

Dynamic Evaluation and Regionalization of Maize Drought Vulnerability in the Midwest of Jilin Province

Ying Guo^{1,2,3}, Jiquan Zhang^{1,2,3,*}, Rui Wang⁴, Zhijun Tong^{1,2,3},
and Xingpeng Liu^{1,2,3}

¹ School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

² Key Laboratory for Vegetation Ecology, Ministry of Education, Changchun 130024, China

³ State Environmental Protection Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

⁴ Liaoning University of Technology, School of Chemistry and Environmental Engineering, Jinzhou, 121001, China

*Corresponding author. Email: zhangjq022@nenu.edu.cn

ABSTRACT

Drought vulnerability analysis of crops can build a bridge between hazard factors and disasters and become the main tool to mitigate the impact of drought. However, the resulting disagreement about the appropriate definition of vulnerability is a frequent cause for misunderstanding and a challenge for attempts to develop formal models of vulnerability. In this paper, the daily meteorological data, corn yield data, social economic data and other data of 9 meteorological stations in central and western Jilin Province from 1985 to 2015 are used. This paper presents a generally applicable conceptual framework of vulnerability that combines a nomenclature of vulnerable situations and a terminology of vulnerability based on the definition in the intergovernmental panel on climate change (IPCC) report. By selecting 10 indicators, the drought disaster vulnerability assessment model is established from four aspects. In order to verify our model, we present a case study of maize drought vulnerability in the Midwest of the Jilin Province. Our analysis reveals the relationship between each single factor evaluation indicator and drought vulnerability, as well as each indicator to every other indicator. The results show that the drought disturbing degree in different growth periods increases from the central part of the Jilin Province to the western part of the Jilin Province. The sensitivity degree showed an increasing trend from the southeast to the northwest. The places with the strongest self-recovery ability are mainly concentrated in Changchun, Siping, Baicheng, and the other area. The ability to adjust to drought in each growth period is weak and crop yield reduction caused by drought is easy to create. Environmental adaptability is closely related to the social and economic situation every year, so it changes greatly and is flexible. Areas with strong drought vulnerability are mainly concentrated in Baicheng, Tongyu, and Qianguo. In order to verify and test the applicability of the model, regression analysis was made between the vulnerability index and the yield reduction rate of corn in three typical drought years, and it was found that there was a linear correlation between the two, and each growth period passed the significance F test of $\alpha = 0.05$, which indicated that the constructed model could reasonably evaluate and divide the drought vulnerability of corn. The research results can provide a certain basis for risk assessment, early warning, and disaster prevention and mitigation of agricultural drought disaster in the research area.

Keywords: maize, vulnerability evaluation model, growth stage, entropy combination weight method, regionalization map

吉林省中西部地区玉米干旱脆弱性动态评价与区划

郭莹^{1,2,3}, 张继权^{1,2,3*}, 王蕊⁴, 佟志军^{1,2,3}, 刘兴朋^{1,2,3}

¹ 东北师范大学环境学院, 长春, 130024

² 教育部植被生态学重点实验室, 长春, 130024

³ 东北师范大学湿地生态与植被恢复国家环境保护重点实验室, 长春, 130024

⁴ 辽宁工业大学, 化学与环境工程学院, 锦州, 121001

* 通讯作者. 电子邮箱: zhangjq022@nenu.edu.cn

摘要

作物干旱脆弱性分析可以在致灾因子与灾情之间架起桥梁, 成为减轻干旱影响的主要工具。然而, 由此产生的对脆弱性的适当定义的分歧经常引起误解, 并对开发正式脆弱性模型的尝试构成挑战。本文利用吉林省中西部 9 个气象站 1985-2015 年 30 a 的逐日气象数据、玉米产量数据、社会经济数据等数据, 根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 报告中对气候变化背景下脆弱性的定义, 提出了一个普遍适用的脆弱性概念框架。选取 10 个指标, 从干旱扰动程度、敏感性、自身恢复能力和环境适应能力四个方面建立了干旱灾害脆弱性评价模型。为了验证模型的正确性, 我们以吉林省中西部地区玉米干旱脆弱性为例进行了实证研究。分析揭示了各单因子评价指标与干旱脆弱性的关系, 以及各指标与其他指标之间的关系。结果表明, 吉林省中部至西部玉米不同生育期的干旱干扰程度逐渐增大。敏感度由东南向西北呈上升趋势。自我恢复能力最强的地方主要集中在长春、四平、白城等地区。各生育期对干旱的适应能力较弱, 易造成作物减产。环境适应性每年都与社会经济形势密切相关, 变化程度大, 具有灵活性。干旱脆弱性强的地区主要集中在白城、通榆、前郭。为了验证并检验模型的适用性, 利用该脆弱性指数与三个典型干旱年分玉米减产率进行回归分析, 发现二者存在二次方程线性相关性, 并且每个生育期都通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性 F 检验, 说明所构建的模型能较为合理的对玉米干旱脆弱性进行评价与区划。研究成果可为研究区农业旱灾风险评估、预警和防灾减灾提供一定的依据。

关键字: 玉米, 脆弱性评估模型, 生育期, 熵组合权重法, 区划地图。

1. 引言

农业在支持农村生计和经济增长方面发挥着主导作用, 而农业系统容易受到外界气候的影响, 无论是自然因素造成的, 还是人类活动造成的^[1]。作物脆弱性的定量评价对农业干旱风险的定量评价具有重要意义, 区域作物脆弱性评价可以反应区域对灾害的抵抗能力和灾害风险的等级^[2], 进而减少因灾害导致的粮食产量损失。吉林省中西部位于我国黄金玉米带的核心部分, 是我国重要的商品粮基地。该地区历史上便为干旱频发区, 农业生产对干旱事件高度敏感, 降雨量以及降雨模式在决定农业生产方面发挥着关键作用。对该区域玉米进行干旱脆弱性的研究, 确定易受干旱影响的区域及地区, 向决策者提供有关脆弱性的适当信息, 对指导区域适应未来气候变化, 保证粮食生产具有重大意义。

在 IPCC 第三次评估报告中, 脆弱性被定义为一个环境或社会系统易受影响的程度, 或无法应付的

气候变化的不利影响 (包括气候变化和极端情况)^[3]。IPCC 第五次评估报告强调了干旱脆弱性的社会方面^[4]。脆弱性的关键特点就是其动态性, 这种动态性可能是由于一个地区的生物物理和社会经济特征的变化而发生的变化^[5], 对脆弱性进行评价就要抓住这一特点。

本文的目的在于建立一个多指标方法来评估吉林省中西部玉米不同生育期干旱脆弱性。从脆弱性成因入手, 将单指标评价因子与社会经济指标联系起来, 以确定研究区哪些地区最易遭受干旱影响。利用现有的县市玉米产量以及适应能力的代理指标, 进行干旱扰动程度、敏感性、自身恢复能力以及环境适应能力评价。通过简化、精选指标, 将此脆弱性评价模型应用于缺乏更详细数据的区域。

2. 研究区概况

本文所选研究区为吉林省中西部地区，吉林省中西部地区土地总面积为 $798 \times 104 \text{ km}^2$ ，占吉林省土地总面积的 44.23%^[6, 7]。研究区位于吉林省松嫩平原西南端，科尔沁草原东部，包含松原市、白城市、四平市、长春市等 19 个县市^[6]。吉林省中西部为吉林省主要的商品粮产区，是我国黄金玉米带的核心部分，为半干旱半湿润的大陆性季风气候，四季分明，雨热同期。全区降水多年平均值为 399.7~576.7mm，降水量年际变化大，年内分配不均匀。由于研究区干旱发生频繁，持续时间较长，很大程度上制约了粮食的产量。

3. 材料与方法

3.1. 数据来源

选取吉林省中西部地区的 9 个农业气象观测站为研究站点，研究数据包括吉林省中西部各区域的气象数据、水资源数据、土壤特征数据、玉米生理特征数据、农业统计数据、空间数据；气象数据来源于中国气象数据共享网，包括 1985 年-2015 年逐日气象要素（降水量、气温、平均风速、）；发育期数据来源于吉林省农科院，包括 1985 年-2015 年研究区玉米播种、出苗、拔节、抽雄、乳熟、成熟的日期；各市、县灌溉设施数据、经济数据来源于《吉林省统计年鉴》；NDVI 数据来源于地理空间数据云^[8-14]。

3.2. 研究方法

3.2.1. 评价指标标准化处理

由于各评价指标的量纲不统一，所以在进行权重计算时需先进行标准化处理，以消除指标间不同单位、不同度量的影响。本文选用极差化方法^[15]，其中对于正向，反向影响分别用如下指标：

$$R_{ij} = \frac{X_{ij} - \min_j(X_{ij})}{\max_j(X_{ij}) - \min_j(X_{ij})} \quad (1)$$

$$R'_{ij} = \frac{\max_j(X_{ij}) - X_{ij}}{\max_j(X_{ij}) - \min_j(X_{ij})} \quad (2)$$

3.2.2 熵组合权重法

熵 (entropy) 指的是体系的混乱程度，是系统状态不确定性的一种度量^[16, 17]。利用熵值大小来计算指标权重的方法被称之为熵权法^[18]，评价结果有较强的数学理论依据，但无法灵活体现决策者对各指标的重视程度。层次分析法^[19]是另一类确定指标权重的常用主观赋值法，思维方式具备多准则、多属性的特点，但评价结果受人为主观因素影响较大，无

法克服决策者的主观偏好。为了使指标权重兼备主观意向与客观特性，本文同时使用了层次分析法和熵权法来获得指标的权重比例 w_j^a 和 w_j^b ，再使用乘法归一化方法，得到指标的组合同权重 w_j 。

$$w_j = \frac{w_j^a w_j^b}{\sum_{j=1}^m w_j^a w_j^b} \quad j=1,2,\dots,m \quad (3)$$

其中： w_j 为第 j 个指标的组合同权重， w_j^a 为第 j 个指标的层次分析法权重系数， w_j^b 为指标 j 的熵权法权重系数。

3.3. 脆弱性模型的建立

本文基于 IPCC 对脆弱性的定义，综合考虑区域气候变化下的脆弱性的定义，将敏感性、适应能力、作物自身恢复能力以及干旱扰动程度考虑进模型，最终将脆弱性定义为：

$$DVI = \frac{HI \times S}{RS \times Ra} \quad (4)$$

$$S = \sum_{i=1}^n W_{Si} X_{Si} \quad (5)$$

$$RS = \sum_{i=1}^n W_{Rsi} X_{Rsi} \quad (6)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n W_{Hli} X_{Hli} \quad (7)$$

$$Ra = \sum_{i=1}^n W_{Rai} X_{Rai} \quad (8)$$

式中，DVI 表示玉米干旱脆弱性指数，HI 表示干旱扰动程度（由 DI 指数求得）；S 表示作物敏感性（由气候敏感性指数，NDVI 指数求得）；Rs 表示自身恢复能力（由环境适应性指数及抗旱性指数求得）；Ra 表示社会、经济等要素的适应能力（由有效灌溉面积、农民人均收入（元）、农用水泵、教育支出（元）、土壤指数求得）。 X_{Si} 、 X_{Hli} 、 X_{Rsi} 、 X_{Rai} 分别表示敏感性、干旱扰动程度、自身恢复能力以及环境适应性， W_{Si} 、 W_{Hli} 、 W_{Rsi} 、 W_{Rai} 分别表示对应的第 i 个指标的权重。

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - Zi) - \min Zi}{\max Zi - \min Zi} \quad (9)$$

$$Zi = P / ETc \quad (10)$$

$$ETc = Kc \times ET_0 \quad (11)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + 900\gamma(e_s - e_a)/(T + 273)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (12)$$

DI 为玉米某一生育期内的干旱致灾强度指数; Zi 为第 i 天受水分胁迫影响的胁迫值; n 为生育期内受水分胁迫影响的天数;maxZi 和 minZi 分别为所有年份内相应生育期的最大值和最小值;P 为逐日降水量; ETC 为潜在蒸散量;KC 为玉米某时段的作物系数;ET0 为逐日参考作物蒸散量,mm · d1,Rn 为地表净辐射; G 为土壤通量; T 为日平均气温; u2 为 2 m 高处风速; es 为饱和水汽压; ea 为实际水汽压; Δ为饱和水汽压曲线斜率; γ 为干湿表常数。

$$Km = \frac{1 - |Yw| / Yv}{1 - V / L} \times 100 \quad (13)$$

$$Yv = 30000(1 - e^{-0.000956(V-20)}) \quad (14)$$

Km 为气候敏感性指数, Yw 为当年实际生产力(kg · hm²), Yv 为气候生产力(kg · hm²), 采用 Thornthwaite Memorial 模型计算作物气候生产力。30 000 是经验系数, e=2.718 28, V 为年平均蒸发量(mm), R 为年降水量(mm), L 为年平均最大蒸发量(mm), t 为年平均气温。

$$Kr = (T - T_0) / T_0 \quad (17)$$

Kr 环境适应性指数, T₀ 为区域多年平均的生育期长度、T 为当年实际生育期长度。

$$SQI = \prod_{i=1}^2 (Ci)^{Wi} \quad (18)$$

SQI 为土壤指数, Ci 为各指标的隶属度, Wi 为第

表 1 吉林省中西部各生育期玉米干旱脆弱性评价指标权重

| 指标 | 各生育期权重系数 | | | | | | | | | |
|--------|----------|---------|--------------|---------|--------|--------|-----------|--------|---------|--------|
| | DI 指数 | 气候敏感性指数 | 归一化植被指数 NDVI | 环境适应性指数 | 抗旱性 | 有效灌溉面积 | 农民人均收入(元) | 农用水泵 | 教育支出(元) | 土壤指数 |
| 播种-出苗期 | 0.1563 | 0.124 | 0.1455 | 0.1483 | 0.1905 | 0.054 | 0.0436 | 0.0495 | 0.0387 | 0.0495 |
| 出苗-拔节期 | 0.1845 | 0.1384 | 0.1421 | 0.1342 | 0.1826 | 0.0571 | 0.0463 | 0.0455 | 0.0238 | 0.0455 |
| 拔节-抽雄期 | 0.1923 | 0.1012 | 0.1515 | 0.1343 | 0.1886 | 0.0564 | 0.0408 | 0.0499 | 0.0311 | 0.0539 |
| 抽雄-乳熟期 | 0.1773 | 0.1013 | 0.1697 | 0.1413 | 0.1906 | 0.0474 | 0.0477 | 0.0586 | 0.0242 | 0.042 |
| 乳熟-成熟期 | 0.1664 | 0.0943 | 0.169 | 0.1479 | 0.1944 | 0.056 | 0.0569 | 0.0598 | 0.0118 | 0.0435 |

$$V = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1.05R/L)^2}} \quad (15)$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3 \quad (16)$$

i 个评价指标权重(本文中都被取做 0.5)。

本文中玉米的抗旱性根据吉林省中西部各年份玉米播种品种的不同进行划分^[20], 对不同品种的玉米划分为抗旱性和非抗旱性两种, 分别赋值 2、1。各玉米品种的抗旱性通过查询中国作物种质网得到^[9]。

4. 结果与讨论

根据指标体系及各指标的权重, 计算得到吉林省中西部地区 2004、2007 和 2014 三个典型干旱年的敏感性, 自身恢复能力, 干旱扰动程度, 环境适应能力以及脆弱性。

干旱敏感性分析主要考虑了气候敏感性指数及 NDVI 两个指标。2004 年, 敏感性程度呈现从东南向西北递增的趋势, 整个区域都属于较敏感区域; 2007 年, 整体敏感性分布于 2004 年相似, 敏感程度由东南向西北递增的状态, 干旱对玉米整个生育期的生长都起到明显的制约作用; 2014 年, 敏感程度分布整体差异性较小, 除榆树、四平、双辽外多数区域都处于敏感性高的状态。整体存在敏感性东北低西部高的现象。从三个典型干旱年份的敏感性区划图来看, 中度及重度的敏感性等级分布面积最大。

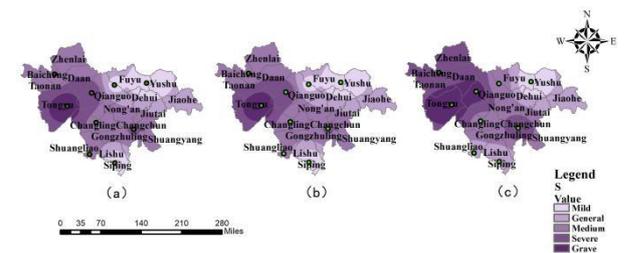


图 1 吉林省中西部典型干旱年玉米敏感性区划图

自身恢复能力反映了玉米对干旱的适应、调整、恢复的能力, 是影响区域玉米干旱脆弱性的重要因素之一。本文选取了环境适应性指数及抗旱性两个指标对自身恢复能力进行计算分析。从整体上看, 三个典型干旱年份中吉林省西部玉米自身恢复能力最强的地方主要集中在长春、四平、白城等地区。与此相对, 研究区玉米自身恢复能力较弱的地区主要集中在通榆、扶余两地。总体而言, 吉林省中部地区的玉米自身恢复能力要从总体上高于吉林省西

部，这主要与玉米生育期长度及玉米选种品种有关，其次还受到一定的地形地貌、土壤类型等气候条件的影响。

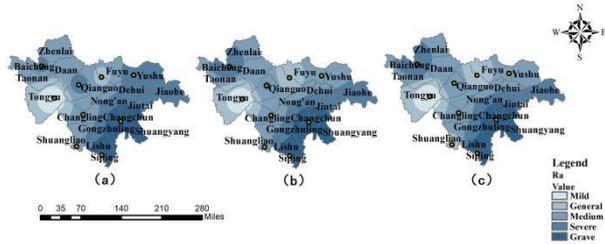


图2 吉林省中西部典型干旱年玉米自身恢复能力区划图

干旱扰动程度反映的是区域脆弱性形成的外界环境干扰因素，因此包括了气象环境要素、土壤要素、以及干扰时间等因素。2004，整个吉林省西部地区都收到严重的干旱影响，相比较而言吉林省中部地区收到的干旱干扰程度较小，但整个中西部地区都有程度不等的旱情出现；2007年干旱干扰程度的分布在整体趋势上与2004年相似，严重及种度程度的干扰程度影响范围变大；2014年干旱扰动程度严重的地区为长岭、长春地区，整个吉林省中部地区都笼罩在高干旱扰动程度下。吉林省西部地区的严重程度低于中部地区，整体上从东南向西北递减，但严重程度的差异性不大，整体干旱扰动程度依旧严重，受降水等气候因素影响严重。

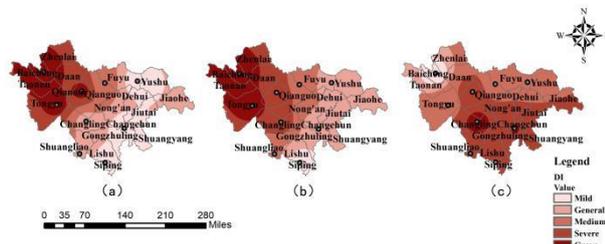


图3 吉林省中西部典型干旱年干旱扰动程度区划图

对吉林省中西部地区的环境适应能力进行评价与区划。从整体上来看，吉林省中西部地区的环境适应能力区域差异较明显，适应程度差异性明显，没有固定变动趋势，每年情况都不同；2004，整体差异性大，整个吉林省西部地区及长春、双辽两地的环境适应能了较强。扶余、榆树、长岭的环境适应能力较弱。呈现西北、东南强中间部分弱的现象。2007年，整体趋势发生变动。榆树、四平、双辽的环境适应能力最优，白城及通榆的适应能力则骤降；2014年，环境适应能力呈现西北低，东北与西南高的现象。环境适应能力与每年的社会经济状况联系紧密，所以变动较大，较灵活。整个吉林省中西部的环境适应能力整体上不差，通过经济的发展与政府的支持都能得到提升。

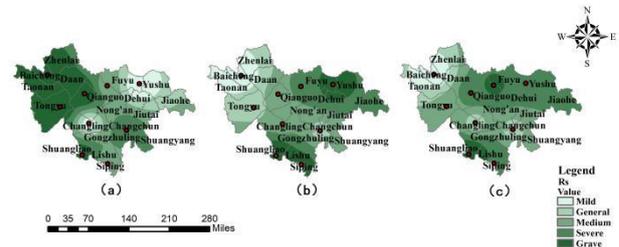


图4 吉林省中西部典型干旱年环境适应能力区划图

为评价玉米干旱脆弱性程度，本文根据研究区玉米干旱灾害实际情况、以往文献，综合考虑玉米干旱脆弱性指数的最大值及最小值，运用最优分割理论将玉米各生育期的干旱脆弱性分为轻度、中度、一般、重度、严重5级，结果如表2所示。利用研究区玉米干旱脆弱性指数以及表2的吉林省中西部玉米干旱脆弱性等级划分标准，得到3个典型干旱年不同生育期吉林省中西部玉米干旱脆弱性等级空间分布图。

表 2 吉林省中西部玉米干旱脆弱性等级

| 生育期 | 出苗—拔节 | 拔节—抽雄 | 抽雄—乳熟 | 乳熟—成熟 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 轻度 | ≤1.12 | ≤1.15 | ≤1.37 | ≤1.39 |
| 一般 | 1.12~1.24 | 1.15~1.25 | 1.37~1.44 | 1.39~1.46 |
| 中度 | 1.24~1.37 | 1.25~1.35 | 1.44~1.51 | 1.46~1.53 |
| 重度 | 1.37~1.48 | 1.35~1.45 | 1.51~1.58 | 1.53~1.60 |
| 严重 | ≥1.48 | ≥1.45 | ≥1.58 | ≥1.60 |

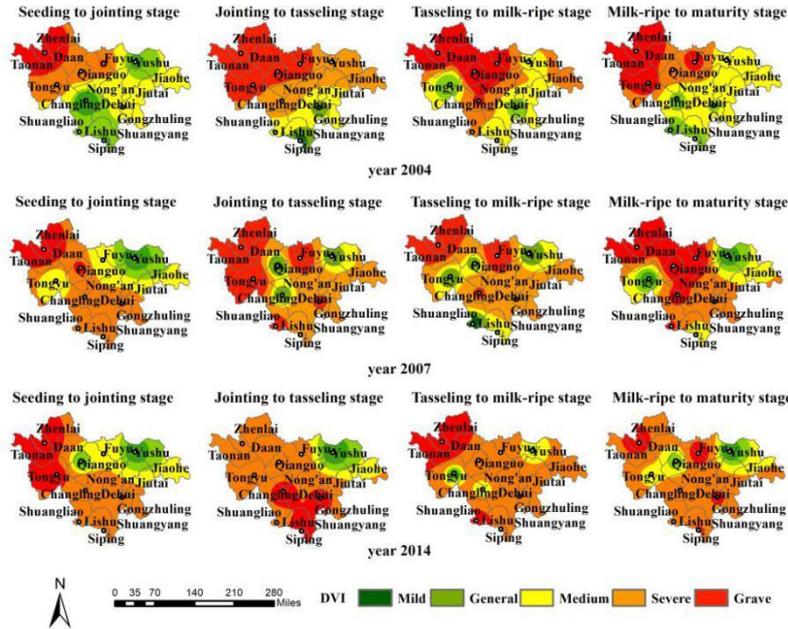


图 5 2004 年、2007 年和 2014 年玉米不同生育期干旱脆弱性空间分布

从整体上看，三个典型干旱年份中玉米脆弱性较强的区域主要集中在白城、通榆、前郭等地区，这些地区玉米各个生育期发生重旱及严重脆弱性的几率较高。与此相对，2004 年长岭、双辽、四平、长春等城市脆弱性较弱；2007 年扶余、通榆等地脆弱性较弱；2017 年扶余、通榆脆弱性较弱，这与特定年份区域灾害应急投入的充分程度密切相关，也与降水量不足及降水不均有关。从生育期来看，随着玉米的生长，发生重度及以上脆弱的地区范围在逐步扩大，由吉林省西部逐渐向吉林省中部延伸，脆弱性最强的时期一般发生在抽雄-乳熟期。出苗-拔节期。在拔节-抽雄期脆弱性程度总体上呈下降趋势，脆弱性最高的地区也从吉林省西部逐渐转移至吉林省中部的部分城市。轻度脆弱性地区由南部转向北部；抽雄-拔节期的脆弱性严重程度在不断增加，由 2004 年的 41%，上升到 2014 年的 90.3%。全地区脆弱性差异性较小，都笼罩在高度脆弱的程度下，极易受到干旱灾害的影响导致作物减产。乳熟-成熟

期，重度脆弱性所占比例最大，占 60.7%。抽雄-拔节期、拔节-乳熟期和乳熟-成熟期都是脆弱性高的时期，易受外界干扰影响，形成旱灾。以上结果与历史灾情及研究区典型干旱年玉米不同生育期缺水情况比较吻合。

在三个干旱年份中 2004 年的出苗-拔节期、抽雄-乳熟期、乳熟-成熟期干旱脆弱性最强，2014 年的全生育期影响范围最广。绝大多数脆弱性较高的地区都存在经济能力较弱、人口缺乏、老龄化严重、大部分地区主要以粮食种植为主、习惯于用传统生产方式以及教育资源相对不足的情况。三个典型干旱年中，玉米干旱脆弱性最强的时期一般发生在抽雄-乳熟期和出苗-拔节期，其次是乳熟-成熟期。这与玉米不同生育期对水分的需求量、玉米种植品种以及土壤类型都有关。本文的研究结果表明，区域的干旱脆弱性大小与该区域的社会经济发展密切相关，具有空间差异性。针对脆弱性较高的地区可以从科教兴农入手，从根本上改变耕作习惯，人为增强作物自身恢复能力以及环境适应能力。

以吉林省中西部相应干旱年份干旱灾害造成的玉米减产数据为依据,对吉林省中西部玉米干旱脆弱性评价模型进行回归分析,结果表明二者存在二次方程线性相关性,并通过了 $\alpha=0.05$ 的F检验(出苗-拔节期: $r=0.78$, $P<0.05$;拔节-抽雄期: $r=0.77$, $P<0.05$;抽雄-乳熟期: $r=0.69$, $P<0.05$;乳熟-成熟期: $r=0.72$, $P<0.05$ 。),每个生育期都达到了显著水平,证明了本文中的模型对玉米干旱脆弱性的评价与区划是合理的,可以用来评价和

与猜测玉米干旱脆弱性以及因干旱造成的玉米产量损失。

本文在玉米干旱脆弱性指标选取和模型建立方面也存在一定不足,脆弱性评价作为一个动态的评价过程,指标在时间变化上的体现不够,并且由于数据有限使得模型不够精确,该模型只适用于易获取相应数据的国家或地区应用。脆弱性在社会经济尺度的驱动因素,以及各单因子评价指标相互间的关联还需要进一步探索。

致谢

本研究得到了国家重点研发计划(2019YFD1002201)、国家自然科学基金(41571491、41371495)、吉林省科技发展计划技术攻关项目(20190303018SF)、吉林省科技发展计划重点研发项目(20200403065SF)、长春市科技计划(19SS007)的支持。

参考文献

- [1] Shi W, Tao F. Vulnerability of African maize yield to climate change and variability during 1961-2010[J]. FOOD SECURITY, 2014, 6(4): 471-481. DOI:10.1007/s12571-014-0370-4.
- [2] 罗培. 基于GIS的重庆市干旱灾害风险评估与区划[J]. 中国农业气象, 2007, 28(01):100-104.
- [3] IPCC. AR4 Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability [R]. United Kingdom; New York, NY, USA.: Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] IPCC. AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis[R]. United Kingdom; New York, NY, USA.: Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [5] Antwi-Agyei P, Fraser E D G, Dougill A J, et al. Mapping the vulnerability of crop production to drought in Ghana using rainfall, yield, and socioeconomic data[J]. APPLIED GEOGRAPHY, 2012,32(2):324-334. DOI: 10. 1016/ j. apgeog. 2011. 06. 010.
- [6] 王蕊,张继权,郭恩亮,等.近55 a吉林中西部玉米生长季旱涝时空特征分析[J].自然灾害学报, 2018,27(01):186-197.
- [7] Guo E, Zhang J, Wang Y, et al. Dynamic risk assessment of waterlogging disaster for maize based on CERES-Maize model in Midwest of Jilin Province, China[J]. NATURAL HAZARDS, 2016,83(3):1747-1761.DOI:10.1007/s11069-016-2391-0.
- [8] 国家气象信息中心.中国气象科学数据共享服务网[EB/OL]. [2019]. <http://data.cma.cn/>.
- [9] 中国农业科学院作物科学研究所.中国作物种质资源信息网(CGRIS-Chinese Crop Germplasm Information Network)-Welcome[EB/OL]. [2019]. <http://www.cgris.net/>.
- [10] 吉林省统计局编.吉林统计年鉴[M].北京:北京:中国统计出版社,1985.
- [11] 吉林省统计局编.吉林社会经济统计年鉴[M].北京:北京:中国统计出版社,1985.
- [12] 温克刚.中国气象灾害大典吉林卷[M].北京:北京:气象出版社,2008.
- [13] 张德新.吉林省水资源[M].长春:长春:吉林科学技术出版社,2008.
- [14] 中国科学院计算机网络信息中心.地理空间数据云[EB/OL]. [2019]. <http://www.gscloud.cn/>.
- [15] 刘竞妍,张可,王桂华.综合评价中数据标准化方法比较研究[J].数字技术与应用, 2018,36(06):84-85.
- [16] 李龙海,刘凡.组合权重法在机场空防安全评价中的应用[J].中国民航大学学报, 2014,32(03):55-58.
- [17] 黄维忠.基于熵权的层次分析法及在船舶投资决策中的应用[J].上海海运学院学报, 2000,21(01):97-101.
- [18] 邱苑华著.管理决策与应用熵学[M].北京:北京:机械工业出版社,2002.
- [19] 梁鑫磊.基于模糊层次分析法的民航机务维修风险评价研究[D].四川省广汉市:中国民用航空飞行学院飞行技术学院,2012.
- [20] 梁焯赫,王雪,赵鑫,等.吉林省西部半干旱区主栽玉米品种抗旱性比较[J].分子植物育种, 2018,16(13):4466-4472.