



# Dynamic Evaluation of Drought Disaster Comprehensive Risk for Soybean in Northeast China

Kaiwei Li<sup>1,2\*</sup>, Jiquan Zhang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

<sup>2</sup> Institute of Natural Disaster Research, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

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

## ABSTRACT

Drought was the main natural disaster causing reduced soybean production in Northeast China. Agricultural drought risk assessment can help to improve regional disaster management capacity and thus reduce food security risks and economic losses. In this paper, we established a drought risk assessment model for different fertility stages of soybean based on the risk assessment theory, the integrated drought index of the "soil-crop-atmosphere" continuum and the CROPGRO-Soybean model, and determined the dynamic evaluation index system of soybean drought risk and the zoning levels (light, medium, severe and very severe). The dynamic evaluation of drought risk in soybean in Northeast China during the period 1982-2020 was carried out in different fertility stages. The results showed that the drought risk in the north-central part of the study area was extremely high in the early reproductive period, which was also the most exposed area for soybean cultivation, and could be reduced by late sowing or irrigation. The drought risk in the central and southern part of the Songliao Plain was at the severe and very severe levels due to less rainfall and higher temperatures. In the late reproductive stage, the very severe drought risk areas are mainly concentrated in the central and western part of Jilin Province and the area around Tongliao and Chifeng in Inner Mongolia. Improving irrigation capacity and input levels can enhance local disaster prevention and mitigation capabilities, thereby reducing the drought risk of soybean production. In this study, the drought integrated disaster risk of northeastern soybean was dynamically assessed by reproductive stage, which will provide a scientific basis for efficient and high quality production, disaster prevention and mitigation of soybean.

**Keywords:** Drought, Comprehensive Risk, Dynamic Evaluation, Northeast Soybean.

## 东北大豆干旱灾害综合风险动态评价

李凯伟<sup>1,2</sup>, 张继权<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 东北师范大学环境学院, 长春 130024, 中国

<sup>2</sup> 东北师范大学自然灾害研究所, 长春 130024, 中国

\* 通讯作者. 电子邮箱: zhangjq022@nenu.edu.cn

## 摘要

干旱是导致东北大豆减产的主要自然灾害。本文基于风险评估理论、多源数据构建“土壤-作物-大气”连续体系统的综合干旱指数和 CROPGRO-Soybean 模型, 建立了大豆干旱综合风险动态评估模型, 确定了大豆干旱综合风险动态评价指标体系和区划等级(轻、中、重、极重)阈值, 分不同生育阶段对东北地区大豆 1982-2020 年间的干旱风险进行了动态评价。结果表明: 生育前期, 研究区中北部的干旱风险极高, 该处也是大豆种植暴露性最高的区域, 可通过晚播或灌溉来降低该地区的干旱风险; 生育中期, 研究区中北部的干旱风险由极重向重度和中度转变。由于较少的降雨量和较高的气温导致松辽平原的中部和南部干旱风险处于重度和极重等级。生育后期, 极重度干旱风险区域主要集中在吉林省中西部和内蒙古的通辽、赤峰一带。通过提高灌溉能力和投入水平可提升当地的防灾减灾能力, 从而减小大豆生产的干旱风险。本研究对东北大豆的干旱综合灾害风险分生育期进行动态了评估, 将为大豆高效优质生产、防灾减灾提供科学依据。

**关键字:** 干旱灾害, 综合风险, 动态评价, 东北大豆。

## 1. 引言

干旱是中国粮食减产的最重要灾害<sup>[1]</sup>, 近 50 年来, 东北地区作物生长期干旱频发, 85%以上区域为雨养农业, 面临着较大的旱灾风险<sup>[2]</sup>。进入 21 世纪以来, 我国东北地区气候总体呈现暖干化趋势<sup>[3]</sup>。东北是我国最重要的大豆产区, 大豆振兴计划需要扩大大豆种植面积, 且大豆生长需水量大, 抗旱能力弱, 这些因素加剧了该地区发生旱灾的风险<sup>[4]</sup>。为应对干旱对大豆生产的不利影响, 保障我国粮食安全, 了解干旱对大豆不同生育阶段的影响, 提高其抗旱能力是东北农业产区亟待解决的问题。农业干旱风险评估有利于提高区域灾害管理能力, 从而降低粮食安全风险和经济损失<sup>[3]</sup>。农业气象灾害风险是指在历年的农业生产过程中, 由于孕灾环境的气象要素年际之间的差异引起某些致灾因子发生变异, 承灾体发生相应的响应, 使最终的承灾体产量或品质与预期目标发生偏离, 影响农业生产的稳定性和持续性, 并可能引发一系列严重的社会问题和经济问题。农业气象灾害风险的特征是由风险的自然属性、社会属性、经济属性所决定的, 是风险的本质及其发生规律的外在表现。根据作物气象灾害风险成形机理, 气象灾害风险是危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力综合作用的结果<sup>[5]</sup>。危险性、暴露性和脆弱性与风险生成的作用方向相同, 而防灾减灾能力与风险生成的作用方向是相反的, 即特定地区防灾减灾能力越强, 灾害危险性、暴露性和脆弱性生成农业气象灾害风险的作用力就会受到限制, 进而减少灾害风险度。仅对致灾因子或承灾体的单一评价不能反映作物气象灾害风险产生机制。因此, 从灾害风险系统角度出发, 以能够定量表达灾害风险形成过程中各要素之间相互作用的动力学机制为目的的作物气象灾害风险评价十分必要。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 研究区概况及数据来源

研究区域位于中国东北, 包括黑龙江, 吉林, 辽宁和内蒙古东四盟, 总面积约为 124 万 km<sup>2</sup>。位于东北地区的东北平原是中国最大的平原, 由三江平原、松嫩平原、辽河平原组成, 土地肥沃, 是中国重要的粮食生产基地。东北地区属于温带大陆性季风气候, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥。年平均降水量在 300 至 1000 mm 之间, 年平均温度在-3 至 10°C 之间, 海拔在-264 至 2555 m 之间。从东南到西北, 该区域从湿润地区过渡到半湿润地区和半干旱地区。2016 年东北地区大豆种植面积为 404.57 万 km<sup>2</sup>, 占全国大豆播种面积的 56%<sup>[6]</sup>。东北地区为中国大豆优势产区, 因其纬度跨度大, 地形复杂, 气候资源差异显著, 大豆种植种类丰富。气象数据来源于国家气象信息中心, 包括 1960-2020 年研究区内及周边 124 个国家级基本气象站 (图 1) 的逐日降水

量、逐日平均温度、逐日最高、最低气温、逐日平均风速、逐日湿度等。发育期数据来自于农业气象监测站, 大豆生育期可分为前期、中期和后期。前期指从播种至初花期, 中期指初花期至鼓粒期, 后期指鼓粒期至成熟期; 基础地理信息数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心, 包括行政边界、高程、土地利用等数据。遥感数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站的 MODIS 影像数据, 主要为归一化植被指数和地表温度数据。土壤剖面数据来自于联合国粮农组织和维也纳国际应用系统研究所所构建的 HWSD 数据集。土壤水分数据来自 TerraClimate 数据集。

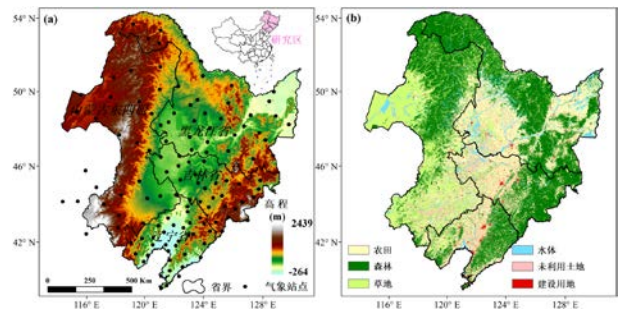


图 1 研究区概况

### 2.2. 研究方法

#### 2.2.1. 综合干旱指数

干旱指数广泛应用于全球和区域范围干旱灾害的评估和监测, 以描述干旱灾害的持续时间、严重程度和范围等。然而, 由于干旱灾害时空发生的复杂性, 很难利用单一的指数来监测。在对农业干旱灾害的研究中, 不仅仅要考虑气象要素的影响, 还要考虑到植被本身的作物需水量和土壤条件等因素, 因此本研究基于土壤-作物-大气连续体系统<sup>[6]</sup>的综合作用机制, 融合了气象数据、遥感数据和再分析多源数据, 选取基于考虑降水和蒸散的标准化降水作物需水指数 (Standardized Precipitation Requirement Index, SPRI)、植被健康指数 (Vegetation Health index, VHI) 和土壤湿度状况指数 (Soil Moisture Condition Index, SMCI), 来构建一个综合性的干旱指数。三类数据经过 arcgis 软件进行插值和重采样, 将各数据空间分辨率统一为 4km×4km, 最后, 构建了综合干旱指数 (CDI), 具体计算方式如下:

$$CDI_i = w_{1i} \times SPRI_i + w_{2i} \times VHI_i + w_{3i} \times SMCI_i \quad (1)$$

其中  $W_{1i}$ 、 $W_{2i}$ 、 $W_{3i}$  分别为三个指标的权重值, 采用熵权法获得, 具体值见表 1,  $i$  表示大豆不同的生育期。

#### 2.2.2. 风险评估指标体系

本文根据自然灾害风险形成四要素学说, 从灾害的危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力四个

方面，构建了大豆干旱灾害综合风险动态评价技术。首先依据风险评价的概念框架确定了大豆干旱灾害风险动态评价技术的指标体系（表 1）。

表 1 大豆干旱灾害综合风险动态评价指标体系

主因子	副因子	指标体系	权重	
危险性 (0.43)	综合干旱指数 (CDI)	气象干旱指数 (SPRI)	S1:0.28, S2:0.23, S3:0.27	
		植被干旱指数 (VHI)	S1:0.22, S2:0.28, S3:0.27	
		土壤干旱指数 (SMCI)	S1:0.50, S2:0.49, S3:0.59	
脆弱性 (0.11)	敏感性	不同生育期指标损失率曲线	1	
		土壤有机质含量	0.09	
		土壤质地	0.15	
暴露性 (0.31)	适应性	实际蒸散/参考蒸散	0.76	
		作物面积	大豆种植面积空间占比	0.84
		农田面积	农田面积空间占比	0.104
防灾减灾能力 (0.15)	气候适宜性	大豆种植气候适宜度	0.056	
		灌溉能力	距离水系距离	0.26
			灌溉面积/农田面积	0.63
		投入水平	农业抗旱支出	0.05
农民人均 GDP	0.06			

注：S1、S2、S3 分表表示大豆生育期的前期、中期和后期。

### 2.2.3. 危险性指数

危险性分析是指致灾因子的自然变异程度，主要是由灾变活动规模（强度）和活动频次（概率）所决定的。不同月份干旱指数的概率密度存在差异，本研究用综合干旱指数的概率密度曲线同时描述干旱的强度和频率特征。多数研究笼统的用干旱发生的频率表示干旱灾害危险性，并不能体现出干旱强度对危险性的影响。通过得到的 CDI 概率分布曲线，用如下公式表示干旱灾害危险性：

$$H = \int_{-1.5}^0 CDI \times f(CDI) \quad (2)$$

式中：H 为干旱灾害危险性，CDI 描述干旱强度，f(CDI)为 CDI 发生的频率。即使干旱发生频率相同，通过本方法计算出干旱灾害危险性仍旧会不同，这是由于不同地区不同月份 CDI 概率密度曲线的形状会有所不同。

### 2.2.4. 脆弱性指数

脆弱性表征承灾体由于潜在风险而可能造成的损失程度，基于敏感性和适应性两方面考虑。CROPGRO-Soybean 模型可以模拟大豆在充足灌溉条件（S1）下和雨养条件下（S2）的产量。依据产量损失与干旱强度确定大豆干旱敏感性曲线。模型输出的 S2 情景下实际蒸散量和 S1 情景下的潜在蒸散量可以作为适应性指标。CROPGRO-Soybean 作为 DSSAT<sup>[7]</sup>所包含的模型之一，其能以天为步长动态定量描述大豆生长发育过程和产量形成以及土壤水分、氮素的动态变化过程，通过模拟大豆干物质积累与分配、叶面积与根系扩大、生长阶段、产量等指标。模型运行主要需要气象、土壤及耕种管理数据等。

大豆干旱脆弱性由敏感性和适应性两部分构成。敏感性指标为不同生育阶段产量受干旱灾害影响而造成的损失情况，具体计算公式为：

$$S = \frac{Y1-Y2}{Y1} \quad (3)$$

式中: S为某一生育阶段某一敏感性指标因旱损失率, Y1和Y2分别为由模型模拟出的充足灌溉条件下和雨养情景下的代表性指标。大豆生育期的前、中、后期所选指标分别为叶面积指数、干物质量和产量。

适应性指标体现为大豆受干旱胁迫后的生理响应, 此处以雨养情景下的实际蒸散量和充足灌溉情景下的蒸散之比表示。同时考虑土壤质地和土壤有机质含量作为适应性指标的补充。具体计算公式为:

$$A = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad (4)$$

式中:A为适应性,  $W_i$ 为权重, 由层次分析法获取, 具体值见表1,  $X_i$ 分别为蒸散比指标。

综合敏感性和适应性, 构建大豆干旱灾害脆弱性评价指标体系, 并将脆弱性评价模型定义为:

$$V = S \times (1 - A) \quad (5)$$

式中: V表示大豆干旱脆弱性量化值, S表示不同生育阶段大豆干旱敏感性, A表示大豆干旱适应性。

### 2.2.5. 暴露性指数

基于遥感数据提取大豆实际种植面积作为大豆种植实际暴露性, 选择农田面积和大豆种植气候适宜性作为大豆潜在暴露性<sup>[8]</sup>, 确定了大豆暴露性评价指标体系。暴露性指数同样基于加权综合平均法确定, 采用如下公式表示:

$$E = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad (6)$$

式中: E为暴露性量化值,  $X_i$ 为指标归一化量化值,  $W_i$ 为指标体权重系数, 采用层次分析法获得, 具体值见表1, i为指标个数。

### 2.2.6. 防灾减灾指数

从灌溉能力和投入水平两方面确定了大豆干旱灾害防灾减灾能力评价指标体系。采用加权综合平均法确定防灾减灾能力指数:

$$C = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad (7)$$

式中: C为防灾减灾能力量化值,  $X_i$ 为指标归一化量化值,  $W_i$ 为指标体权重系数, 采用层次分析法获得, 具体值见表1, i为指标个数。

### 2.2.7. 综合风险指数

利用自然灾害风险指数法、加权综合评估法和层次分析法, 建立了大豆干旱灾害风险指数, 用以表征灾害风险程度, 综合风险评价模型如下:

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

其中, R是大豆干旱灾害风险指数, 其值越大代表灾害风险越大; H, E, V, C的值分别表示大豆干旱灾害的危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力因子指数;  $W_H$ 、 $W_V$ 、 $W_E$ 、 $W_C$ 分别为危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力因子所占权重, 采用层次分析法计算为0.43, 0.11, 0.31, 0.15。

### 2.2.8. 综合风险区划

综合风险四因子最终获得了大豆不同生育期干旱灾害风险空间分布。基于最优分割法确定不同生育期干旱灾害风险等级阈值(表2), 进而对大豆不同生育期干旱风险进行区划。

表2 大豆不同生育期干旱风险评价等级阈值

生育期	轻度风险	中度风险	重度风险	极重度风险
前期	<0.86	0.86-0.96	0.96-1.06	>1.06
中期	<0.62	0.62-0.74	0.74-0.85	>0.85
后期	<0.65	0.65-0.79	0.79-0.93	>0.93

## 3. 结果与分析

### 3.1. 东北大豆不同生育期干旱危险性分布

基于“土壤-作物-大气”连续体系统的综合干旱指数对东北地区1982-2020年间大豆不同生育期的干旱危险性进行了空间展布(图2)。生育期前期高危险性区域集中在内蒙古呼伦贝尔地区及松嫩平原北部区域, 位于研究区东北部的三江平原和中部的松辽平原以东区域次之; 生育中期高危险性区域主要分布在研究区的中西部地区。内蒙古东四盟的多数地区为高危险性, 吉林省中西部和辽宁省西部地区危险性较高, 四个省份中黑龙江的危险性最低; 生育后期综合干旱危险性空间分布与生育中期相似, 内蒙古呼伦贝尔地区高危险性分布较生育中期向南收缩, 松嫩平原地区的高危险性等级向吉林省中部和黑龙江南部扩张。



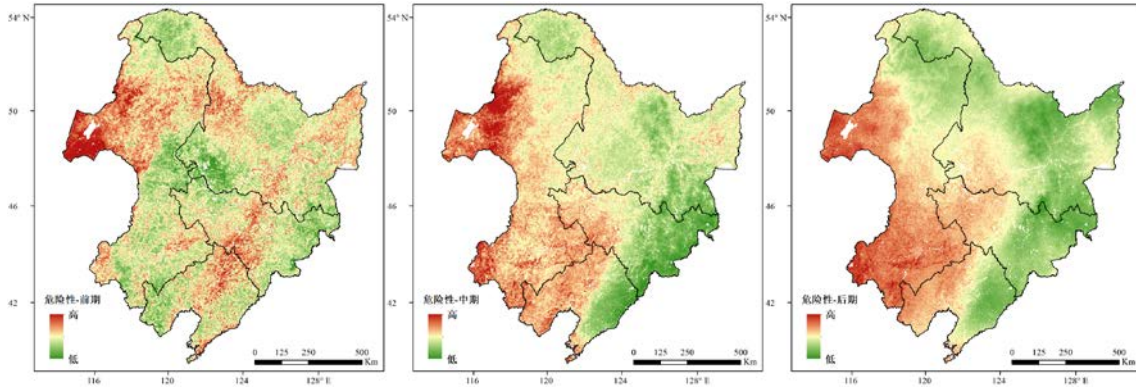


图2 东北大豆 1982-2020 年不同生育期干旱危险性评价

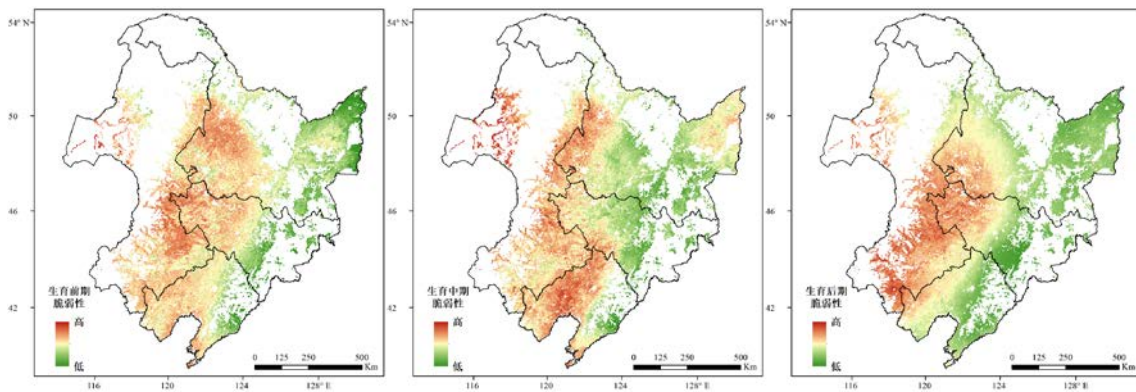


图3 东北大豆 1982-2020 年不同生育期干旱脆弱性评价

### 3.2. 东北大豆不同生育期干旱脆弱性分布

基于 CROPGRO-Soybean 模型对东北农田区域大豆不同生育期干旱引发的指标损失率进行模拟代表敏感性，雨养条件下的作物蒸散和充足灌溉条件下的作物蒸散比值为适应性，带入大豆干旱脆弱性模型获取了大豆不同生育期的干旱脆弱性空间分布特征（图3）。在大豆生育前期，三江平原的脆弱性最低，受干旱影响最弱。松嫩平原东部地区次之。脆弱性空间分布表现为自西向东递减的趋势；生育中期，大豆干旱脆弱性在研究区空间上表现为西部的呼伦贝尔地区最高，中西部地区次之，辽宁省西部大部分区域处于脆弱性高值区。三江平原东北部的脆弱性较生育前期有所增加；生育后期的高脆弱性区域集中在研究区的中西部干旱地区，以吉林省西部为核心向四周扩散。

### 3.3. 东北大豆暴露性和防灾减灾能力分布

暴露性指大豆暴露于显著气候变异的特征和程度。基于遥感提取获取了大豆 2017-2019 年的实际种植区域，计算每个格点中大豆种植面积占比作为实际暴露，以大豆种植的气候适宜性最为潜在暴露，气候适宜性越高的地区大豆种植的可能性就越大，

暴露性也就越高。同时，叠加农田占格点的比例，构建了大豆暴露性指标（图4左）。大豆暴露性较高的区域位于研究区中北部，即松嫩平原的北部。黑龙江地区的暴露性最高，其次是吉林省中西部。以距离水系的距离和灌溉面积与总农田面积的比值代表灌溉能力。农业抗旱指出和农民人均 GDP 代表投入水平确定了大豆干旱灾害防灾减灾能力（图4右）。东北地区干旱防灾减灾能力较高区域集中在松辽平原，和辽宁中部地区。灌溉和投入的增加是防灾减灾能力提升的关键。暴露性和防灾减灾能力属于风险的社会属性，在一段时期内可以认为是不变的，故不分生育期展开研究。

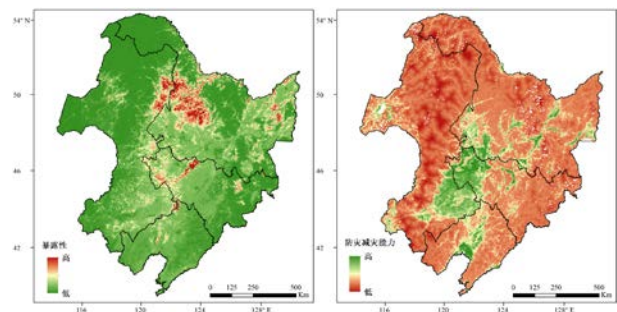


图4 东北大豆干旱灾害暴露性和防灾减灾能力

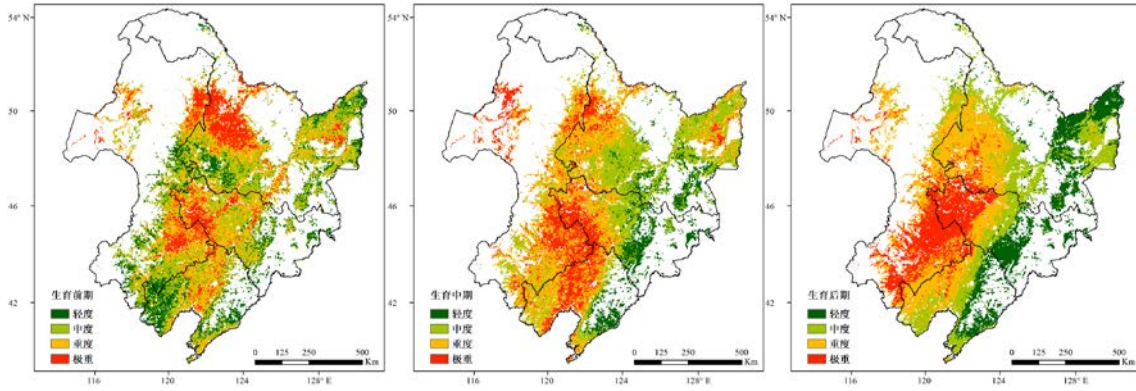


图5 东北大豆1982-2020年不同生育期干旱灾害风险评价

### 3.4. 东北大豆不同生育期干旱风险分布

将大豆各生育期的危险性和脆弱性以及代表整个研究时期的大豆暴露性和干旱防灾减灾能力栅格数据代入综合风险评价模型,进行空间叠加,最终获得了大豆不同生育期干旱灾害风险的空间分布。基于最优分割法确定不同生育期干旱灾害风险等级阈值(表2)对东北地区大豆干旱风险进行了区划(图5)。东北地区大豆在生育前期干旱风险较高的区域分布在研究区的北部和中部;生育中期,研究区西部的危险性整体高于东部地区。生育后期,高风险区域主要分布在吉林省中西部和内蒙古的通辽市与赤峰市。对干旱风险分布特征影响较大的是危险性和脆弱性。

## 4. 结论与讨论

本研究基于风险评估理论、“土壤-作物-大气”连续体系统的综合干旱指数和CROPGRO-Soybean模型建立了干旱综合风险评价模型。对构成风险的危险性、脆弱性、暴露性和防灾减灾能力四个因子进行了空间分析,并划分了干旱风险等级为轻、中、重、极重四类。最终对1982-2020年间东北地区大豆的综合干旱风险分不同生育期进行了动态评价。结果表明:生育前期,研究区中北部的干旱风险较高,该处也是大豆种植暴露性最高的区域,可通过晚播或灌溉来降低该地区的干旱风险。生育中期,研究区中北部的干旱风险由极重向重度和中度转变。由于较少的降雨量和较高的气温导致松辽平原的中部和南部干旱风险处于重度和极重等级。生育后期,极重度干旱风险区域主要集中在吉林省中西部和内蒙古的通辽、赤峰一带。通过提高灌溉能力和投入水平可提升当地的防灾减灾能力,从而减小大豆生产的干旱风险。本研究对东北大豆的干旱综合灾害风险分生育期进行动态了评估,将为大豆高效优质生产、防灾减灾提供科学依据。

## 致谢

本研究得到了国家重点研发计划项目(2019YFD1002201)的支持。

## 参考文献

- [1] Yao N, Li Y, Lei T, et al. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961—2013[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616: 73-89.
- [2] Yu X, He X, Zheng H, et al. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China[J]. Natural Hazards, 2014, 71(1): 275-289.
- [3] Zhang F, Chen Y, Zhang J, et al. Dynamic drought risk assessment for maize based on crop simulation model and multi-source drought indices[J]. Journal of cleaner production, 2019, 233: 100-114.
- [4] 郝兴宇, 韩雪, 居辉, 等. 气候变化对大豆影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2697-2706.
- [5] Zhang J. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2004, 102(2): 133-153.
- [6] Wang R, Zhang J, Wang C, et al. Characteristic analysis of droughts and waterlogging events for maize based on a new comprehensive index through coupling of multisource data in Midwestern Jilin Province, China[J]. Remote Sensing, 2019, 12(1): 60.
- [7] 曹娟, 张朝, 张亮亮, 骆玉川, 李子悦, 陶福祿. 基于Google Earth Engine和作物模型快速评估低温冷害对大豆生产的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(09): 1879-1892.
- [8] 李凯伟, 张继权, 魏思成, 等. 东北春大豆精细化气候区划[J]. 应用气象学报, 2021, 32(4): 408-420.

**Open Access** This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

