

DOI: 10.5846/stxb202011112912

乌日娜, 张兴东, 曹永强, 王妍. 辽宁省玉米旱灾时空分布特征及综合风险评价. 生态学报, 2022, 42(16): 6731-6744.

Wu R N, Zhang X D, Cao Y Q, Wang Y. Spatio-temporal distribution characteristics and comprehensive risk assessment of maize drought disaster in Liaoning Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6731-6744.

## 辽宁省玉米旱灾时空分布特征及综合风险评价

乌日娜, 张兴东, 曹永强\*, 王妍

辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

**摘要:**以辽宁省气象数据、空间数据和田间管理数据集为基础, 首先, 依据自然灾害风险形成理论, 从危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力四因子入手, 选择 10 个副指标, 构建辽宁省玉米旱灾综合风险评价指标体系, 并利用组合加权法和 GIS 空间分析方法, 确定其权重及区域化。利用自然灾害风险指数法和加权综合评价方法, 建立辽宁省玉米旱灾综合风险评价模型, 并进行了辽宁省玉米旱灾时空分布特征分析及综合风险评价研究。结果表明: (1) 自 1960 年以来, 研究区干旱频率总体呈上升趋势, 尤其 2010 年以后有明显增加态势。其中 1970—1979 年间干旱发生频率较低, 2010—2019 年间干旱频率最高。不管是月尺度、季节尺度、生长季尺度还是年际尺度, 辽宁省西北部干旱频率普遍较高, 而东南部干旱频率较低。干旱强度呈现从辽宁省中部地区向东西地区两个方向递减的趋势, 高值出现在辽宁省中部的阜新、锦州、铁岭、辽阳、盘锦、鞍山、营口和大连等地。干旱历时从辽宁省东部向西部区域递减的趋势, 其中高值出现在铁岭北部、盘锦、鞍山、营口和丹东南部等地, 低值分布在朝阳西南部、葫芦岛西北部、本溪西部和丹东等地。(2) 从 4 个因子角度来说, 辽宁省朝阳西部和葫芦岛西北部玉米旱灾危险性指数较低以外其他区域玉米旱灾危险性指数均较高。然而, 辽宁省西北玉米主产区玉米旱灾脆弱性指数和暴露性指数均较高, 且防灾减灾能力较低。当 4 个因子加权综合评价时, 辽宁省西北部玉米旱灾综合风险呈现较高的现象。研究结果可为保障辽宁省粮食安全及制定防灾减灾政策提供理论依据和科学指导。

**关键词:**玉米旱灾; 组合加权法; 时空特征; 综合风险评价

## Spatio-temporal distribution characteristics and comprehensive risk assessment of maize drought disaster in Liaoning Province

Wurina, ZHANG Xingdong, CAO Yongqiang\*, WANG Yan

School of Geographical Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

**Abstract:** First, according to the theory of natural disaster risk formation, starting with the four factors of hazard, vulnerability, exposure and emergency response & recover capability, 10 sub-index were selected to establish the comprehensive risk evaluation index system of maize drought in Liaoning Province, based on meteorological data, spatial data and field management data. Second, the combined weighting method was used to determine the weight of each index in the evaluation index system, and each index was spatially processed according to the GIS space analysis methods. Finally, the natural disaster risk index method and weighted comprehensive evaluation method were used to establish the comprehensive risk evaluation model of maize drought in Liaoning Province. At the same time, based on the evaluation model, this paper analyzed the temporal and spatial distribution characteristics of maize drought in Liaoning Province, and further studied the comprehensive risk evaluation of maize in Liaoning Province. The results showed that: (1) The drought frequency in the study area has been increasing since 1960, especially after 2010. Among them, the frequency of drought in

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52079060); 辽宁省兴辽英才项目资助; 辽宁省教育厅自然科学基金项目(LQ2020026); 2021 年大连市科技之星项目(2021RQ101)

收稿日期: 2020-11-11; 网络出版日期: 2022-04-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

Liaoning Province was low from 1970 to 1979, but reached the highest from 2010 to 2019. No matter what the research scale (monthly scale, seasonal scale, growing season scale or inter annual scale) it was, the drought frequency was higher in the northwest of Liaoning Province, but lower in the southeast. The drought intensity of Liaoning Province had a decreasing trend from the middle to the East and West, and areas with high drought intensity were mainly concentrated in the middle of Liaoning Province (eg. Fuxin, Jinzhou, Tieling, Liaoyang, Panjin, Anshan, Yingkou and Dalian). The duration of drought in Liaoning province gradually decreased from east to west, and areas with high drought duration mainly appeared in the north of Tieling, Panjin, Anshan, Yingkou and the south of Dandong, while areas with low drought duration mainly appeared in the southwest of Chaoyang, the northwest of Huludao, the west of Benxi and Dandong. (2) From the perspective of four factors of drought disaster hazard, vulnerability, exposure and emergency response & recover capability, except that the drought hazard indexes of maize in the west of Chaoyang and the northwest of Huludao were low, the drought hazard indexes of maize in other regions were high in Liaoning Province. However, as the main maize producing area in Liaoning Province, the northwest of Liaoning Province had high vulnerability index and exposure index of drought disaster, but its emergency response & recover capability was relatively low. Therefore, under the weighted comprehensive evaluation of four factors, there was a high risk of drought disaster in the northwest of Liaoning Province. The research results can provide theoretical basis and scientific guidance for the formulation of policy on agricultural disaster prevention and mitigation in Liaoning Province.

**Key Words:** maize drought disaster; combined weighting method; spatio-temporal distribution characteristics; comprehensive risk assessment

干旱灾害是指因土壤水分和作物需水不平衡而造成的作物减产现象<sup>[1]</sup>,是直接影响作物产量、影响范围较广、影响持续时间较长、发生次数比较频繁的气象灾害<sup>[2]</sup>。近年来,随着全球气候变暖和极端气候事件的加剧,导致干旱灾害发生频率、强度、范围和持续时间均呈现增加态势。然而,干旱灾害风险评价是进行干旱灾害风险管理和减少干旱灾害损失的有效途径<sup>[3-4]</sup>。

旱灾风险评估作为旱灾风险防控、保障粮食安全的重要内容和关键环节,一直是旱灾研究的前沿和难点问题。干旱灾害风险形成机制理论主要有“二因子说”、“三因子说”和“四因子说”<sup>[5-8]</sup>。其中“四因子说”理论认为灾害风险是由危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力综合作用的结果,该观点得到许多学者的认同。干旱灾害风险评估方法分为三类:第一类是基于指标的综合评估方法<sup>[9]</sup>,主要是以形成干旱风险的各种因子(如致灾因子、暴露性因子和防灾减灾能力等)为基础,探寻干旱灾害风险形成因子的指标,如标准化降水蒸散指数<sup>[10]</sup>、标准化降水指数<sup>[11]</sup>、降水异常百分比<sup>[12]</sup>、标准化蒸散亏缺指数<sup>[13]</sup>、植被归一化指数和气候敏感指数等<sup>[14-15]</sup>,从而对干旱灾害风险进行评估,本方法基于干旱灾害风险形成机制,对干旱灾害发生前、发生中和发生后的相关因素进行了综合考虑,但缺少对于干旱灾害风险形成危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力各因子之间相互作用机制的探讨<sup>[16]</sup>。第二类是基于数据的概率重现期评估方法<sup>[17]</sup>,主要是基于研究区域的历史灾害和灾损样本数据,利用数学模型对样本数据进行统计分析得出干旱灾害发生概率和损失规律,从而对干旱灾害风险进行评估。其分析方法包括回归模型、聚类分析和风险概率评估法等<sup>[18-20]</sup>。该方法虽然计算过程较为简单,但过于依赖样本数据的准确性,并且未考虑干旱灾害风险的形成机制,在实际进行干旱灾害风险评估中具有一定的局限性。第三类是基于情景模拟的评估方法<sup>[21]</sup>,本方法主要依靠 RS/GIS 和数值模式等复杂系统仿真建模手段相结合,对人类活动干扰下未来可能发生的灾害过程进行模拟,形成对灾害风险的可视化表达,从而实现对灾害风险的动态评估,是未来干旱灾害风险评估的主要趋势<sup>[6]</sup>。

辽宁省是我国重要的粮食生产基地,其主要种植农作物是玉米,全区玉米播种面积达到 242.49 万  $\text{hm}^2$ ,占全省经济作物播种面积的 56.65%。在辽宁省,种植玉米基本是以雨养为主,如果在玉米生育期遇到干旱灾害,对玉米产量造成显著影响很有可能绝收。然而,随着全球气候变暖导致极端气候事件的加剧,辽宁省干旱

灾害频发。据统计,1992—2010年干旱灾害总计发生355次,年均发生频次为18.7次,其中,轻旱发生85次,中旱发生182次,重旱发生75次<sup>[22]</sup>。从1999—2018年受灾作物面积累计已达0.18亿hm<sup>2</sup>,经济损失累计达420亿<sup>[23]</sup>。因此,本文依据自然灾害风险形成理论,由干旱灾害风险的危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力四因子入手,选取10个副指标,利用组合加权方法和GIS空间分析方法,构建辽宁省玉米旱灾风险评价指标体系。利用自然灾害指数法和加权综合评价方法,构建辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价模型,并进行辽宁省玉米干旱灾害时空分布特征分析及综合风险评价与区划研究。研究结果可以为保障辽宁省粮食生产和粮食安全做出贡献,还可为辽宁省防灾减灾救灾提供重要科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

辽宁省位于我国东北地区南部,南临黄海和渤海,与日本、韩国隔海相望,地处东经118°53′—125°46′,北纬38°43′—43°26′(图1)。辽宁省属于温带大陆型季风气候,境内雨热同期,日照充足,积温较高,冬长夏暖,春秋季短,雨量不均,东部地区湿润,西部地区较干。辽宁省的年平均气温在8—11℃之间,但是由于受季风气候影响,各地差异较大,出现自西南向东北,自平原向山区递减趋势;年降水量在463—1077mm之间,空间分布不均匀,自东向西降水量呈逐渐减少趋势。高值中心位于东部山地丘陵区,年降水量在1000mm以上;中部平原降水量居中,年平均在600mm左右;低值中心处于西北部山地丘陵区,且与内蒙古高原相连,年降水量在400mm左右,是全省降水量最少的地区。

### 1.2 数据来源

研究所用到的数据包括辽宁省的气象数据、统计数据、空间数据和田间管理数据等。其中气象数据为1960—2019年辽宁省逐日气象观测数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括降水量、平均气温、蒸发量和平均风速等。归一化植被指数(NDVI)来源于美国宇航局的全球植被指数数据集GIMMS NDVI3g version1(1981—2015),空间分辨率约8km×8km,时间分辨率为15天。统计数据和田间管理数据主要来源于辽宁省统计局的相关统计年鉴<sup>[24]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 组合加权法

为了避免评价过程中主观随意性和客观唯一性,本文采取了层次分析法<sup>[25]</sup>和熵权法<sup>[26]</sup>相结合的评价方法,从而确定指标的权重。并采用乘法归一化的方法求出各个指标的组合权重<sup>[27]</sup>,组合加权法公式如下:

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

式中, $w_j^a$ 为第 $j$ 个指标的层次分析法权重系数, $w_j^b$ 为指标 $j$ 的熵权法系数, $w_j$ 为第 $j$ 指标的组合权重系数。

### 2.2 加权综合评价法

加权综合评价法(WCA)是依据各个评价指标对总目标的影响程度,预先分配一个相应的权重系数,然后与相应的被评价指标的量化值相乘后再相加<sup>[28]</sup>。用如下公式表达:

$$G = \sum_{i=1}^n A_i P_i \quad (2)$$

式中, $G$ 为某评价对象所得的总分, $A_i$ 为评价系统第 $i$ 项指标的量化值( $0 \leq A_i \leq 1$ ), $P_i$ 为评价系统第 $i$ 项指标的权重系数( $P_i > 0, \sum_{i=1}^n P_i = 1$ ),通过组合加权法计算得到, $n$ 为系统评价指标个数。

### 2.3 气候敏感指数

气候敏感指数主要反映的是气候生产力与实际生产力之间的关系<sup>[29]</sup>,其定义如下:

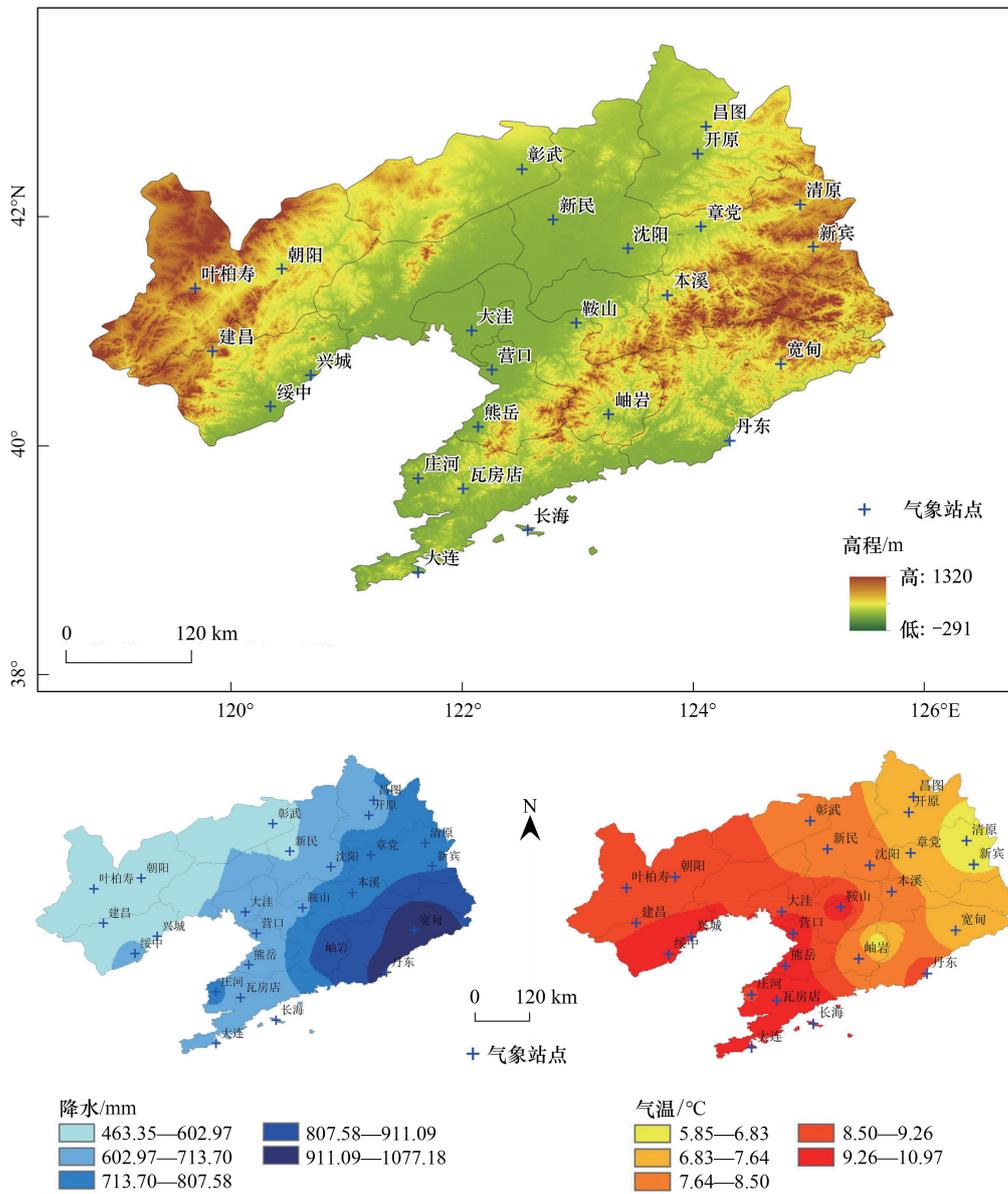


图1 研究区地理位置、年平均气温和年平均降水量变化趋势空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of geographical location, annual average temperature and annual average precipitation in the study area

$$K_m = \frac{1 - |Y_w|/Y_v}{1 - V/L} \times 100 \tag{3}$$

$$Y_v = 30000(1 - e^{-0.000956(V-20)}) \tag{4}$$

$$V = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1.05R/L)^2}} \tag{5}$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3 \tag{6}$$

式中,  $K_m$  为气候敏感指数,  $Y_w$  为某地区实际生产力 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),  $Y_v$  为气候生产力 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ), 采用 Thornthwaite<sup>[30]</sup> 记忆模型计算作物气候生产力。此外, 3000 是经验系数,  $e = 2.718$ ,  $V$  是年平均蒸发量 (mm),  $R$  是年降水量 (mm),  $L$  是年平均最大蒸发量 (mm), 而  $t$  是年平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

#### 2.4 自然灾害风险指数法

自然灾害风险是指未来某一个时期可能达到的灾害程度及其发生的可能性。根据自然灾害风险的形成

机理<sup>[8,31-32]</sup>,自然灾害风险是由致灾因子的危险性、承灾体的暴露性、脆弱性和防灾减灾能力综合作用的结果,通常采用自然灾害指数表征风险程度,可表示为:

$$\text{自然灾害风险指数} = \text{危险性} \cap \text{暴露性} \cap \text{脆弱性} \cap \text{防灾减灾能力}$$

### 2.5 SPEI 干旱指数

SPEI 干旱指数具有多时间尺度特征,可以反映不同时间不同地区的干旱变化情况<sup>[33]</sup>。其具体计算方法如下所示。

首先估计水汽平衡:

$$D_i = P_i - \text{PET}_i \tag{7}$$

式中, $D_i$ 为第  $i$  月降水量和蒸发量的差值(mm), $P_i$ 为第  $i$  月降水量(mm), $\text{PET}_i$ 为第  $i$  月潜在蒸发量(mm),可以通过 Thornthwaite 方法<sup>[30]</sup>求得。

其次,建立不同时间尺度气候学意义上的水分盈亏累计序列:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - \text{PET}_{n-i}), n \geq k \tag{8}$$

式中, $k$  为时间尺度(月); $n$  为计算次数。

最后采用三参数的 Log-Logistic 概率密度函数对  $D$  数据序列进行正态化转化,计算出每个数值所对应的 SPEI 值:

$$\text{SPEI} = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_1 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}, w = \sqrt{-2 \ln P} \tag{9}$$

式中, $P$  为超过待定  $D$  值的累计概率,当  $P > 0.5$  时,SPEI 值的符号被逆转; $c_0 = 2.515517$ ,  $c_1 = 0.802853$ ,  $c_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.432788$ ,  $d_2 = 0.189269$ ,  $d_3 = 0.001308$ 。SPEI 干旱等级划分标准如表 1 所示。

表 1 SPEI 干旱指数等级划分  
Table 1 SPEI drought grading table

干旱等级 Drought grading	SPEI 值 SPEI value	干旱等级 Drought grading	SPEI 值 SPEI value
极旱 Extreme drought	$\text{SPEI} \leq -2.0$	轻旱 Slight drought	$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$
重旱 Severe drought	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$	无旱 No drought	$\text{SPEI} > -0.5$
中旱 Moderate drought	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$		

SPEI: 标准化蒸散发指数 Standardized precipitation evapotran spiration index

### 2.6 干旱评估指标

为了更加直观和科学的分析辽宁省玉米干旱时空特征,本文选择干旱指数 SPEI 对辽宁省玉米干旱进行量化。依据中华人民共和国农业部种植业管理司(<http://www.moa.gov.cn/>)数据,将 4—9 月定为辽宁省玉米主要生育期,加之玉米作为典型的喜温和高需水量作物,在其生育期内对于气象因素的变化较为敏感<sup>[34]</sup>。因此,本文选择涵盖玉米整个生育期的 SPEI\_6 时间尺度,对辽宁省玉米干旱特征进行表征分析。本文统计与分析  $\text{SPEI}_6 \leq -0.5$  的所有干旱等级的干旱,并依据表 2 所示的公式及说明计算干旱次数、干旱历时、干旱强度等指标来进一步表征辽宁省玉米干旱特征。

### 2.7 归一化处理

由于选取的不同指标处在不同的量级,而且评价单位也不同,因此在权重计算时必须对数据进行标准化处理,使得每个指标的标准化值在某个确定的区间内。本文采取的是极差化方法<sup>[35]</sup>,公式如下所示:

正向指标: 
$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \tag{10}$$

负向指标: 
$$y_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \tag{11}$$

式中,  $y_{ij}$  是标准化指数值;  $x_{ij}$  是第  $j$  年中的第  $i$  个评价指标的测量值;  $\max(x_j)$  代表第  $j$  年中的第  $i$  个指标的最大值,  $\min(x_j)$  而代表年  $j$  中的第  $i$  个指标的最小值。

### 3 辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价模型的建立

#### 3.1 指标的选取及权重的确定

本文基于自然灾害风险形成理论,从致灾因子的危险性、孕灾环境的暴露性和承灾体的脆弱性以及防灾减灾能力四个因子入手,结合指标选择的系统性、代表性、可获得性和动态性原则<sup>[36]</sup>,选取 10 个副指标,构建了辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价指标体系(表 2)。并通过组合加权法和归一化处理,确定其各因子的权重(图 2)。

表 2 辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价指标的选取及说明

Table 2 Selection and description of comprehensive risk assessment index of maize drought disaster in Liaoning Province

因子 Factor	评价指标 Evaluating index	评价指标的选取及其对干旱灾害的影响 Selection of evaluation index and its influence on drought disaster	指标计算公式 Index calculation formula
危险性 Hazard	干旱次数	干旱次数反映区域内干旱频率的高低,干旱次数越多危险性也就越大,反之则干旱灾害危险性就越小。	—
	干旱烈度	将 1 个月及以上时间 SPEI 值连续小于 -0.5 的过程作为一次干旱过程,此期间连续干旱月份 SPEI 值和的绝对值作为干旱烈度,干旱烈度越大,发生干旱灾害的风险越高。	$DI = \sum_{i=1}^n SPEI_i$ 式中, $DI$ 为干旱烈度, $n$ 为发生干旱过程的年份, $SPEI_i$ 为统计时段内发生干旱过程中的 SPEI 值。
	干旱历时	干旱历时为干旱连续发生的时间,其持续时间越长,干旱危险性越高,干旱风险也就越大。	—
	蒸发量	蒸发量为区域内实际蒸发量,蒸发量越大,干旱灾害的风险越大,干旱灾害的危险性也就越大。	—
暴露性 Exposure	玉米种植面积相对暴露性指数	干旱灾害的承灾体,主要选取玉米种植面积,种植面积越大,其发生旱灾时受灾面积越大,暴露性也就越高。	$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{AT_i}$ 式中, $E$ 为相对暴露性指数, $n$ 为总年份, $A_i$ 为第 $i$ 年某市玉米播种面积, $AT_i$ 为第 $i$ 年某市的平均播种面积。
脆弱性 Vulnerability	产量变异系数	产量变异系数是产量波动差异的提现,其值越大,代表该作物产量波动大,即脆弱性较强;反之,其值越小,代表该作物产量波动小,即脆弱性较弱。	$F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2}}{Y}$ 式中, $F$ 为产量变异系数, $n$ 为总年份, $Y_i$ 为第 $i$ 年某市玉米单位面积产量, $Y$ 为某市多年平均玉米单位面积产量。
	气候敏感指数	气候敏感指数反映了气候生产力和实际生产力的一个关系,其值越高,代表产量波动越大,该区域干旱脆弱性越高;反之,则产量波动越小。	—
	归一化植被指数	主要是通过对玉米生育期即 4—9 月的 NDVI 值进行计算,从而得到区域的植被状况,了解玉米的生长情况。	—

续表

因子 Factor	评价指标 Evaluating index	评价指标的选取及其对干旱灾害的影响 Selection of evaluation index and its influence on drought disaster	指标计算公式 Index calculation formula
防灾减灾能力 Emergency response & recover capability	有效灌溉面积比	有效灌溉面积比指有效灌溉面积和农作物总播种面积的比值,其值越大,代表该区域水利设施更完善,其防灾减灾能力越高;反之则防灾减灾能力越低,干旱风险越大。	$N = \frac{m}{M}$ 式中, $N$ 为有效灌溉面积比, $m$ 为某市多年有效灌溉面积的平均值, $M$ 为某市农作物总播种面积多年的平均值。
	产量波动系数	防灾减灾能力是指农作物在遭受灾害之后的可恢复生产能力,主要是指人为参与防灾作用的结果,产量波动越大代表防灾减灾能力越低,波动越小代表防灾减灾能力越高。	$T = \frac{l}{L}$ 式中, $T$ 为产量波动系数, $l$ 为某市玉米单产多年平均值, $L$ 为某省玉米单产多年平均值。

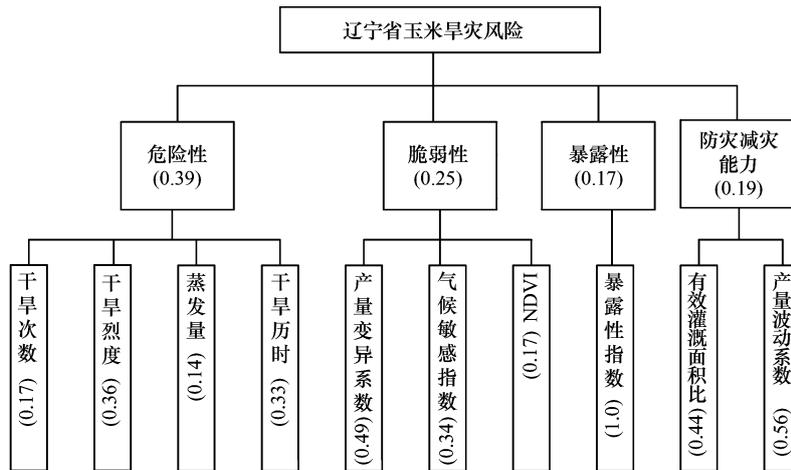


图2 辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价指标体系及指标权重概念框架

Fig.2 The index system and the conceptual framework of index weight of comprehensive risk assessment of maize drought disaster in Liaoning Province

NDVI: 归化植被指数 Normalized difference vegetation index

### 3.2 辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价模型的建立

根据自然灾害风险指数数学公式,结合干旱灾害风险形成理论,利用加权综合评价法(WCA)和组合加权法,建立如下辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价模型:

$$R = (H)^{W_H} \times (E)^{W_E} \times (V)^{W_V} \times (1 - C)^{W_C} \tag{12}$$

$$H = \sum_{i=1}^n w_{hi} \times h_i \tag{13}$$

$$E = \sum_{j=1}^m w_{ej} \times e_j \tag{14}$$

$$V = \sum_{k=1}^p w_{vk} \times v_k \tag{15}$$

$$C = \sum_{x=1}^z w_{lx} \times l_x \tag{16}$$

式中, $R$ 为干旱灾害风险指数,用于表示干旱灾害风险程度,其值越大,则干旱灾害风险程度越大; $H$ 、 $E$ 、 $V$ 和 $C$ 的值相应地表示根据加权综合评价法建立的干旱灾害风险的危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力因子指数, $W_H$ 、 $W_E$ 、 $W_V$ 和 $W_C$ 分别代表危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力的权重值; $h_i$ 为第*i*个危险性指标归一

化数值; $w_{hi}$ 为第  $i$  个危险性指标的权重。 $e_j$ 为第  $j$  个暴露性指标归一化数值; $w_{ej}$ 为第  $j$  个暴露性指标的权重。 $V_k$ 为第  $k$  个脆弱性指标归一化数值; $w_{vk}$ 为第  $k$  个脆弱性指标的权重。 $l_x$ 为第  $x$  个防灾减灾能力指标归一化数值; $w_{lx}$ 为第  $x$  个防灾减灾能力指标的权重。

## 4 结果与分析

### 4.1 辽宁省玉米旱灾风险评价指标选取及空间化

本文基于自然灾害风险形成理论,从致灾因子的危险性、脆弱性、承灾体的暴露性和防灾减灾能力四因子出发,选取了干旱次数、干旱烈度、产量变异系数、NDVI、暴露性指数、有效灌溉面积比、气候敏感指数等 10 个指标,并对其进行插值化处理,得到各指标的空间分布状况(图 3)。由图 3 可知,辽宁省干旱次数、干旱烈度和干旱历时空间分布较一致,均处于一个较高的阈值范围内。此外,辽宁省北部地区相对暴露性指数、蒸发量和气象敏感指数较高,但有效灌溉面积比相对较低。因此,辽宁省北部地区产量变异系数和产量波动系数较高。

### 4.2 辽宁省玉米干旱灾害时空分布特征分析

本文利用辽宁省 25 个气象站点的 1960—2019 年气象数据和降水量数据,采用 SPEI 计算公式,计算得到了辽宁省不同尺度的干旱频率空间分布图、不同年份干旱频率空间分布图、平均干旱强度和平均干旱历时空间分布图等(图 4—6)。

辽宁省不同时间尺度的干旱频率如图 4 所示。如图可知,辽宁省西北部干旱频率较高,相反东南部干旱频率较低,并且干旱频率呈自西北向东南递减趋势。从月尺度来看,辽宁省干旱频率高值在辽西北的朝阳、葫芦岛、阜新和锦州等地,其中东部干旱频率相对较低。从季节尺度来看,辽宁省干旱有明显的季节性。其中,辽宁省整体干旱频率较高,仅朝阳西部和葫芦岛西北部干旱频率较低。从生长季尺度来看,辽宁省干旱频率具有自中部向东西两侧递减趋势。从年际尺度来看,辽宁省干旱频率与其生长季尺度干旱频率空间变化趋势略有不同,主要呈现出自西北向东南递减的变化趋势,其干旱频率西北高,东南低。总之,辽宁省西北部干旱发生频率最高,其次是中部地区,东部地区干旱频率最低。

辽宁省年际变化干旱频率空间分布如图 5 所示。首先,辽宁省不同年代的干旱空间分布具有一定的差异性,但总的来看,辽宁省北部的干旱频率相对于南方是较高的,其东部地区的干旱频率高于其西部地区的干旱频率;其次,自 1960 年以来,辽宁省干旱频率总体呈上升趋势,并且在 2010—2019 年间干旱频率达到最高。各年代中,20 世纪 60 年代和 21 世纪 10 年代的干旱频率最高,其干旱频率约为 35%;其次为 20 世纪 70 年代、20 世纪 80 年代和 20 世纪 90 年代,其干旱频率在 28% 左右;20 世纪 80 年代干旱频率最低,约为 25%。此外,从空间尺度上看,其干旱空间分布范围存在着一个扩大—缩小—扩大的过程,其中 1960—1979 年间高干旱频率地区呈现扩大趋势,1980—1999 年间高干旱频率地区面积有所缩减,但自 2000 年以后,辽宁省干旱频率高值地区逐渐扩大,并且逐渐向西北方向靠拢,呈辽西北地区干旱频率高但辽东南地区干旱频率低的现象。总之,1959—2019 年间,辽宁省干旱具有明显的交替性。

辽宁省平均干旱强度和平均干旱历时空间分布如图 6 所示。如图可知,辽宁省除了极少数区域干旱强度较低以外,大部分区域干旱强度还是很高。整体呈现自中部向东西方向递减的趋势,而且辽宁省东部的干旱强度大于其西部的干旱强度。其中干旱强度峰值出现在辽宁省中部的阜新、锦州、盘锦、营口、大连、鞍山和辽阳等地,相反干旱强度低值出现在朝阳西部、葫芦岛西北部、本溪和抚顺东南部等地。从干旱历时空间分布来看,辽宁省中部地区正经历着较长时间的干旱灾害,其次为辽宁省东部区域,其西部地区干旱持续时间相对较短,并且辽宁省的中西部地区干旱历时具有向西递减的趋势。其中辽宁省铁岭北部、鞍山、营口和大连南部等地干旱持续时间较长,朝阳中西部、葫芦岛西北部、本溪东部、丹东东北部以及抚顺南部等地干旱持续时间较短。

### 4.3 辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价

#### 4.3.1 单指标风险评价

从图 7 可知,辽宁省北部和南部旱灾危险性指数较高,这是由其旱灾频发、干旱烈度较大、干旱历时较长

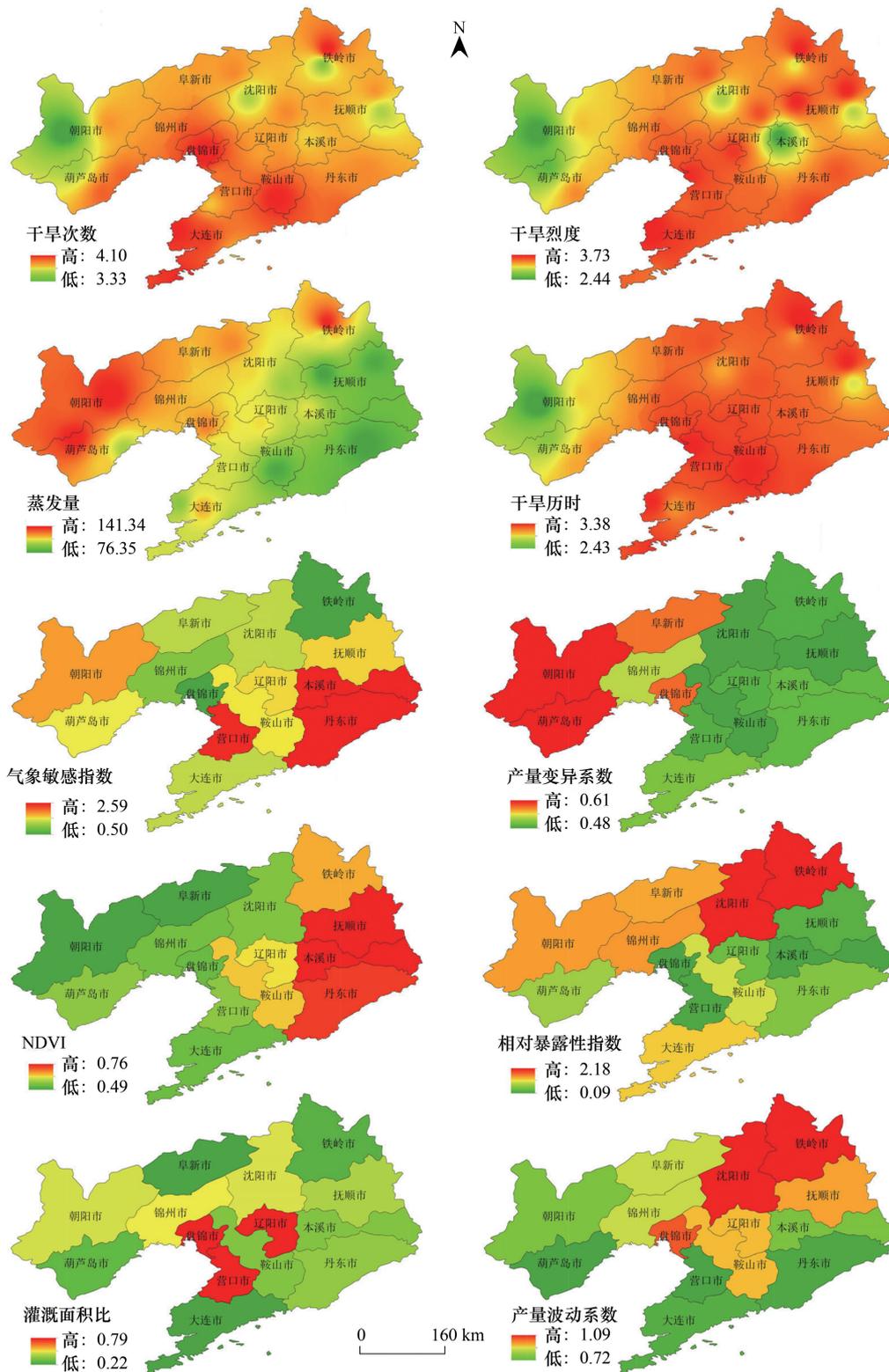


图3 辽宁省玉米干旱灾害风险因子空间分布

Fig.3 Spatial distribution of maize drought risk factors in Liaoning Province

和蒸发量较高等因素引起的;但朝阳西部和葫芦岛西北部等地由于干旱次数较低、干旱烈度较小且干旱历时较短等原因,旱灾危险性指数较低。旱灾脆弱性最高的区域为辽宁省的西北部,主要是因其产量变异系数和气象敏感指数较高;而辽宁省中南部地区旱灾脆弱性相对较低,主要是因为其 NDVI 值较高,并且其产量变异

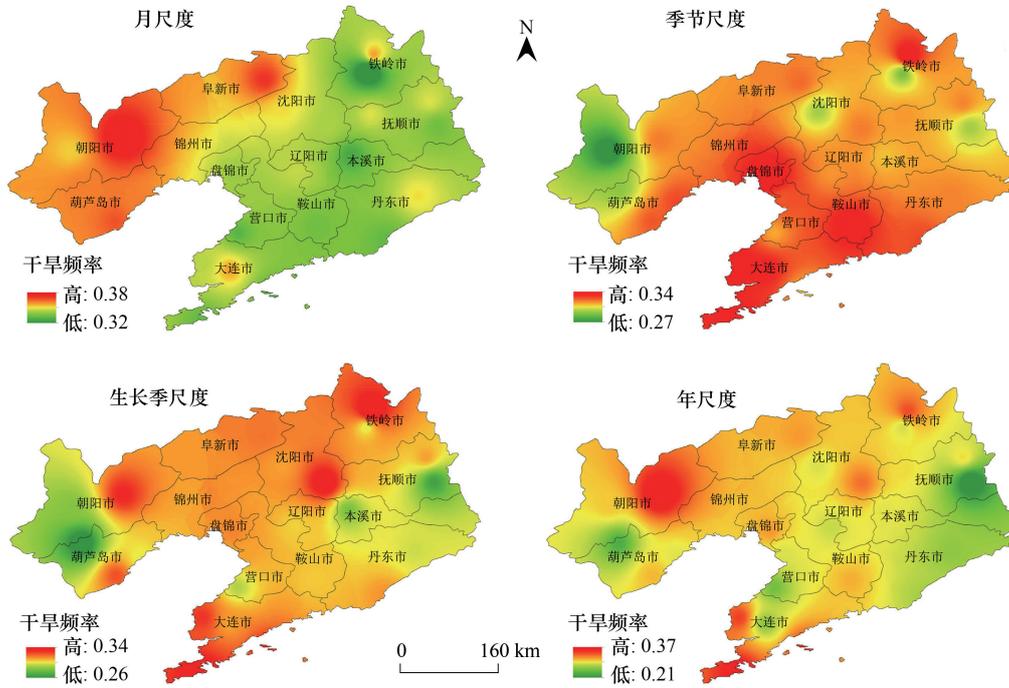


图4 辽宁省不同尺度干旱频率空间分布图

Fig.4 Drought frequency distribution of different scales in the study area

系数远低于辽宁省西北部。辽宁省西北部作为辽宁省玉米主产区,其相对暴露性指数最高,因此其面临的旱灾暴露性也就越大;辽宁省的东南部旱灾暴露性较低,其暴露性指数均在 0.40 以下,主要是因为东南部玉米种植范围较小且比例较低。辽宁省东北部的阜新、沈阳和铁岭等地防灾减灾能力最低,主要是因为产量波动系数远高于其它地区,并且有效灌溉面积比值较低;而环渤海地区的营口、盘锦和葫芦岛等地防灾减灾能力较高,主要是因为玉米种植比例较低,玉米产量波动较小,并且其灌溉设施较为完善。

### 4.3.2 综合风险评价

由图 8 可知,辽宁省旱灾风险指数以辽西北地区最高,辽宁省中南部地区次之,辽宁省东南部地区的丹东北部、本溪和抚顺等地旱灾风险指数最低。其中,辽西北地区面临的旱灾风险形势最为严峻,其旱灾风险指数在 0.60 以上,主要是因为其旱灾危险性、脆弱性和暴露性较高,但其防灾减灾能力相对较低,因此在四因子的叠加作用下产生了辽西北地区旱灾风险较高的现象。辽宁省东南部地区旱灾风险指数较低,均在 0.40 左右,主要是因为此地危险性指数远低于其它地区,再加上此地暴露性指数和脆弱性指数较低,因此辽东南地区所面临的旱灾风险较小。

## 5 讨论

本文依据自然灾害风险形成理论,从危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力四因子入手,构建评价指标体系及评价模型,进行辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价研究。自 1960 年以来,辽宁省干旱频率呈上升趋势。不管是月尺度、生长季尺度、年代尺度还是生育期尺度,辽宁省干旱灾害具有明显的季节变化和年代变化,在玉米生育期内对于干旱灾害较敏感性,在 2010—2019 年间干旱频率达到最高。并且辽宁省干旱灾害具有较强的区域性。辽宁省西北部干旱发生频率最高,其次是中部地区,东南地区干旱频率最低,自西北向东南呈递减趋势。此结果与侯陈瑶和林佳楠等人研究结果基本一致<sup>[37—38]</sup>。

辽宁省降水量空间分布特征可知(图 1),全省降水量由东南向西北逐渐递减。东南部降水量最多,其次

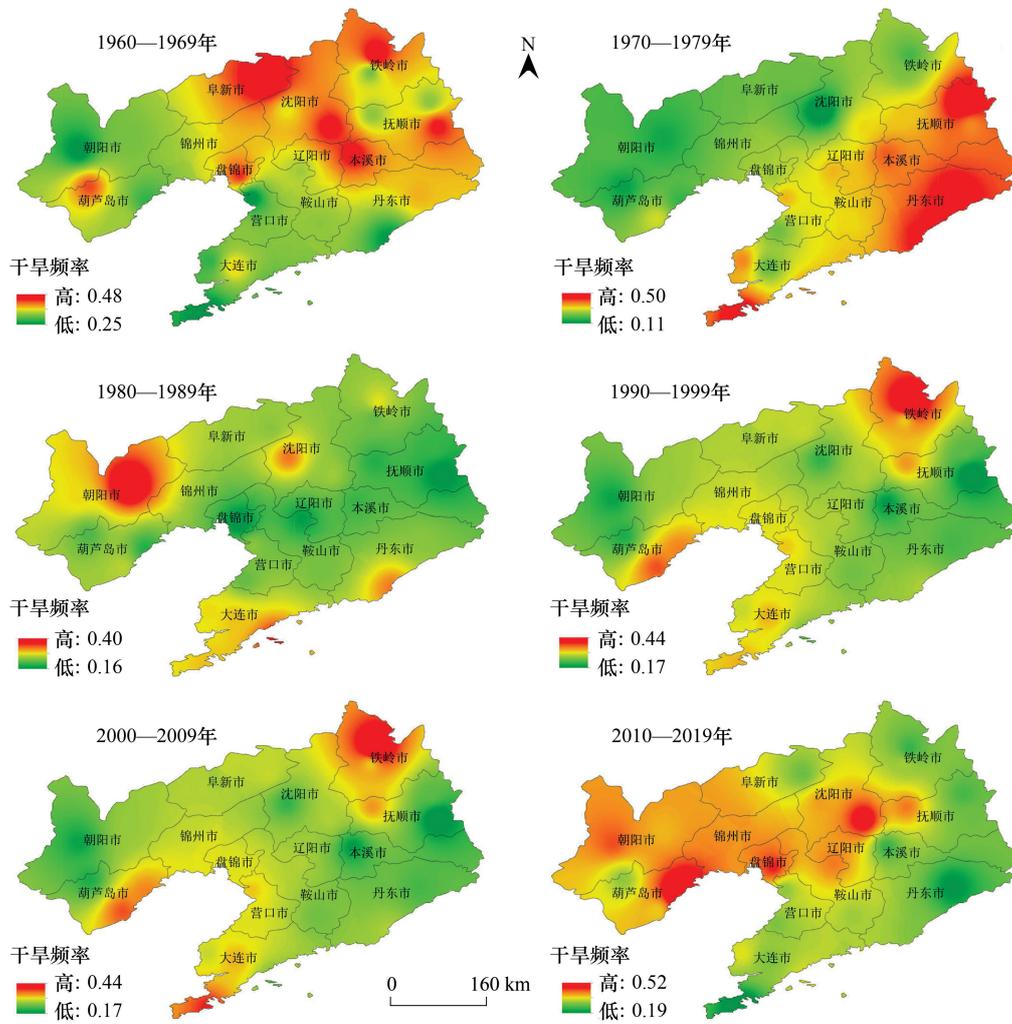


图5 辽宁省不同年代干旱频率空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of drought frequency in different years in Liaoning Province

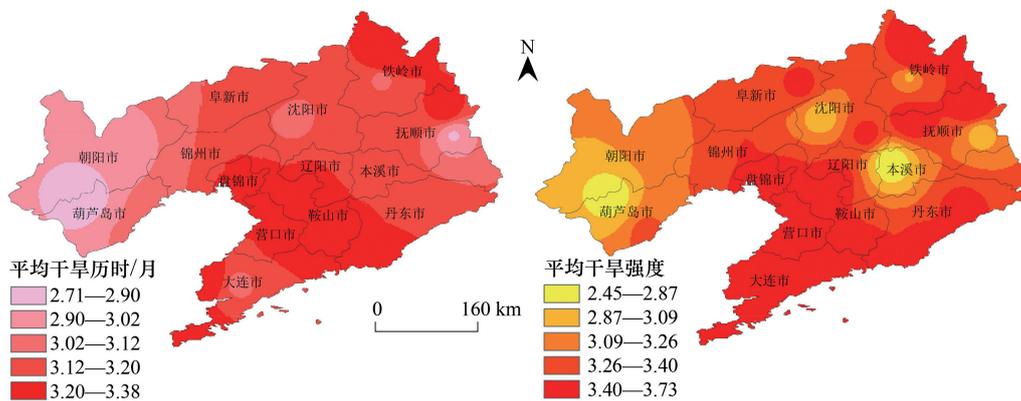


图6 辽宁省平均干旱历时和平均干旱强度空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of mean drought duration and mean drought intensity in Liaoning Province

中部,西部地区降水量最少。从辽宁省蒸发量空间分布来看(图3),蒸发量变化趋势为东部小,西部大,中部过渡,跟降水量空间分布正好相反。加之辽宁省水资源总体分布趋势与降水量分布基本一致都是自东南向西北递减<sup>[39]</sup>。因此,水资源短缺、蒸发量大而且降水量少的西部和中北部地区极易发生干旱灾害。辽宁省大部

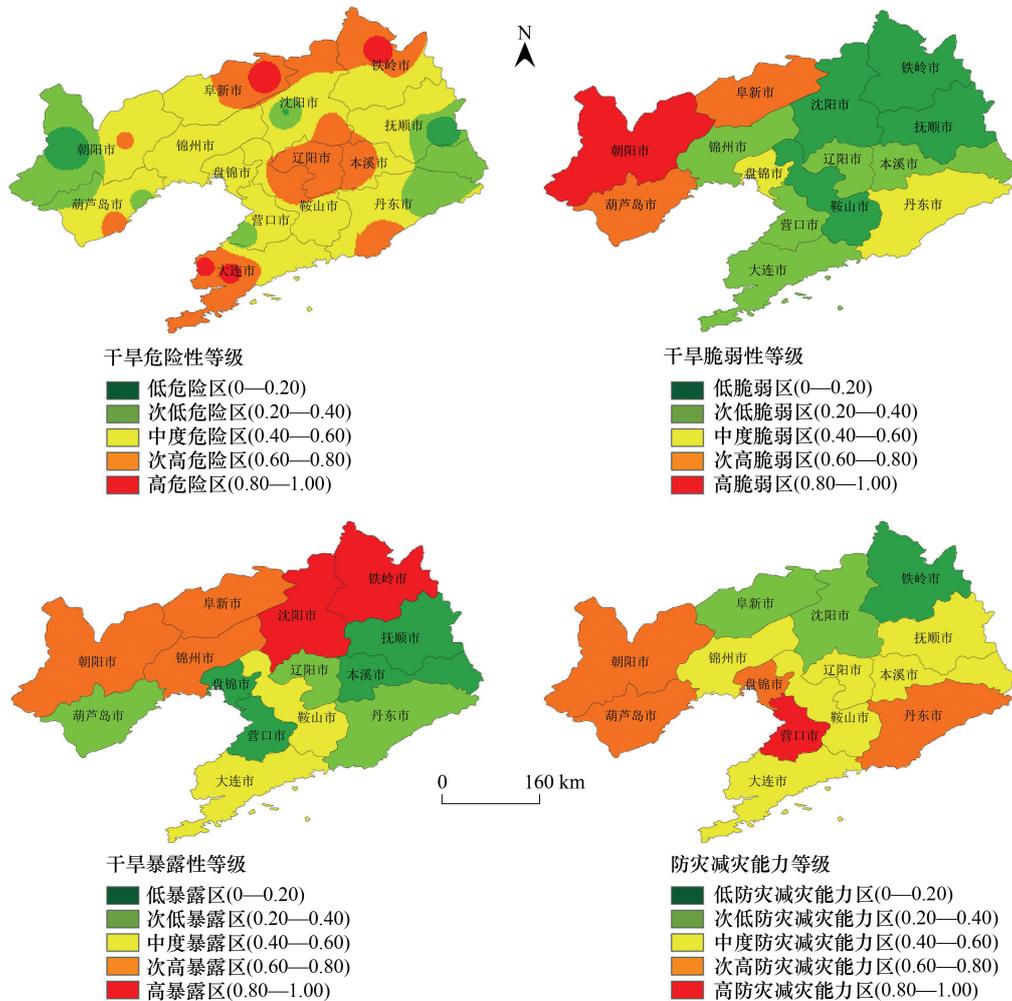


图7 辽宁省玉米干旱灾害风险四因子空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of maize drought disaster risk factors in Liaoning Province

分区域属于大陆性季风气候,辽宁省东南部靠海域,地形以山脉为主,存在对降水再分配有利的迎风坡地形,并且水汽的来源对辽宁省干旱区域分布起到重要的作用。因此,辽宁省东南地区相比较于西北部地区受干旱灾害影响较弱。年代之间季风的不稳定性,将会导致降水在年内及年代间分布不均匀,也是年际干旱频率不同的主要因素。随着全球气候变暖导致极端气候事件加剧,对辽宁省干旱频率增长也有促进作用,固然导致辽宁省干旱灾害高发频发现象<sup>[40]</sup>。

本文利用偏主观的层次分析法和偏客观的熵权法相结合的组合加权法,对选取的指标进行权重的确定,使得干旱灾害综合风险评价结果更加准确。从单指标风险评价结果来看,辽宁省普遍存在干旱灾害危险性较高;辽宁省西北部干旱灾害脆弱性和暴露性均较高;辽宁省整个区域防灾减灾能力普遍较低。通过加权综合评价发现,辽宁省辽西北地区是玉米干旱灾害高风险区,也是防灾减灾工作重点把控区。研究所得到的结果与张巍<sup>[41]</sup>、卢晓昱等<sup>[42]</sup>、曹永强等<sup>[43]</sup>和吴宜宣等<sup>[44]</sup>研究结果大致相同。

辽宁省水资源总量有限,特别是西北部是属于本省贫水区,且干旱风险指数较高,要有效抵抗旱灾风险,必须加强节水意识,提高地表水资源综合利用效率,改善生态环境,提高水资源涵养能力,需要因地制宜的选取工程节水技术较先进的设备及灌溉方式。辽宁中北部多数区域产业结构导致的缺水也是引起干旱灾害风险指数较高的主要原因。应采取的措施是推广抗旱耐旱农作物品种及耕作技术,提高农作物的干旱适应性,优化调整农业结构,改变粗放型耕作方式<sup>[41]</sup>。

## 6 结论

本文从干旱灾害风险形成的危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力四个因子入手,构建了辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价指标体系及评价模型,并进行辽宁省玉米干旱灾害时空分布特征分析及综合风险评价研究,结果如下:

(1)从空间特征来看,辽宁省西北部干旱频率较高,而东南部干旱频率较低,并且干旱频率呈现出自西北向东南递减趋势。从时间序列来看,自1960年以来,研究区干旱频率总体呈上升趋势,尤其2010年以后有明显增加态势。其中1970—1979年间干旱发生频率较低,2010—2019年间干旱频率最高。总的来看,辽宁省干旱灾害发生次数较多,干旱频率较高。

(2)从危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力四因子来看,辽宁省大部分地区干旱灾害危险性较高;辽宁省西北部的葫芦岛、朝阳和阜新干旱灾害脆弱性较高;干旱灾害暴露性较高的区域集中分布在辽宁省的西北部;辽宁省大部分地区防灾减灾能力较低,仅环渤海地区的营口、盘锦、葫芦岛、锦州和大连等地防灾减灾能力较高。由于辽宁省西北部干旱灾害风险的危险性较高、脆弱性较高和暴露性较高,但防灾减灾能力整体相对较低。因此,辽西北地区是辽宁省玉米干旱灾害高风险区,也是防灾减灾工作重点把控区。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 王晓霞,姜红,刘丹丹,梁丰,王优. 近20年辽宁省主要农业气象灾害时空分布特征. 山东农业科学, 2017, 49(9): 140-145.
- [ 2 ] 王春乙,娄秀荣,王建林. 中国农业气象灾害对作物产量的影响. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 37-43.
- [ 3 ] 张强,韩兰英,张立阳,王劲松. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. 地球科学进展, 2014, 29(1): 80-91.
- [ 4 ] 贾慧聪,王静爱. 国内外不同尺度的旱灾风险评价研究进展. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 138-145.
- [ 5 ] 张继权,刘兴朋,严登华. 综合灾害风险管理导论. 北京:北京大学出版社, 2012.
- [ 6 ] 王春乙,张继权,霍治国,蔡菁菁,刘兴朋,张琪. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望. 气象学报, 2015, 73(1): 1-19.
- [ 7 ] Blaikie P, Cannon T, Davis I, Wisner B. Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. London: Routledge, 1994: 141-156.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Cheng Y X, Huang J F, Han Z L, Guo J P, Zhao Y X, Wang X Z, Guo R F. Cold damage risk assessment of double cropping rice in Hunan, China. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(2): 352-363.
- [ 10 ] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [ 11 ] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim: American Meteorological Society, 1993: 179-183.
- [ 12 ] Van Rooy M P. A rainfall anomaly index independent of time and space. Notas, 1965, 14: 43-48.
- [ 13 ] Vicente-Serrano S M, Miralles D G, Domínguez-Castro F, Azorin-Molina C, El Kenawy A, Movicar T R, Tomás-Burguera M, Beguería S, Maneta M, Peña-Gallardo M. Global assessment of the Standardized Evapotranspiration Deficit Index (SEDI) for drought analysis and monitoring. Journal of Climate, 2018, 31(14): 5371-5393.
- [ 14 ] 肖祖香,朱双,罗显刚,娄连惠,李江,罗顺根,操丽. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(06): 515-520+582.
- [ 15 ] 朱淑珍,黄法融,李兰海. 巴基斯坦干旱特征及其风险评估. 干旱区地理, 2021, 44(04): 1058-1069.
- [ 16 ] 朱妮娜. 基于GLDAS和GRACE数据的塔里木河流域干旱综合评估[D]. 上海:华东师范大学, 2020.
- [ 17 ] Zhao J, Yang X G, Lv S, Liu Z J, Wang J. Variability of available climate resources and disaster risks for different maturity types of spring maize in

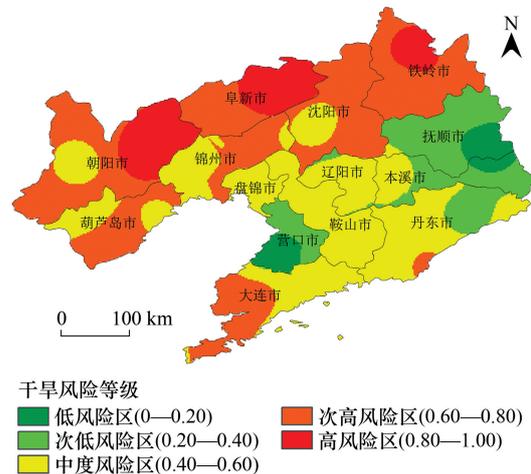


图8 辽宁省玉米干旱灾害综合风险评价空间分布图  
Fig. 8 Spatial distribution of comprehensive risk assessment of maize drought disaster in Liaoning Province

- Northeast China. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 17-26.
- [18] 侯静茹. 内蒙古东部农牧交错带干旱风险评估与区划[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [19] 杜甜甜. 河南省农业干旱灾害风险评估[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- [20] 石界, 姚玉璧, 雷俊. 基于 GIS 的定西市干旱灾害风险评估及区划. *干旱气象*, 2014, 32(2): 305-309.
- [21] Liu X J, Zhang J Q, Ma D L, Bao Y L, Tong Z J, Liu X P. Dynamic risk assessment of drought disaster for maize based on integrating multi-sources data in the region of the northwest of Liaoning Province, China. *Natural Hazards*, 2013, 65(3): 1393-1409.
- [22] 赵先丽, 张玉书, 纪瑞鹏, 冯锐, 于文颖, 蔡福, 米娜. 辽宁主要农业灾害时空分布特征. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 130-135, 256-256.
- [23] 张巍. 辽宁省干旱静态综合风险定量评价研究. *水利规划与设计*, 2019, (6): 65-68.
- [24] 辽宁省统计局. *辽宁统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 2000-2020.
- [25] 龚娟, 何柳月, 王素芬. 基于模糊粗糙集模型的农业旱灾风险评估——以河套灌区为例. *自然灾害学报*, 2021, 30(2): 147-158.
- [26] 史继清, 杨霖云, 边多, 周刊社, 甘臣龙. 基于干旱灾害风险综合评估指数的西藏主要农区青稞干旱时空格局. *中国农学通报*, 2021, 37(2): 80-87.
- [27] 李龙海, 刘凡. 组合权重法在机场空防安全评价中的应用. *中国民航大学学报*, 2014, 32(3): 55-58.
- [28] 张继权, 严登华, 王春乙, 刘兴朋, 佟志军. 辽西北地区农业干旱灾害风险评估与风险区划研究. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(3): 300-306.
- [29] Guo Y, Wang R, Tong Z J, Liu X P, Zhang J Q. Dynamic evaluation and regionalization of maize drought vulnerability in the Midwest of Jilin province. *Sustainability*, 2019, 11(15): 4234.
- [30] 王亚慧, 李致家, 黄鹏年, 戴金旺. Thornthwaite 经验公式在降雨径流模拟中的适用性研究. *水电能源科学*, 2019, 37(12): 6-9.
- [31] Davidson R A, Lambert K B. Comparing the hurricane disaster risk of U.S. coastal counties. *Natural Hazards Review*, 2001, 2(3): 132-142.
- [32] 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.
- [33] 张棋, 许德合, 丁严. 基于 SPEI 和时空立方体的中国近 40 年干旱时空模式挖掘. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(03): 194-201.
- [34] 邢荣平. 我国玉米种植区分布的气候适宜性分析. *中国农业信息*, 2017(07): 48-49.
- [35] 刘竞妍, 张可, 王桂华. 综合评价中数据标准化方法比较研究. *数字技术与应用*, 2018, 36(6): 84-85.
- [36] 番聪聪. 黄淮海地区夏玉米干旱灾害风险评估及预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [37] 侯陈瑶, 朱秀芳, 肖名忠, 肖国峰, 陈昌为. 基于游程理论和 Copula 函数的辽宁省农业气象干旱特征研究. *灾害学*, 2019, 34(2): 222-227.
- [38] 林佳楠. 辽宁省干旱特征与预测模型研究. *陕西水利*, 2020, (3): 54-56.
- [39] 王惟一. 基于 GIS 的辽宁省农业干旱风险研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [40] 吴琼, 赵春雨, 王大钧, 李倩, 伍俊艺, 林蓉. 1951—2014 年辽宁省气象干旱时空特征分析. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(03): 151-157.
- [41] 张巍. 辽宁省干旱静态综合风险定量评价研究. *水利规划与设计*, 2019(06): 65-68.
- [42] 卢晓昱, 任传友, 王艳华. 气候变化背景下辽宁省未来气象干旱危险性风险评估. *自然灾害学报*, 2019, 28(01): 65-75.
- [43] 曹永强, 李玲慧, 路洁, 张若凝. 基于 SPEI 的辽宁省玉米生育期干旱特征分析. *生态学报*, 2021, 41(18): 7367-7379.
- [44] 吴宜宣, 严俊, 殷红, 郭乃馨, 赵媛媛, 王营. 辽宁省玉米干旱的时空分布特征分析. *西北农业学报*, 2021, 30(05): 661-671.