (包括单一灾害和复合灾害), 得到前期或者后期发生灾害时造成的平均减产, 从而确定不同生育阶段的灾害对整个生育期危险性贡献的权重。

$$w_{early} = \frac{y_e}{y_e + y_l} \quad (11)$$

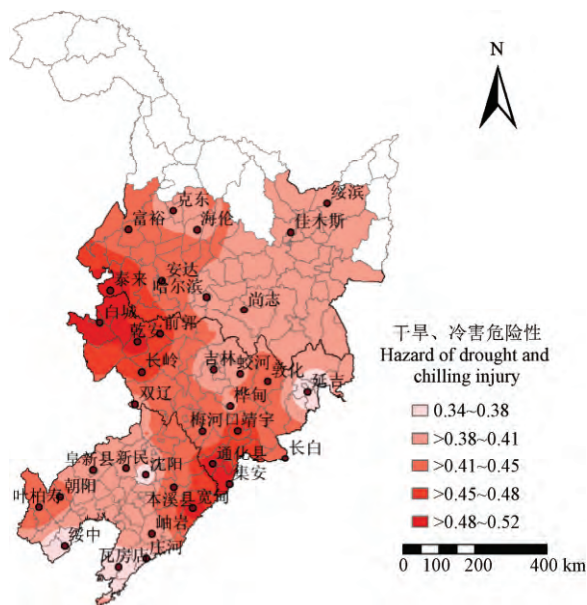
$$w_{late} = \frac{y_l}{y_e + y_l} \quad (12)$$

式中: w_{early} 、 w_{late} 分别为生长前期、生长后期权重值, y_e 、 y_l 分别为生长前期、生长后期单独发生灾害所造成的平均

减产。

确定权重后可以得到，生长前期和生长后期单独发生干旱、冷害或者并发灾害，所造成的平均减产率分别为 13.86 和 26.05，生长前期和生长后期对整个生长阶段危险性的贡献权重分别为 0.34 和 0.65。

根据前文对危险性评价模型的定义，利用干旱指数、冷害指数、各生育阶段干旱、冷害发生的权重，进行干旱、冷害危险性评价。就整个生长阶段来看（图 1），东北地区干旱、冷害危险性呈现东南部（包括辽宁东北部和吉林东部）和东北地区西部（主要指辽宁西部和吉林西部）2 个高值中心，危险性指数均达到 0.48 以上；而低值区位于辽宁南部和辽东半岛，危险性指数在 0.35 左右。



注：图中空白处为玉米非种植区；后同。

Note: Blanks in figure are maize non-planting areas; Same as below.

图 1 玉米全生育期干旱、冷害危险性

Fig.1 Hazard assessment of drought and chilling injury in whole growth stages of maize

3.3 脆弱性评价

采用多年平均减产率、气候敏感性指数和环境适应性指数，作为脆弱性评价指标。

多年平均减产率为各站 50 a 中发生减产的年份减产率的平均值。玉米的气候敏感指数^[31]表示作物的产量对气候条件的反应，与作物产量、气候生产力、作物蒸散量和最大蒸散量有关。环境适应性指数^[32]表示作物生育期对环境变化的反应，与生育期长短有关。

根据多年平均减产率、气候敏感性指数和环境适应性指数，利用灰色关联度方法确定 3 个指数值在脆弱性评价中对应的权重（表 3）。

结果表明，前期辽宁绝大部分地区、黑龙江省西北部和东北部脆弱性较明显，而黑龙江中部、吉林中部脆弱性较弱，对作物生长有利。后期整个东北三省脆弱性在前期的高值区有所减弱，而在低值区有所增强。

表 3 脆弱性评价因子与多年平均减产率的关联度及权重值
Table 3 Correlation between vulnerability evaluation factors and average yield reduction rate and corresponding weights

指标 Index	多年平均减产率 Average yield reduction rate	气候敏感性 Climatic sensitivity	环境适应性 Environmental suitability
关联度 Correlation	1.00	0.67	0.73
权重 Corresponding weight	0.41	0.28	0.30

3.4 暴露性评价

采用东北三省所有玉米种植区的县级耕地面积资料和玉米播种面积资料，将玉米播种面积与耕地面积的比值，作为暴露性评价指标，其计算公式如下：

$$E = \frac{A_M}{A_F} \quad (15)$$

式中： E 为暴露性指数， A_M 为某县玉米种植面积， m^2 ； A_F 为某县耕地面积， m^2 。

根据东北三省各县玉米播种面积/耕地面积的数据，黑龙江中部、吉林东南部、辽宁西北部和中部分大部分地区的玉米播种面积所占比例较高，作为承灾体所暴露于可能风险中的部分也越多，遭受灾害影响的可能性也越大；而在东北地区东部，玉米播种面积所占比例较少，暴露的承灾体较少，遭受灾害影响的可能性也较小。

3.5 防灾减灾能力评价

根据 2003—2010 年黑龙江、吉林、辽宁统计年鉴中反映农业现代化水平的相关统计数据，采用农林牧渔业劳动力、农民人均纯收入、农业机械总动力、农用化肥施用量、农村用电量、有效灌溉面积作为防灾减灾能力评价指标，同时，采用产量的波动差异参数 Q 作为衡量评价指标是否合理，以及影响大小的标准，确保所选因子可以充分反映当地的抗灾能力， Q 为产量变异系数的倒数，其公式如下：

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}}} \quad (16)$$

式中： Q 表示产量波动差异参数， Y_i 表示某年产量， \bar{Y} 表示 n 年平均产量。产量变异系数越小， Q 值就越大，表明产量越稳定，抗灾能力越强； Q 值越小，表明产量波动越大，抗灾能力越弱，粮食生产面临的风险越大。

采用灰色关联度方法，计算 6 个防灾减灾能力评价因子与产量变异系数的关联度。结果表明，农林牧渔业劳动力、农民人均纯收入、农业机械总动力、农用化肥施用量、农村用电量、有效灌溉面积 6 项指标与产量变异系数的关联度分别为 0.61、0.85、0.69、0.77、0.71、0.77，关联度较高，说明用这 6 项因子表征某一地区的防灾减灾能力是合理的。根据灰色关联度的计算结果，可以得到 6 个防灾减灾能力评价因子对应的权重值（表 4）。

表 4 防灾减灾能力评价因子与产量变异系数的关联度及权重值
Table 4 Correlation between disaster prevention and mitigation capacity factors and yield variation coefficient and their corresponding weights

指标 Index	农林牧渔业劳动力 Labor of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery industry	农民人均纯收入 Rural per capita net income	农业机械总动力 Total power of agriculture machine	农用地肥施用量 Fertilizer applied amount	农村用电量 Rural electricity consumption	有效灌溉面积 Effective irrigation area
关联度 Correlation	0.61	0.85	0.69	0.77	0.71	0.77
权重 Corresponding weight	0.14	0.19	0.16	0.17	0.16	0.18

结合以上 6 个防灾减灾能力评价因子，利用加权综合评价法，进行东北地区玉米防灾减灾能力评价。整个东北三省，吉林省的防灾减灾能力最强，辽宁省次之，黑龙江省最弱。

4 东北地区玉米干旱、冷害风险评价和区划

4.1 东北地区玉米干旱、冷害风险评价

以东北地区 35 个代表站多年平均减产率序列为参考序列，分别计算危险性指数、脆弱性指数、暴露性指数、防灾减灾能力指数与参考序列的灰色关联度，根据灰色关联度判别结果确定危险性、脆弱性、暴露性、防灾减灾能力权重（表 5）。

表 5 4 个指数与产量变异系数的关联度及权重值
Table 5 Correlation between four indices and of yield variation coefficient and their corresponding weights

指标 Index	危险性 Hazard	脆弱性 Vulnerability	暴露性 Exposure	防灾减灾能力 Emergency response and recovery
关联度 Correlation	0.84	0.63	0.64	0.68
权重 Corresponding weight	0.30	0.23	0.23	0.24

根据构建的风险评价模型，对东北地区玉米不同生

长阶段干旱、冷害风险指数进行计算，结果如下：在玉米生长前期（图 2a），风险指数的高值区主要位于黑龙江西北部（包括甘南、讷河、拜泉、克山、海伦等地）、吉林东部（包括靖宇、桦甸、敦化、蛟河等地）以及辽宁东北部新宾、本溪一带，风险指数值高达 0.7 以上，黑龙江东北部宝清、富锦、桦南一带，风险指数值也达到 0.68 以上。而在黑龙江西南部安达、肇庆、肇州、大庆、吉林西部、辽宁西南部等地，风险指数较低，均在 0.4 左右。玉米生长后期（图 2b），风险指数值的分布形势有所改变，黑龙江西部和吉林西北部风险指数值有所增加，黑龙江西部齐齐哈尔、泰来等地被划入高值区，风险值在 0.8 以上，吉林西部的镇赉、大安、白城、洮南、通榆、乾安等地风险值也达到 0.6 以上，属于次高值区。而在吉林东部、辽宁东北部，风险指数值较前期下降明显，风险指数值在 0.4 到 0.6 之间。低值区位于辽宁中部和辽东半岛，风险指数值均在 0.4 以下。对于玉米整个生长发育阶段的风险评价，如图 2c，高风险值区位于黑龙江西南部和东北部，以及辽宁西部建平县一带，风险指标值在 0.8 以上；吉林西北部、东南部、辽宁东北部为次高值区，风险指标值在 0.6~0.7 之间；低值区仍位于辽宁中南部及辽东半岛，风险值在 0.3 左右。

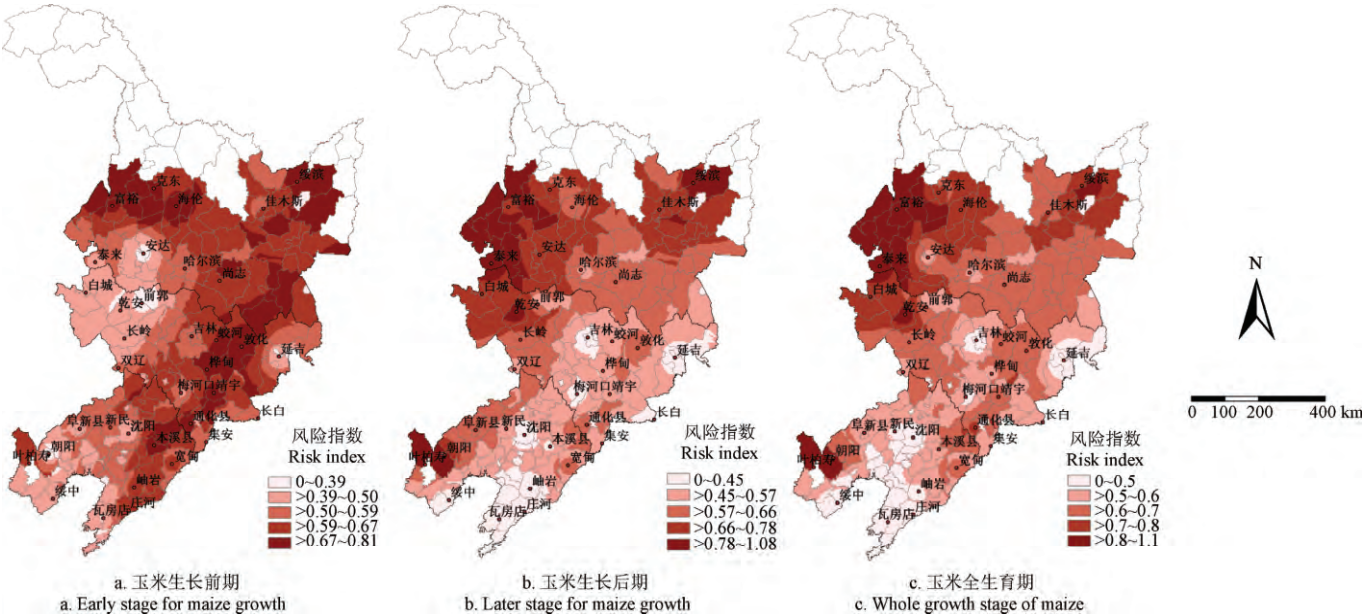


图 2 玉米生长前期、后期与全生育期风险指数
Fig.2 Risk index of drought and chilling injury in different growth stages of maize

为了对本研究所用的风险评价模型进行检验，将 35 个代表站 50 a 平均减产率与评价模型得到的干旱、冷害风险指数做相关分析和回归分析（图 3），发现多年平均

减产率与风险指数值呈现较好的相关关系，相关系数达到 0.6745，回归分析 R^2 达到 0.5039，通过了 0.05 显著性检验。由此可见，该评价模型可以较好地反映东北地区

玉米干旱、冷害的风险特征。

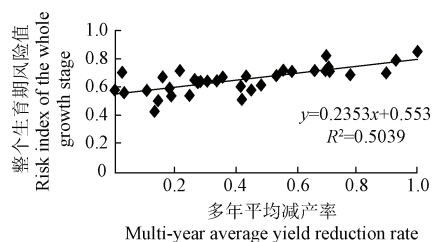


图3 风险指数与平均减产率的回归分析

Fig.3 Regression analysis of risk index and average yield reduction rate

4.2 东北地区玉米干旱、冷害风险区划

采用聚类分析的方法，对干旱、冷害风险指数进行分析，以县为基本研究单元，将整个研究区域划分为低风险区、中低风险区、中等风险区、中高风险区和高风险区5类，如表6所示。

表6 东北地区玉米干旱、冷害风险区划等级

Table 6 Risk regionalization grade of drought and chilling injury of maize in Northeast China

区划等级 Regionalization grade	风险指数 Risk index R
低风险区 Low risk areas	$R \leq 0.42$
中低风险区 Mid-low risk areas	$0.42 < R \leq 0.55$
中等风险区 Middle risk areas	$0.55 < R \leq 0.66$
中高风险区 Mid-high risk areas	$0.66 < R \leq 0.79$
高风险区 High risk areas	$R > 0.79$

由图4可知，高风险区域集中在黑龙江西部以及辽宁的建平县、朝阳县；中高值区分布在黑龙江中西部、中东部、吉林西部、辽宁东北部；黑龙江南部、吉林中部、辽宁西部和东部为大片的中值区；而中低值和低值区主要分布在吉林东部和辽宁中南部。

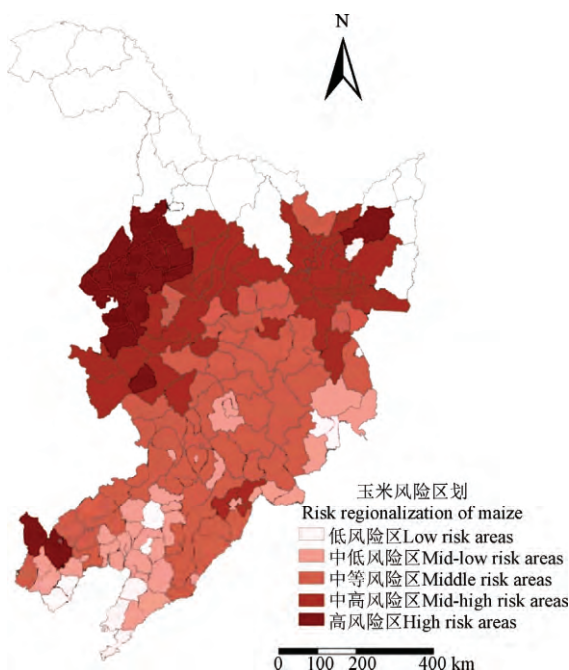


图4 玉米全生育期干旱、冷害风险区划

Fig.4 Risk regionalization of drought and chilling injury in whole growth stage of maize

5 结论与讨论

本文以玉米出苗—抽雄、抽雄—成熟2个生长阶段里发生的干旱及冷害为研究对象，依据自然灾害风险分析理论，以风险评价指标体系和风险评价模型建立为重点，对东北地区玉米干旱、冷害风险进行评价。评价结果表明，综合风险的高风险区域集中在黑龙江西部以及辽宁西部局地；而中低值和低值区主要分布在吉林东部和辽宁中南部。事实上，综合风险的高风险区域恰恰是干旱影响最为严重的地区，且这些地区应对气象灾害的脆弱性较高，防灾减灾能力也较弱；而在综合风险的低风险区域，如辽东半岛，虽然暴露性比较高，但是由于该地区防灾减灾能力很强，干旱、冷害的影响程度也不是很大，因此综合风险是较低的；这就说明本研究采取的评估方法可以较为真实准确的反映干旱、冷害对东北地区玉米造成的风险。

本研究的创新性在于，在危险性模型的构建上，引入了权重系数，考虑在复合灾害中，单灾种因素对作物的影响，从而可以更加细致的描述危险性的构成因素。在权重的确定上，采用指标判别与灾情资料结合的方法，得出某一生长阶段单一灾种各个等级所造成的平均减产，从而体现两种灾害对作物影响的自身特点；再引入某种灾害不同等级的发生频率，便可以清晰刻画不同生长阶段、不同灾害的影响差异，更加准确的描述综合灾害的危险性。在风险评价模型的建立过程中，采用灰色关联度方法确定各个评价因子的权重，是一种较为客观合理的赋权方式。另外，在防灾减灾能力评价方面，充分考虑研究区域的各项相关社会经济因素，以县为最小评价单元，进行防灾减灾能力评价，如此大范围、多因素的防灾减灾能力分析是以往研究所未曾做过的。

本研究的意义之一就是为建立综合农业气象风险评价体系探索合适的方法，建立合适的模型。通过分析验证可知，本研究采用的权重确定方法和评价因子选择较为合理，可以为后续研究提供理论依据。在今后的研究中，可以参考本研究的方法和结果，不断完善各项评价因子，选择更加合适的指标体系，以求对区域农业气象灾害对作物的影响及风险评价给出准确评估。

【参考文献】

- [1] 李世奎. 中国农业灾害风险评价与对策[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [2] 杜鹏, 李世奎. 农业气象灾害风险评价模型及应用[J]. 气象学报, 1997, 55(1): 95—102.
Du Peng, Li Shikui. An agro-meteorological disaster risk analysis model and its application[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1997, 55(1): 95—102. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李世奎, 霍治国, 王素艳, 等. 农业气象灾害风险评估体系及模型研究[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 77—87.
Li Shikui, Huo Zhiguo, Wang Suyan, et al. Risk evaluation system and models of agrometeorological disasters[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(1): 77—87. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 472—476.

- Chen Xiaoyi, Ma Xiaoqun, Sun Xiubang. Risk analysis of agricultural drought for winter wheat during growing period in Anhui province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(4): 472—476. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杜尧东, 毛慧勤, 刘锦奎. 华南地区寒害概率分布模型研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 103—107.
Du Yaodong, Mao Huiqin, Liu Jinluan. Study on probability distribution models of cold damage in south China[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(2): 103—107. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡雪琼, 吉文娟, 张茂松, 等. 云南省冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 大气科学学报, 2011, 34(3): 356—362.
Hu Xueqiong, Ji Wenjuan, Zhang Maosong, et al. Drought risk regionalization for winter wheat in Yunnan province[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(3): 356—362. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘锦奎, 杜尧东, 毛慧勤. 华南地区荔枝寒害风险分析与区划[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 126—130.
Liu Jinluan, Du Yaodong, Mao Huiqin. Risk analysis and zonation of cold damage to litchi in South China[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 126—130. (in Chinese with English abstract)
- [8] 马晓群, 陈晓艺, 盛绍学. 安徽省冬小麦渍涝灾害损失评估模型研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 158—162.
Ma Xiaoqun, Chen Xiaoyi, Sheng Shaoxue. Models of evaluating waterlogging loss of winter wheat in Anhui province[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张养才, 何维勋, 李世奎. 中国农业气象灾害概论[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [10] 孙凤华, 杨素英, 陈鹏狮. 东北地区近 44 年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 751—755.
Sun Fenghua, Yang Suying, Chen Pengshi. Climatic warming-drying trend in northeastern China during the last 44 years and its effects[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 751—755. (in Chinese with English abstract)
- [11] 马树庆, 裴祝香, 王琪. 中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 137—141.
Ma Shuqing, Xi Zhuxiang, Wang Qi. Risk evaluation of cold damage to corn in northeast China[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 137—141. (in Chinese with English abstract)
- [12] 裴祝香, 马树庆, 王琪. 东北区低温冷害风险评估及区划[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 98—102.
Xi Zhuxiang, Ma Shuqing, Wang Qi. Risk evaluation and zonation of the low temperature and cold damage in northeast China[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(2): 98—102. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王远皓. 东北地区玉米冷害的风险评估技术研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.
Wang Yuanhao. Study on the Risk Assessment Technology of Chilling Damage for Corn in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [14] 金冬梅, 张继权, 韩俊山, 等. 吉林省城市干旱缺水风险评价体系与模型研究[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 100—104.
Jin Dongmei, Zhang Jiquan, Han Junshan, et al. Risk assessment system and model research on urban drought and water shortage in Jilin province[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 100—104. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张继权, 严登华, 王春乙, 等. 辽西北地区农业干旱灾害风险评价与风险区划研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(3): 300—306.
Zhang Jiquan, Yan Denghua, Wang Chunyi, et al. A study on risk assessment and risk regionalization of agricultural drought disaster in northwestern regions of Liaoning province[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(3): 300—306. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王春乙, 王石立, 霍治国, 等. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 659—671.
Wang Chunyi, Wang Shili, Huo Zhiguo, et al. Progress in research of agro-meteorological disaster in China in recent decade[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 659—671. (in Chinese with English abstract)
- [17] 周琳. 东北气候[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [18] 方修琦, 王媛, 朱晓禧, 等. 气候变暖的适应行为与黑龙江省夏季低温冷害的变化[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 664—672.
Fang Xiuqi, Wang Yuan, Zhu Xiaoxi, et al. Change of cool summer hazard under an adaptation behavior to the climate warming in Heilongjiang province, northeast China[J]. Geographical Research, 2005, 24(5): 664—672. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李世奎, 侯光亮, 欧阳海, 等. 中国农业气候资源和农业气候区划[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [20] 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.
Xue Changying, Huo Zhiguo, Li Shikui, et al. Risk assessment of drought and yield losses of winter wheat in the northern part of north China[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 131—139. (in Chinese with English abstract)
- [21] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 等. 灌溉降低华北冬小麦干旱减产的风险评估研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 131—136.
Xue Changying, Huo Zhiguo, Li Shikui, et al. Action of irrigation on decreasing yield reduction due to drought: a risk assessment of winter wheat in north China plain[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 131—136. (in Chinese with English abstract)
- [22] 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [23] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[J]. FAO Irrigation and Drainage paper No. 56, Rome, 1998: 103—134.
- [24] 李彩霞, 陈晓飞, 韩国松, 等. 沈阳地区作物需水量的预测研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, 5: 61—67.
Li Caixia, Chen Xiaofei, Han Guosong, et al. Research on crop water requirement prediction in Shenyang region[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, 5: 61—67. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王春乙, 郭建平. 农作物低温冷害综合防御技术研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [26] 吕厚荃. 中国主要农区重大农业气象灾害演变及其影响评估[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [27] 黄崇福. 自然灾害风险评价: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [28] 王绍玉, 唐桂娟. 综合自然灾害风险管理理论依据探析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 33—38.
Wang Shaoyu, Tang Guijuan. Exploratory analysis of theoretical basis for integrated natural disaster risk management[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(2): 33—38. (in Chinese with English abstract)
- [29] Davidson R A, Lamber K B. Comparing the hurricane disaster risk of U.S.coastal counties[J]. Natural Hazards Review, 2005, 6(3): 131—139.

- 2001, 2(3): 132—142.
- [30] 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[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007.
- [31] 张恒嘉. 几种大田作物水分—产量模型及其应用[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 997—1001.
Zhang Hengjia. Field crop water-yield models and their applications[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(5): 997—1001. (in Chinese with English abstract)
- [32] 阎莉, 张继权, 王春乙, 等. 辽西北玉米干旱脆弱性评价模型构建与区划研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 788—794.
Yan Li, Zhang Jiquan, Wang Chunyi, et al. Vulnerability evaluation and regionalization of drought disaster risk of maize in northwestern Liaoning province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(6): 788—794. (in Chinese with English abstract)

Risk assessment of drought and chilling injury of maize in Northeast China

Wang Chunyi^{1,2}, Cai Jingjing^{1,3}, Zhang Jiquan⁴

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Hainan Meteorological Service, Haikou 570203, China;
3. Shenzhen Air Traffic Management Station, Civil Aviation Administration of China, Shenzhen 518128, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences/Natural Disaster Research Institute, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Northeast China is the important commodity grain base of China, but the characteristics of the climate resources in this area show insufficient heat and great differences in regional and seasonal distribution of precipitation, which could lead to the chilling injury, drought and other agriculture meteorological disasters. During the production, especially at the stages of crop growth, the disaster-inducing factor for a particular agriculture meteorological disaster may occur with some disaster-inducing factors for other disasters simultaneously or successively. So the final output of the crop was also influenced by various factors together. Therefore, it was of more practical significance to consider the major disasters comprehensively and analyze their effects on the growth of crop. In this study, the meteorological data from 1961 to 2010, maize growth data from 1981 to 2010, production area data from 1961 to 2010 in 35 agriculture meteorological stations, disaster record for the latest 50 years in 3 provinces of Northeast China, and social and economic statistics for the latest 10 years in the counties of these 3 provinces were employed. The drought and chilling injury at two stages of the maize including emergence-tasseling and tasseling-mature was studied based on the theory of natural disaster risk analysis, and the risk of the drought and cold injury to corn in Northeast China was evaluated by emphasizing the creation of the risk assessment index system and risk assessment model. The indices of drought and chilling injury risk assessment model of the maize included hazard, vulnerability, exposure, and emergency response and recovery. Combined the evaluation from disaster index and the record of typical disastrous year, the weights of hazards were made according to the actual drought and chilling damage conditions. The contributions of the compound disaster risk to the whole growth and development of the maize at the early and late stage were 0.347 and 0.6527, respectively. The weights of hazard, vulnerability, exposure and emergency response and recovery ability were explained and provided objectively. These given weights showed that hazard and emergency response and recovery ability were the two most important factors in the model. The risk assessments for the maize drought and chilling damage at different growth and development stages were listed as below: at the early stage, the high values of risk index were distributed in the northwest of Heilongjiang Province, the east of Jilin Province and the northeast of Liaoning Province, while in the southwest of Heilongjiang Province, the west of Jilin and the southwest of Liaoning, the risk index values were relatively low; at the later growth stage, the distribution of the risk index changed, and the risk index values for west Heilongjiang Province and northwest Jilin increased, but decreased considerably in the east of Jilin and northeast of Liaoning. For the whole growth and development period of the maize, the high values of risk index were in the southwest and northeast of Heilongjiang Province and the west of Liaoning Province, with the value of above 0.8; the moderate values were found in the northwest and southeast of Jilin Province and the northeast of Liaoning Province, with the value of between 0.6 to 0.7; the low values were in the central south of Liaoning Province and Liaoning peninsula, with the value of around 0.3.

Key words: crops; meteorology; risk assessment; maize; drought; chilling injury