

东北三省农业旱灾风险评估研究

杨晓静^{1,2,3,4}, 徐宗学^{1,2}, 左德鹏^{1,2}, 蔡思扬^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究所, 北京 100038; 4. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 气候变化背景下, 干旱对农业生产造成的损失已不容忽视。明晰粮食主产区面临的旱灾风险特征有利于保障中国粮食生产安全。东北三省是中国最重要的粮食主产区之一, 明晰该地区的农业旱灾特征对农业生产具有十分重要的作用。基于自然灾害系统理论针对东北三省构建了农业旱灾风险评估模型, 并在县市尺度对不同等级农业旱灾风险进行了分区。研究中分别从省份尺度和县市尺度对农业旱灾危险性、暴露性、脆弱性、抗旱能力及农业旱灾综合风险进行评估。结果表明: 省份尺度上, 农业旱灾综合风险由高到低分别为黑龙江省、吉林省及辽宁省。其中危险性年际间差异明显, 暴露性则相对稳定。2010-2015年间脆弱性呈增加趋势, 三省抗旱能力均随年际变化而波动。空间范围上, 东北三省农业旱灾风险由南向北递增。农业旱灾综合风险等级上, 中级及其以上级别县市占对应省份的比例由高到低分别为黑龙江省(75.81%)、吉林省(41.30%)与辽宁省(0%)。值得注意的是, 农业旱灾综合等级最高的地区主要集中在三江平原及松嫩平原区。

关键词: 危险性; 暴露性; 脆弱性; 抗旱能力; 区划

DOI: 10.11821/dlxb201807011

1 引言

干旱本质上属于一种自然现象, 而随着干旱程度的不断加重, 其影响范围及致灾程度也随之变化。人类社会形成及发展早期, 干旱作用的主体为自然状态下的下垫面及下垫面之中的动植物乃至微生物, 由干旱所致的灾害损失相对较小^[1]。随着人类活动强度及社会经济的快速增长, 干旱引发的旱灾损失已不容忽视。干旱致灾的过程、持续时间、影响程度及可逆程度在不同国家和地区间差异显著。该差异一方面源于自然条件, 如: 区域气候气象条件、下垫面特征。另一方面则取决于人类活动类型、强度、相关部门对干旱的重视程度、全民对干旱的认知水平、防旱抗旱措施及相关规章制度等^[1-2]。目前国际上尚未形成统一的干旱定义及其分类标准, 基于已有研究成果, 干旱通常被分为4类, 即: 气象干旱、农业干旱、水文干旱及社会经济干旱^[1-3]。近年来干旱对农业生产的影响呈增加趋势, 全球约7%的大范围产量损失源于干旱^[4]。干旱对农业生产造成的影响已不容忽视, 且大规模的农业旱灾易引发区域饥荒问题, 甚至造成社会动荡。因此, 有

收稿日期: 2017-06-08; 修订日期: 2018-03-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502404); 水利部公益性行业科研专项项目(201401036); 中国水科院基本科研业务费项目(JZ0145B752017, JZ0145B582017) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFC1502404; Special Fund for Research on Public Interests, Ministry of Water Resources, No.201401036; IWHR Research&Development Support Program, No.JZ0145B752017, No.JZ0145B582017]

作者简介: 杨晓静(1988-), 女, 云南昆明人, 博士研究生, 主要从事干旱与旱灾方面研究。E-mail: yxj@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 徐宗学(1962-), 男, 山东淄博人, 教授, 博导, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

效识别农业旱灾高风险区,一方面有利于农业生产实践,另一方面也有利于区域抗旱规划及抗旱能力的提高。

目前农业干旱的研究主要可分为两大类:①针对农业干旱时空演变特征研究。此类研究主要基于气象及土壤含水量等数据计算干旱指数对农业干旱等级进行评估^[5-8];②农业旱灾风险及其灾害特点的研究。此类研究中常用的方法包括:概率统计法、借鉴自然灾害理论的模糊综合评估法及基于农业干旱主要过程的旱灾风险评估^[9]。两类研究中前者已有研究成果显著多于后者,且受限于数据资料的可获取性,农业旱灾风险评估研究更多的基于小区域尺度,大区域尺度、国家及全球尺度的研究相对较少^[10-12]。在全球尺度上,干旱风险的研究表明干旱风险的主要驱动要素是暴露性,全球尺度上干旱风险空间差异性较大,其中中国干旱的暴露性、脆弱性及风险空间差异更为显著^[13]。全球因旱所致的谷物收获面积下降约4.15%,减产量为4.9%~5.2%^[4]。水利部发布的《中国水旱灾害公报》(2006-2014年)显示东北三省(黑龙江、吉林及辽宁省)多年平均因旱作物受灾面积、成灾面积及绝收面积占全国比例分别为18.6%、20.1%及19.5%,其中2014年干旱所致东北三省的作物绝收面积占全国比例高达43.9%。从研究方法上,农业干旱风险评价研究中所应用的评价模型主要可以分为:基于农业干旱指标等级与作物产量数学关系构建的评价模型、灾损数据为基础的概率评价模型及基于自然灾害风险理论构建的风险评价模型。尽管中国已有大量针对农业干旱风险评估相关的研究,但是由于农业干旱形成的复杂性及人类社会环境的动态多变性,导致地区间农业干旱风险在致灾因子、孕灾环境、承灾体及抗旱能力等各方面差异显著。且中国农业干旱及农业旱灾风险评估的研究多在单一省、市或典型流域尺度上开展^[14-19],以多个省份为研究区的农业旱灾风险相关研究还相对较少^[20-23]。其中基于自然灾害风险理论的干旱/旱灾风险评价模型应用虽较为成熟,但大多研究仅针对研究区某一年份进行农业旱灾风险评估。基于自然灾害风险理论的农业旱灾综合风险评价在年际变化的研究则较少。

东北三省是中国最重要的粮食主产区之一,明晰该地区农业旱灾风险特征一方面有利于农业种植规划,另一方面利于增进农业防旱抗旱规划的有效性。因此,本文旨在基于东北三省为中国重要的粮食主产区且以雨养农业为主的特点,构建该区域农业旱灾风险综合评估体系、探讨其农业旱灾风险的年际变化特征并明晰不同危险等级农业旱灾的空间区划。以期为该地区的农业生产实践及防旱抗旱工作提供一定参考借鉴。

2 资料与方法

2.1 研究区概况

东北三省面积为 $80.84 \times 10^4 \text{ km}^2$,地形以平原和山地为主。该区是中国重要的粮食主产区之一,地处 $38^\circ 43' \text{N} \sim 53^\circ 33' \text{N}$, $118^\circ 53' \text{E} \sim 135^\circ 05' \text{E}$ 之间(图1)。总体上属于温带季风气候,四季分明。多年平均降水量为400~1000 mm,年平均气温为 $-3 \sim 10^\circ \text{C}$ 。农作物以一年一熟为主,多年平均粮食种植面积占全国粮食种植面积13.4%,粮食产量占全国粮食总产量比例为12.8%。图1粮食主产区是基于东北三省统计年鉴数据分析而得。

2.2 资料来源

研究的基础数据主要包括:1961-2014年东北三省70个气象站点逐月降水、气温及2011-2015年黑龙江省、吉林省及辽宁省统计年鉴。年鉴中所用数据类型包括:农作物播种面积、粮食种植面积、粮食产量、农业总产值及农用机械总动力等。气象数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>)。

2.3 研究方法

2.3.1 指标选择 旱灾的形成过程较为复杂，基于自然灾害理论评价体系及方法，较多学者认为农业旱灾风险主要可以从致灾因子危险性、承灾体的暴露性、孕灾环境的脆弱性及抗旱能力4个方面来进行研究^[9, 12-13, 19, 23]。旱灾风险评估模型要素及相关指标如下：

(1) 危险性

危险性主要体现的是致灾因子，而干旱发生最主要的原因则为降水异常。农业干旱发展过程中，气温会扰动干旱强度。单纯分析降水距平变化特征不能全面反映干旱程度。研究区涉及东北三省148个县市，土壤含水量数据较难获取，且农业干旱指标值不确定性较难评估。故研究中选择不同时间尺度（1月、3月、6月、9月及12月）标准化降水指数（SPI）与标准化蒸散发指标（SPEI），分别从干旱频率、干旱强度及指标不同干旱等级对东北三省旱灾事件的评估准确率进行分析，为能直观并综合体现降水和气温在干旱形成过程中可能引发的危险性，研究中选取12月尺度上的标准化蒸散发指标（SPEI）作为危险性指标^[25]。基于ArcGIS 10.2中反距离权重（IDW）将气象站点对应12月尺度SPEI值插值为栅格数据，以县市为边界计算区域内所有栅格点的均值即为对应县/市的SPEI值。

(2) 暴露性

暴露性表示在灾害发生过程中可能受到旱灾影响的范围。粮食种植面积占对应行政区域总面积比例可反映暴露性。但是由于统计年鉴县市范围内三个省份间数据存在部分行政区域面积缺失的情况，综合考虑区域特性及数据可利用性。研究中选取粮食种植面积与农作物播种面积的比值作为暴露性指标。

(3) 脆弱性

脆弱性用于体现农作物在干旱条件下，农业种植环境缓冲并解除干旱造成负面影响的能力。已有研究中常用灌溉旱地与耕地面积比例、灌溉水田与耕地面积比值、雨养农业与耕地面积比例、水资源开发利用程度、工程供水量、节水灌溉面积及有效灌溉面积等指标来反映脆弱性特征^[26-29]。由于东北三省县市尺度上无法满足上述典型脆弱性指标的数据需求，在综合研究区特点及数据可获取性的条件下，选取单位面积粮食产量与单位面积农业产值作为脆弱性指标。利用层次分析法对上述指标权重进行了计算。两个指标在脆弱性表征值计算时的权重值均为0.5。

(4) 抗旱能力

抗旱能力表征地区在干旱发生前及干旱致灾过程中，该地区基于人为措施降低旱灾造成损失的能力。已有研究中表征地区抗旱能力的指标主要包括：农民人均纯收入、单位面积机井数量、单位面积兴利库容、单位面积机械总动力、单位面积农村劳动力、有

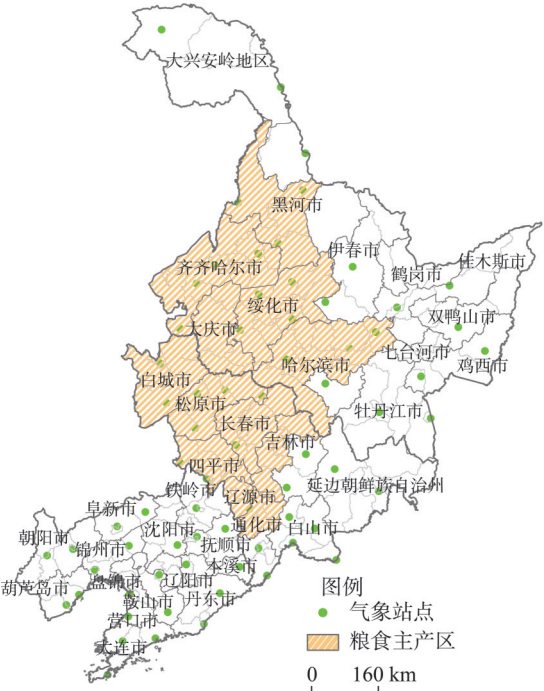


图1 东北三省气象站与粮食主产区分布
Fig. 1 Location of meteorological stations and main grain production areas in the three provinces of Northeast China

效灌溉面积占耕地面积比例、专职抗旱人员数量及抗旱服务组织覆盖率等^[24]。区域抗旱能力与灌溉率密切相关,但是东北三省各县市范围内连续多年灌溉率数据较难获取。综合东北三省县市尺度2011-2015年统计年鉴数据连续性及其可利用性等因素,本文用单位播种面积农业机械总动力为表征区域抗旱能力的指标。

2.3.2 指标归一化 为能对比分析各指标计算结果,文中对危险性、暴露性、脆弱性及抗旱能力对应的指标均进行归一化处理。在指标归一化处理过程中需要区分指标为正向指标还是负向指标。正向指标值越大表征旱灾风险越高,而负向指标表征的特点则与之相反。正向指标的归一化计算方法如下:

$$y_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式中: x_i 表示指标的数值; x_{\max} 表示指标最大值; x_{\min} 表示指标最小值。

负向指标的计算公式如下:

$$y_i = (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

式中: 各变量含义同公式(1)。

对于旱灾风险评估体系中的各要素,若反映各要素特征的指标为多个,则该要素值为各指标值与对应权重乘积之和。

2.3.3 农业旱灾风险评估模型 农业旱灾评估分别考虑了农业旱灾的危险性、暴露性、脆弱性及抗旱能力。为综合反映旱灾风险特征,针对研究区构建的农业旱灾风险评估体系如图2,构建地农业旱灾评估模型为:

$$R = \frac{H \times E \times V}{RE} \quad (3)$$

式中: R 表示农业旱灾综合指数; H 表示农业旱灾危险性; E 表示农业旱灾暴露性; V 表示农业旱灾脆弱性; RE 表示抗旱能力。

2.3.4 农业旱灾风险评估等级划分 为明确东北三省农业旱灾评估体系中各指标及综合指标的等级特征,对2010-2014年东北三省148个县市的农业干旱风险、暴露性、脆弱性、抗旱能力及农业旱灾综合指标值分别进行正态分布检验,检验结果表明数据中仅脆弱性对应的数据通过了正态分布检验。为最大程度体现出空间上的区域差异性,以自然断点法对评估体系中各指标2010-2014年的均值为标准进行分级,分级对应的标准如表1所示。

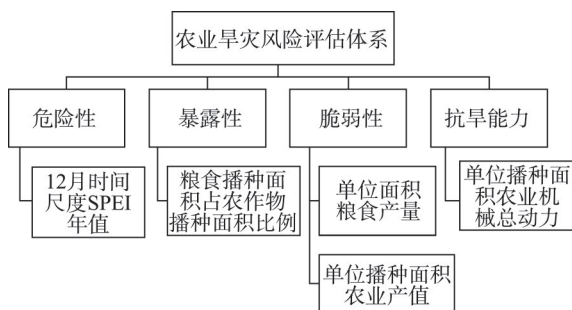


图2 农业旱灾风险评估体系示意图

Fig. 2 Risk evaluation system of agricultural drought

表1 2010-2014年东北三省农业旱灾风险评估分级标准

Tab. 1 Agricultural drought disaster categories of the three provinces of Northeast China in 2010-2014

| 均值分级 | 最低 | 低 | 一般 | 较高 | 最高 |
|--------|------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| 危险性 | 0.03~0.39 | 0.40~0.43 | 0.44~0.46 | 0.47~0.52 | 0.53~0.74 |
| 暴露性 | 0.42~0.63 | 0.64~0.79 | 0.80~0.86 | 0.87~0.93 | 0.94~0.99 |
| 脆弱性 | 0.06~0.15 | 0.16~0.23 | 0.24~0.30 | 0.31~0.36 | 0.37~0.52 |
| 抗旱能力 | 0~0.02 | 0.03~0.05 | 0.06~0.08 | 0.09~0.13 | 0.14~0.40 |
| 旱灾综合指数 | 0.20~31.00 | 32.00~88.00 | 89.00~160.00 | 161.00~260.00 | 261.00~430.00 |

3 结果与分析

3.1 时间演变特征

基于图2农业旱灾风险评估体系,利用东北三省2011-2015年统计年鉴对研究区县市尺度上的农业旱灾风险进行了评估。为能从整体上明晰东北三省间存在的农业旱灾特征差异,基于各县市所属省份平均值统计各省农业旱灾风险评估体系中对应的指标值,结果如表2所示。为直观体现省份及各指标间的差异,分别计算各省份对应年份指标值在5年中所占百分比(图3)。危险性反映了一个地区在一定环境下发生干旱并对农业生产造成损失的可能性。对比2010-2014年东北三省危险性可得,三个省份不同年份间危险性差异明显,其中黑龙江省2010年的农业旱灾危险性最高,吉林省危险性最大的年份为2011年,辽宁省农业旱灾危险性最大的年份为2014年。近5年东北三省暴露性指标值反映出三省暴露性年际间波动范围较小。相对其他农业旱灾评价要素,暴露性对农业旱灾的影响程度相对稳定。三省中农业旱灾暴露性由高到低分别为:黑龙江省、吉林省与辽宁省。基于暴露性所包含的指标,该特性主要体现的是粮食作物在各省份中所占的重要程度。而指标值也进一步证实了粮食生产在东北三省农业生产中的重要地位。

农业旱灾风险评估体系中的脆弱性主要基于单位面积粮食产量及单位面积农业产值来对该特性进行表征。比较计算结果发现2010-2014年间各省农业干旱脆弱性呈波动上升的趋势,黑龙江省脆弱性最强的年份为2014,其余省份均为2013年。通过计算各省的方差发现,脆弱性方差变化较小,体现东北三省农业干旱脆弱性变化幅度小的特征。东北三省粮食及农业产值的不断增加是导致该地区农业旱灾脆弱性整体上呈现增加趋势的主要原因。对比三省对农业干旱的抗旱能力,结果发现,三省抗旱能力由高到低分别为辽宁省、吉林省与黑龙江省。而基于东北三省农业旱灾综合指数多年平均值可看出三省农业旱灾风险由高到低分别为黑龙江省、吉林省与辽宁省。

表2 2010-2014年东北三省省级尺度农业旱灾风险评估结果

Tab. 2 Results of agricultural drought risk for the three provinces of Northeast China in 2010-2014

| 旱灾评估指标 | 年份 | 2010年 | 2011年 | 2012年 | 2013年 | 2014年 |
|------------|-----|-------|-------|--------|-------|-------|
| 危险性 | 黑龙江 | 0.76 | 0.60 | 0.52 | 0.19 | 0.27 |
| | 吉林 | 0.45 | 0.71 | 0.45 | 0.22 | 0.55 |
| | 辽宁 | 0.22 | 0.45 | 0.38 | 0.41 | 0.73 |
| 暴露性 | 黑龙江 | 0.94 | 0.92 | 0.92 | 0.93 | 0.94 |
| | 吉林 | 0.86 | 0.82 | 0.84 | 0.82 | 0.85 |
| | 辽宁 | 0.80 | 0.70 | 0.72 | 0.69 | 0.73 |
| 脆弱性 | 黑龙江 | 0.23 | 0.25 | 0.25 | 0.29 | 0.30 |
| | 吉林 | 0.27 | 0.26 | 0.23 | 0.33 | 0.33 |
| | 辽宁 | 0.26 | 0.32 | 0.27 | 0.37 | 0.29 |
| 抗旱能力 | 黑龙江 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.02 |
| | 吉林 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.02 |
| | 辽宁 | 0.06 | 0.02 | 0.22 | 0.07 | 0.04 |
| 旱灾综合指数 | 黑龙江 | 9.20 | 21.96 | 723.26 | 2.17 | 5.33 |
| | 吉林 | 3.52 | 46.15 | 372.99 | 1.78 | 8.15 |
| | 辽宁 | 1.08 | 7.83 | 0.35 | 2.11 | 5.28 |
| 农业旱灾综合减产成数 | 黑龙江 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 |
| | 吉林 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.04 |
| | 辽宁 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.24 |

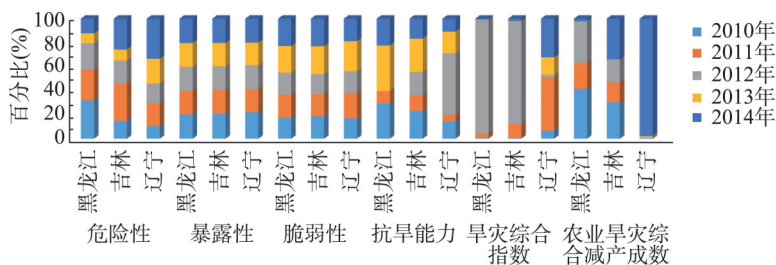


图3 2010-2014年东北三省农业旱灾风险评估结果百分比堆积图

Fig. 3 100% stacked column chart of the risk evaluation results of agricultural drought disaster in the three provinces of Northeast China in 2010-2014

3.2 空间演变特征

3.2.1 危险性空间分布特征 对比逐年危险性空间分布可知, 东北三省农业干旱年际间危险性程度差异明显, 2011年东北三省整体农业干旱程度均较高, 其中危险等级以较高和最高为主。2010年与2012年东北三省农业干旱危险性较高的区域主要集中在黑龙江省和吉林省。2013年东北三省整体农业干旱危险性较低, 而2014年东北三省农业干旱危险程度较高的地区则主要集中在辽宁省及吉林南部与辽宁交界的地方。2014年辽宁省发生了近63年最严重的干旱, 危险性空间分布中也体现出辽宁省遭受农业旱灾的风险较高, 这在一定程度上表明农业旱灾综合评估体系的危险性指标具有一定代表性。

从空间分布特征方面, 结合2010-2014年东北三省平均农业旱灾危险性空间分布(图4), 可看出各省农业旱灾危险性均有风险较高的地区。各省份呈现的特点为: 黑龙江省风险较高的地区主要集中在该省西北与东南部地区。吉林省农业干旱危险等级存在

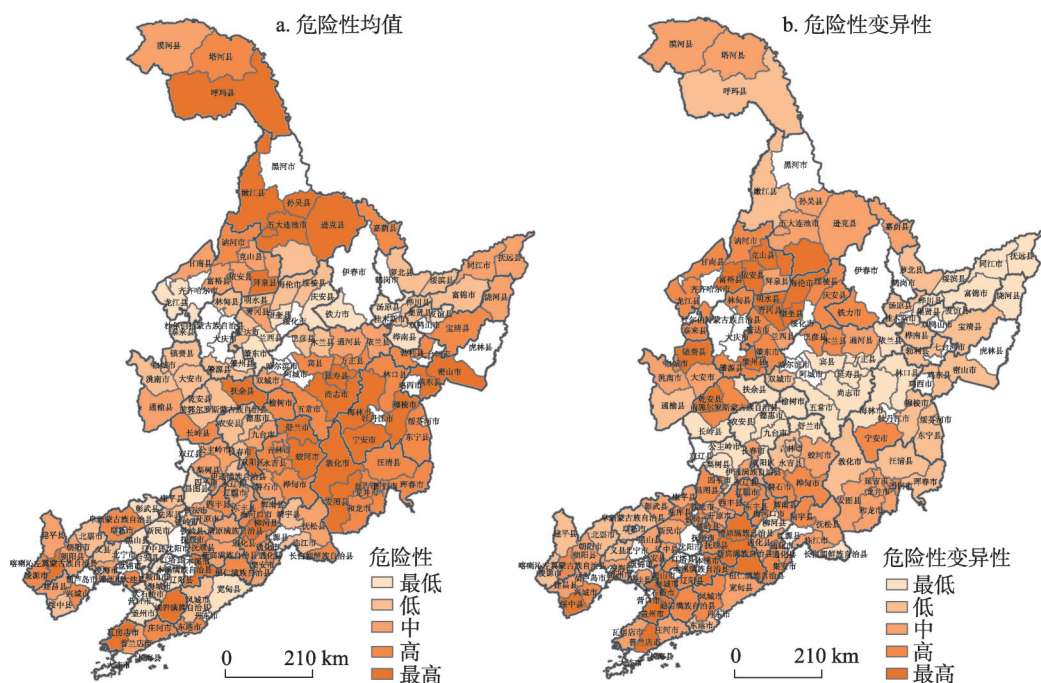


图4 东北三省2010-2014年农业旱灾危险性均值及变异性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean and variability for agricultural drought disaster risk in the three provinces of Northeast China from 2010 to 2014

由西向东增加的趋势。辽宁省除中部无资料地区外，不同等级的县市比例较为接近。对比不同等级农业旱灾危险性在各省中的比例发现（图5），黑龙江省和辽宁省不同等级农业旱灾危险性的县市比例较为接近，而吉林省危险等级高的县市比例高达50.0%。以农业旱灾危险性等级中级以上的县市所占比例为标准，东北三省农业旱灾危险性由高到低分别为黑龙江省、吉林省与辽宁省。从农业旱灾危险性空间变异性分布特征（图4b）可发现，农业旱灾危险性等级多年均值与变异性空间分布特征相反，即农业危险等级越高的地区其空间变异性较低，而危险等级较低的地区农业旱灾空间变异系数越大。尽管均值能够反映一个地区一段时间内的平均水平，但是单纯基于均值不能充分体现一个地区的农业旱灾特征。结合农业旱灾危险性空间变异分布特征，可发现中国东北松嫩平原地区尽管平均危险性以中级为主，但该地区空间变异性较大。在实际生产实践中加大对该地区农业干旱的关注，有利于保障该地区的粮食生产安全。

3.2.2 暴露性空间分布特征 暴露性可体现研究区粮食种植的重要性。对比2010-2014年东北三省农业旱灾暴露性空间分布（图6a）可发现，东北三省年际间区域性差异较小。空间上，东北三省农业旱灾暴露性呈现由南向北递增的特征，年际间吉林省和辽宁省农

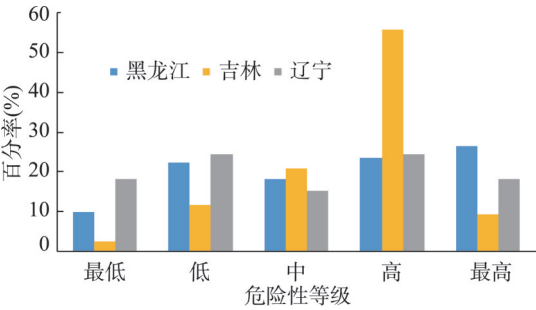


图5 东北三省不同等级农业旱灾危险性县的百分比

Fig. 5 Percentage of county and municipal agricultural drought disaster risk in the three provinces of Northeast China

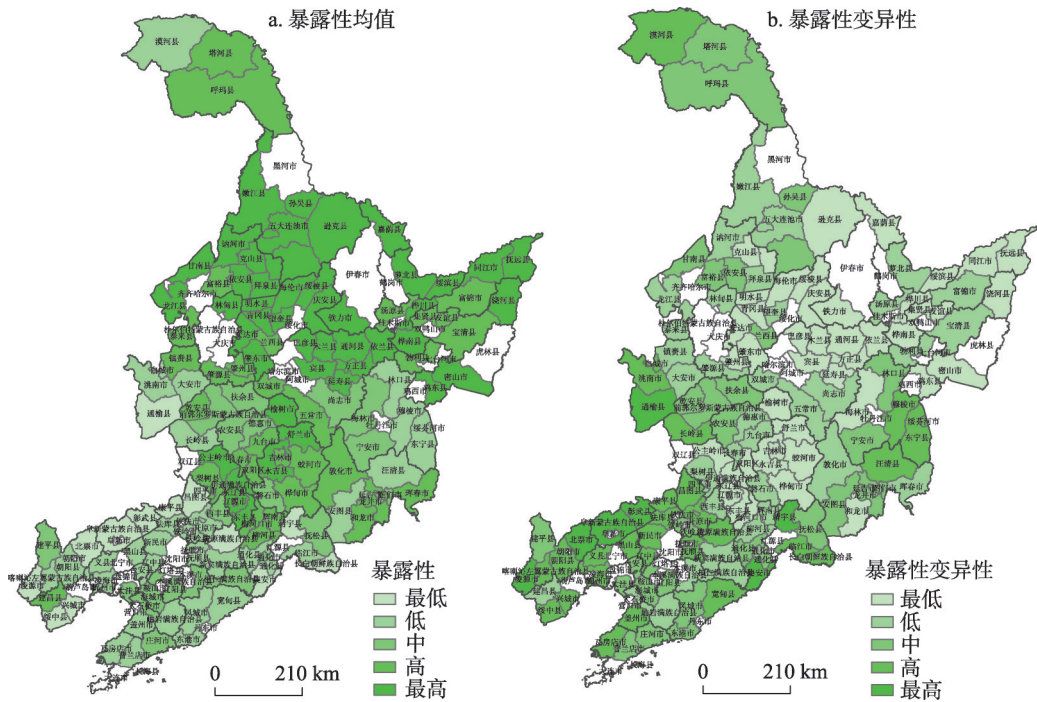


图6 东北三省2010-2014年农业旱灾暴露性均值及变异性空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of mean and variability of agricultural drought exposure in the three provinces of Northeast China from 2010 to 2014

业旱灾暴露性存在略微降低趋势。逐年东北三省农业旱灾暴露性空间分布主要特征与暴露性均值空间分布特征近似,即存在由南向北递增的趋势;暴露性等级特征上,黑龙江省农业旱灾暴露性远高于其他两个省份,该省暴露性中级及其以上县市比例高达91.94%,吉林省及辽宁省对应的比例分别为71.74%与30.00% (图7)。从空间变异性上看,东北三省农业旱灾暴露性的变异性存在由南向北减小的趋势,而该特征与暴露性等级空间分布呈相反的变化趋势。而变异性空间分布特征进一步说明东北三省近年来农业结构发生了一定程度的变化,其变化强度由强到弱分别为辽宁省、吉林省和黑龙江省。吉林省和辽宁省粮食种植的农业旱灾暴露性逐年减小,基于暴露性指标结果而呈现这一特点的主要原因是粮食种植面积减少。

3.2.3 脆弱性空间分布特征 东北三省农业旱灾脆弱性等级不同区域逐年存在一定差异,对比2010-2014年逐年农业旱灾脆弱性空间分布可发现,东北三省农业旱灾脆弱性整体上存在由南向北减小的趋势。结合各年农业旱灾脆弱性及多年平均空间分布 (图8) 可明确得出,东北三省农业旱灾脆弱性最高的地区主要集中在三江平原及松嫩平原地区。从省份上看黑龙江省脆弱性较高的地区主要为以哈尔滨为中心的周边地市,且哈尔滨市以

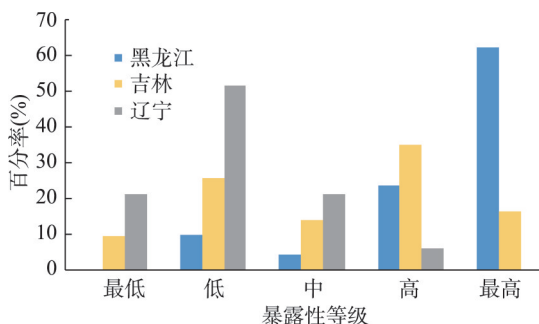


图7 东北三省各省份不同等级农业旱灾暴露性的县市百分率

Fig. 7 Percentage of county and municipal agricultural drought exposure in the three provinces of Northeast China

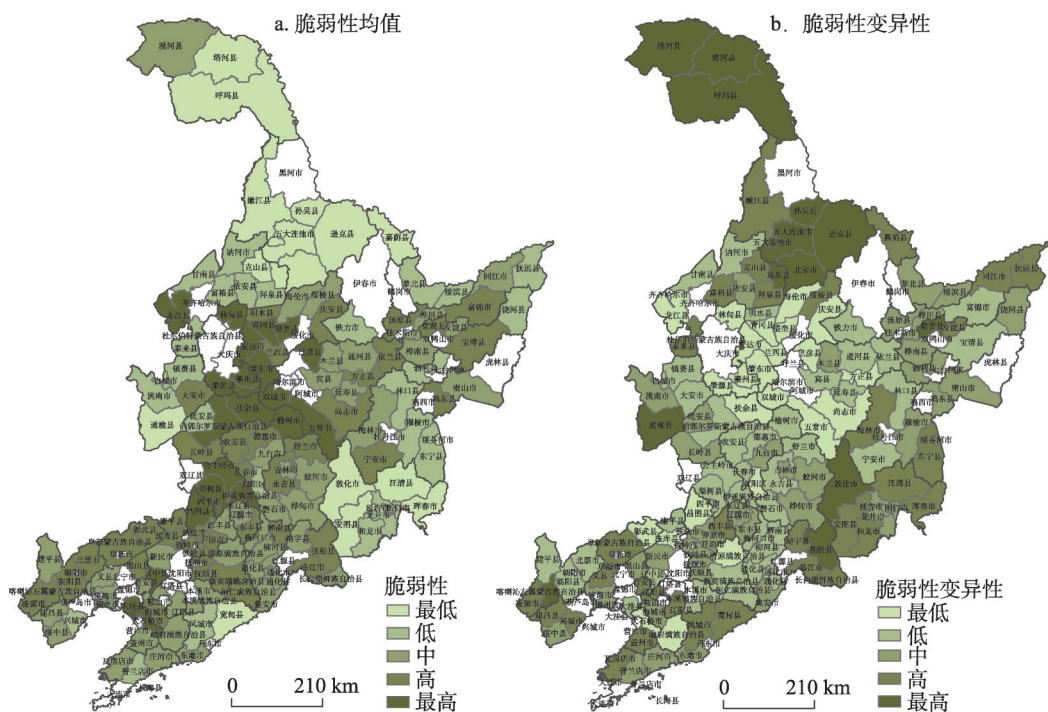


图8 东北三省2010-2014年农业旱灾脆弱性均值及变异性空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of mean and variability of agricultural drought vulnerability in the three provinces of Northeast China from 2010 to 2014

南与吉林毗邻的地区脆弱性最高。三省农业旱灾脆弱性中级及其以上的等级县市占各省县市比例由高到低分别为：辽宁省（90.00%）、吉林省（73.91%）与黑龙江省（61.29%）（图9）。空间变异性上，农业旱灾脆弱性均值空间分布特征与变异性空间分布整体呈相反变化特征，其中辽宁省西部地区及其东南部地区农业旱灾脆弱性及其变异性等级均较高。

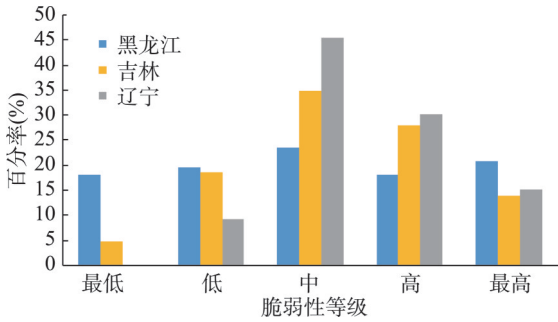


图9 东北三省各省份不同等级脆弱性的县市百分率
Fig. 9 Percentage of county and municipal agricultural drought vulnerability in the three provinces of Northeast China

3.2.4 抗旱能力空间分布特征 东北三省年际间农业旱灾抗旱能力存在一定差异，从时间尺度上看东北三省整体上抗旱能力存在波动增加的趋势（图10）。多年平均及逐年抗旱能力空间分布均存在由南向北逐渐降低的趋势。三个省份中抗旱能力由高到低分别为辽宁省、吉林省与黑龙江省，对应的抗旱能力在中级及以上的县市比率（图11）分别为80.00%、4.35%与0%。空间变异性方面，吉林和黑龙江省农业旱灾抗旱能力空间变异性与平均抗旱能力空间呈相反的空间分布特征，即抗旱能力越高的地方空间变异性越低，反之亦然。而辽宁省抗旱能力和空间变异性特征均显著高于其他两省，且辽宁省西北部地区铁岭市抗旱能力与空间变异性等级均最高。

3.2.5 农业旱灾综合风险空间分布特征 为综合体现东北三省农业旱灾综合风险特征，结合研究区特点构建了农业旱灾综合评估模型，模型结果以农业旱灾综合指数来反映。东

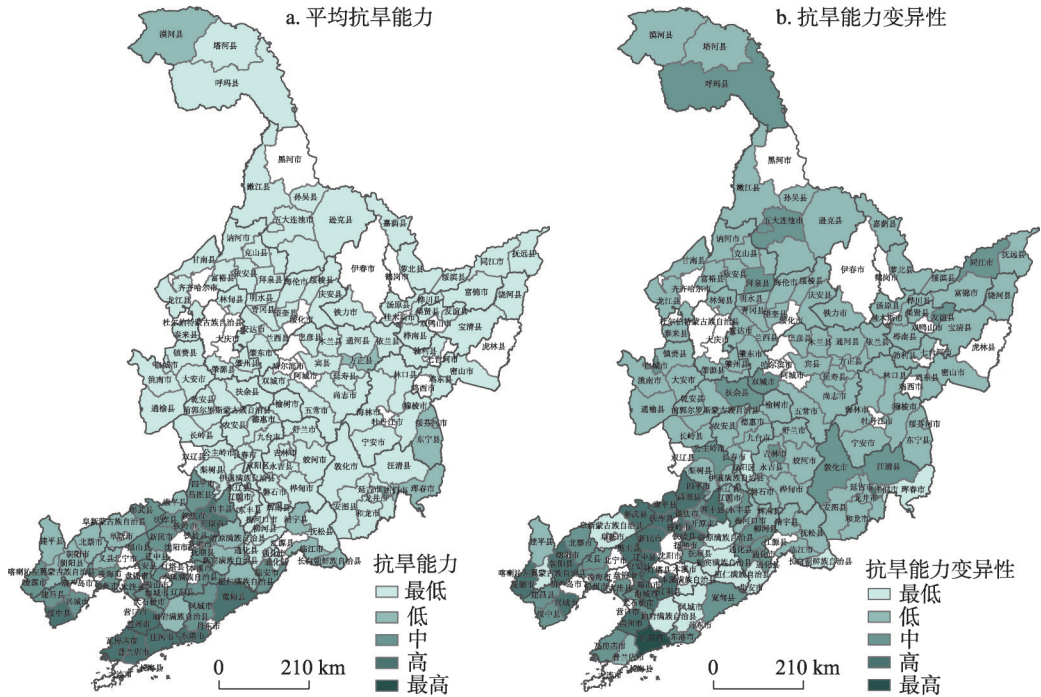


图10 东北三省2010-2014年农业旱灾平均抗旱能力及变异性空间分布
Fig. 10 Spatial distribution of mean and variability of agricultural drought resistance capacity in the three provinces of Northeast China from 2010 to 2014

北三省农业旱灾综合指数年际间变化较大(图12),但是结合逐年时空变化及多年平均农业旱灾综合指数空间分布特征可发现:东北三省农业旱灾综合风险呈由南向北增加的趋势。农业旱灾综合风险等级上,中级及其以上级别县市占对应省份的比例由高到低分别为黑龙江省(75.81%)、吉林省(41.30%)与辽宁省(0%)。值得注意的是,多年平均农业综合指标空间分布(图12)反映出东北三省中农业综合风险等级最高的地区主要集中在三江平原及松嫩平原地区。对比多年平均农业综合指数空间分布特征发现:辽宁省遭受的农业旱灾等级与空间变异程度均最低。吉林省农业旱灾综合风险变异性以中部的松原市及吉林市为中心,离该中心越远则变异性越大,且与综合指数值变化特征相反。黑龙江省农业旱灾综合指数空间变异性及多年平均风险等级均较高。基于多年平均农业旱灾综合风险评估结果,不同等级农业旱灾风险的县市区划如表3所示。

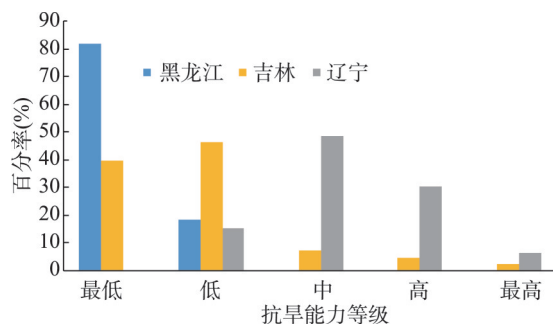


图11 东北三省各省份不同等级抗旱能力的县市百分率

Fig. 11 Percentage of county and municipal agricultural drought resistance capacity in the three provinces of Northeast China

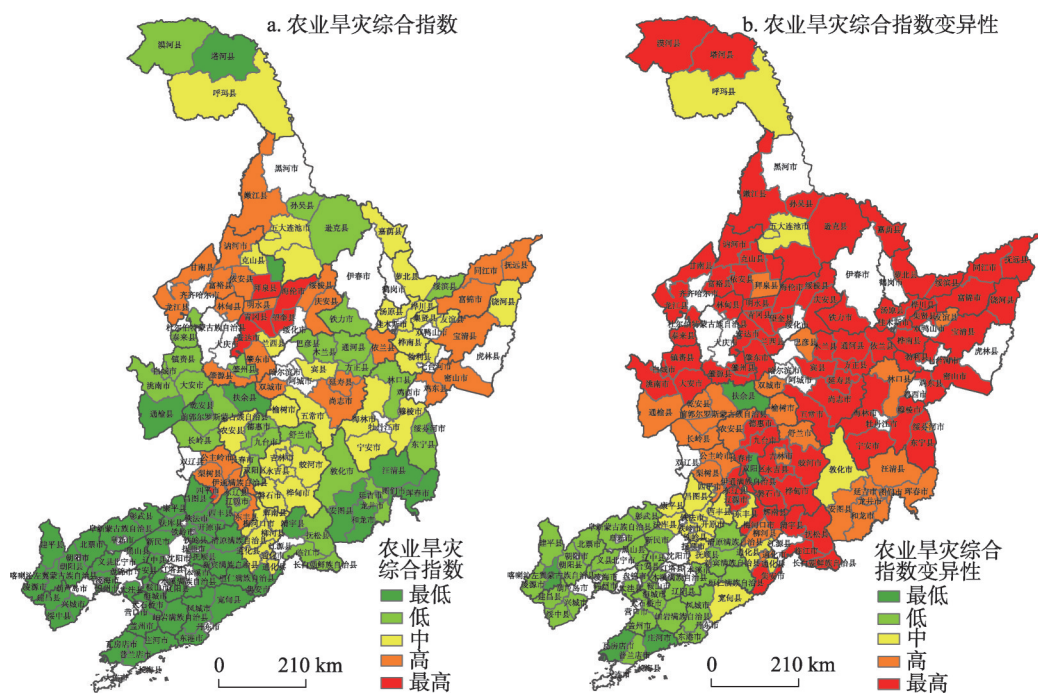


图12 东北三省2010-2014年平均农业旱灾综合风险及旱灾变异性空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of mean and variability of agricultural drought composite risk in the three provinces of Northeast China from 2010 to 2014

4 讨论

基于研究区特点构建县市尺度上的农业旱灾风险评估体系,方法上能够丰富东北三省农业旱灾风险评估技术;在实用性方面,县市尺度的农业旱灾风险评估能够深化对农

表3 东北三省不同农业旱灾风险等级区划

| Tab. 3 Regionalization of agricultural drought composite risk in the three provinces of Northeast China | | |
|---|------|--|
| 等级 | 省份 | 县市名称 |
| 最低 | 黑龙江省 | 克东县、绥芬河市 |
| | 吉林省 | 扶余县、珲春市、汪清县、安图县、和龙市、集安市、靖宇县、乾安县、通榆县、图们市、延吉市 |
| | 辽宁省 | 昌图县、桓仁满族自治县、开原市、宽甸县、清原满族自治县、西丰县、新宾满族自治县、北票市、本溪满族自治县、朝阳县、大石桥市、大洼县、东港市、法库县、凤城市、抚顺县、阜新蒙古族自治县、盖州市、海城市、黑山县、建昌县、建平县、喀喇沁左翼蒙古族自治县、康平县、辽阳县、辽中县、凌海市、凌源市、普兰店市、绥中县、台安县、铁岭县、瓦房店市、新民市、兴城市、岫岩满族自治县、义县、彰武县、长海县、庄河市 |
| 低 | 黑龙江省 | 巴彦县、东宁县、方正县、林口县、漠河县、木兰县、绥滨县、孙吴县、塔河县、泰来县、通河县、逊克县、肇州县 |
| | 吉林省 | 大安市、敦化市、前郭尔罗斯蒙古族自治县、舒兰市、镇赉县、白城市、德惠市、东辽县、抚松县、九台市、临江市、龙井市、双阳区、洮南市、长白朝鲜族自治县、长岭县 |
| | 辽宁省 | |
| 中 | 黑龙江省 | 宾县、勃利县、海林市、呼玛县、桦川县、桦南县、集贤县、嘉荫县、克山县、萝北县、穆棱市、宁安市、饶河县、汤原县、铁力市、五常市、五大连池市、友谊县 |
| | 吉林省 | 蛟河市、榆树市、桦甸市、辉南县、吉林市、辽源市、柳河县、梅河口市、农安县、磐石市、通化市、通化县、永吉县、长春市 |
| | 辽宁省 | |
| 高 | 黑龙江省 | 宝清县、北安市、抚远县、富锦市、富裕县、甘南县、鸡东县、兰西县、林甸县、龙江县、密山市、明水县、嫩江县、庆安县、尚志市、双城市、绥棱县、同江市、延寿县、依安县、依兰县、肇东市、肇源县 |
| | 吉林省 | 东丰县、公主岭市、梨树县、伊通满族自治县 |
| | 辽宁省 | |
| 最高 | 黑龙江省 | 安达市、拜泉县、海伦市、讷河市、青冈县、望奎县 |
| | 吉林省 | 四平市 |
| | 辽宁省 | |

业旱灾风险的认知且对防旱抗旱规划提供一定参考借鉴。省份尺度上，农业旱灾风险综合评估结果（图13）表明东北三省的农业旱灾风险由高到低分别为黑龙江省、吉林省及辽宁省。为进一步验证旱灾综合指数对旱灾的评估能力，将农业旱灾等级评估中常用的综合减产成数评估结果与旱灾综合指数进行对比。结果表明：两种方法识别出的旱灾风险最低的年份均一致，且对农业旱灾风险等级结果较为相似；东北三省危险性与农业旱灾风险均处中等水平，而暴露性与脆弱性的等级则相对较高。该结果与已有类似研究所获结论^[9, 15]较为相似。

空间尺度上，危险性年际间空间变异性较大，其主要是受到降水与气温的共同作用。以典型干旱年2014年为例，危险性空间分布显示辽宁省与吉林省大部分地区农业旱

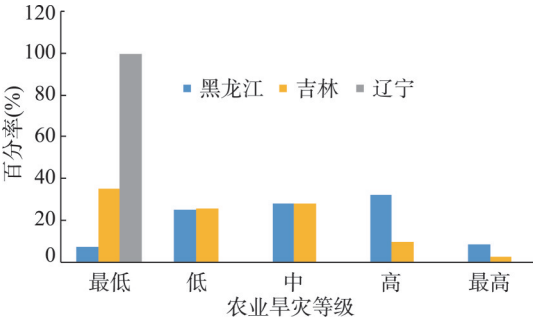


图13 东北三省各省份不同等级农业旱灾的县市百分率

Fig. 13 Percentage of county and municipal agricultural drought composite risk in the three provinces of Northeast China

灾危险性均处于中级以上,其中辽宁省危险等级最高。暴露性与脆弱性均体现出东北三省农业以粮食种植为主,粮食主产区主要集中在松嫩平原与三江平原一带,该区农业旱灾暴露性与脆弱性等级均较高。为保证粮食主产区粮食生产安全,后续防旱抗旱工作中需要关注的重点包括:①加强对农业种植区域气象观测与土壤墒情的监测与预报,进而提升对农业旱灾危险性的预估能力;②以《全国种植业结构调整规划(2016-2020年)》为导向,强化对种植结构调整的重点区域作物特征制定相应的防旱措施。研究结果表明三江平原与松嫩平原农业旱灾风险较高,而该区域在今后的种植要求为稳定水稻优势产区的面积。为能有效提高防旱抗旱能力,该区域今后应重点强化灌溉配套设施建设并进一步推进节水改造;③强化区域间干旱监测数据共享机制,以科学调度为前提,合理调配抗旱物质提前准备。

研究方法上,基于自然灾害风险评估系统理论构建了针对东北三省的农业旱灾评估体系。受年鉴资料类型、年限及省份间数据差异性所限,评估结果的代表性存在一定欠缺。但是,本文对跨省份的农业旱灾风险评估有利于从整体上明晰东北粮食主产区的农业旱灾特征,对今后农业生产的防旱抗旱工作具有一定参考借鉴价值。随着今后统计年鉴的进一步规范化,农业旱灾风险评估体系的科学性及其完整性有望进一步提升。研究内容上,有利于更为客观地揭示研究区农业旱灾风险特征本质。与此同时,后续研究中需要进一步关注的重点是地区尺度与大区域尺度相结合的农业旱灾风险评估的合理性研究。

5 结论

基于东北三省区域特征构建了农业旱灾风险评估体系,分别对该区域农业旱灾危险性、暴露性、脆弱性及抗旱能力的时空演变特征进行研究,分析了该地区农业旱灾综合风险的时空演变特征,并对不同农业旱灾等级的县市进行了区划。主要结论如下:

(1)省份尺度上,危险性、脆弱性及抗旱能力年际间变化幅度相对较小,而危险性与抗旱能力年际变化显著。多年平均危险性与暴露性从高到低分别为:黑龙江省、吉林省及辽宁省,而脆弱性及抗旱能力由高到低为:辽宁省、吉林省及黑龙江省。

(2)空间尺度上,农业旱灾危险等级呈由西向东增加的趋势,松嫩平原地区危险性等级居中,但是该地区空间变异性较大,为保障农业生产的有序进行需要加强该地区农业干旱监测。农业旱灾暴露性由南向北递增,而脆弱性与抗旱能力空间变化趋势则与暴露性相反。农业旱灾风险综合评估结果表明东北三省农业旱灾风险由南向北递增,且危险等级最高的地区主要集中在三江平原及松嫩平原地区。在今后研究中,需以东北三省种植结构调整规划为基础,不断深入对农业旱灾高风险区干旱对不同粮食作物致灾机理的研究。

参考文献(References)

- [1] Wilhite D A. Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues. CRC Press, 2005.
- [2] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [3] Lloyd-Hughes B. The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013: 1-5.
- [4] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 2016, 529(7584): 84.
- [5] Yang Xiaochen, Ming Bo, Tao Hongbin, et al. Spatial distribution characteristics and impact on spring maize yield of drought in Northeast China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(6): 758-767. [杨晓晨, 明博, 陶洪斌, 等. 中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响. *中国生态农业学报*, 2015, 23(6): 758-767.]
- [6] Xu Lingyan, Wang Huimin, Duan Qicai, et al. The temporal and spatial distribution of droughts during summer corn

- growth in Yunnan Province based on SPEI. *Resources Science*, 2013, 35(5): 1024-1034. [许玲燕, 王慧敏, 段琪彩, 等. 基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析. *资源科学*, 2013, 35(5): 1024-1034.]
- [7] He Bin, Wu Jianjun, Lv Aifeng. New advances in agricultural drought risk study. *Progress in Geography*, 2010, 29(5): 557-564. [何斌, 武建军, 吕爱锋. 农业干旱风险研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(5): 557-564.]
- [8] Wang Jingsong, Guo Jiangyong, Zhou Yaowu, et al. Progress and prospect on drought indices research. *Arid Land Geography*, 2007, 30(1): 60-65. [王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 60-65.]
- [9] Qu Yanping, Gao Hui, Lv Juan, et al. Agricultural drought disaster risk assessment in China based on the regional disaster system theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(8): 908-917. [屈艳萍, 高辉, 吕娟, 等. 基于区域灾害系统论的中国农业旱灾风险评估. *水利学报*, 2015, 46(8): 908-917.]
- [10] Blauhut V, Stahl K, Stagge J H, et al. Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, drought indices, and vulnerability factors. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(7): 2779-2800.
- [11] Li X, Zhou W, Chen Y D. Assessment of regional drought trend and risk over China: A drought climate division perspective. *Journal of Climate*, 2015, 28(18): 7025-7037.
- [12] Zhang Q, Han L, Jia J, et al. Management of drought risk under global warming. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 125(1/2): 187-196.
- [13] Carrao H, Naumann G, Barbosa P. Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2016, 39: 108-124.
- [14] Feng Bo, Zhang Guangxin, Li Fengping. Characteristics of seasonal meteorological drought and risk regionalization in Songhua River basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 466-474. [冯波, 章光新, 李峰平. 松花江流域季节性气象干旱特征及风险区划研究. *地理科学*, 2016, 36(3): 466-474.]
- [15] Zuo Haiyang. Analysis of spatial-temporal evolution of agricultural drought in the Northeast. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2013(10): 43-45. [左海阳. 东北地区农业旱灾时空演变规律分析. *东北水利水电*, 2013(10): 43-45.]
- [16] Shan Kun, Liu Buchun, Liu Yuan. Analysis on drought risk of maize based on natural disaster system theory in Liaoning province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 186-194. [单琨, 刘布春, 刘园, 等. 基于自然灾害系统理论的辽宁省玉米干旱风险分析. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 186-194.]
- [17] Shang Jinying, Shang Jie. Risk assessment of agriculture drought in Heilongjiang Province based on information diffusion theory. *Ecological Economy*, 2009(6): 129-131. [汪金英, 尚杰. 基于信息扩散理论的黑龙省农业旱灾风险分析. *生态经济*, 2009(6): 129-131.]
- [18] Bie Dejin, Zhu Xiufang, Zhao Anzhou, et al. Assessment of agricultural drought vulnerability: A review. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2015, 51(Suppl.1): 62-69. [别得进, 朱秀芳, 赵安周, 等. 农业旱灾脆弱性研究综述. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(Suppl.1): 62-69.]
- [19] Lei Y D, Zhang H L, Chen F, et al. How rural land use management facilitates drought risk adaptation in a changing climate: A case study in arid northern China. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 192-199.
- [20] Yin Yuanyuan, Wang Jingai, Huang Xiaoyun, et al. Progress of indices and models of drought risk assessment at global scale. *Arid Zone Research*, 2014, 31(4): 619-626. [尹圆圆, 王静爱, 黄晓云, 等. 全球尺度的旱灾风险评价指标与模型研究进展. *干旱区研究*, 2014, 31(4): 619-626.]
- [21] Jia Huicong, Wang Jingai. Progress in research at home and abroad on risk assessment of drought in different regional scale. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(2): 138-145. [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.]
- [22] Potopova V, Boroneant C, Boincean B, et al. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(4): 2063-2082.
- [23] Dobrovolski S G. World droughts and their time evolution: Agricultural, meteorological, and hydrological aspects. *Water Resources*, 2015, 42(2): 147-158.
- [24] Jin Juliang, Song Zhanzhi, Cui Yi, et al. Research progress on the key technologies of drought risk assessment and control. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 398-412. [金菊良, 宋占智, 崔毅, 等. 旱灾风险评估与调控关键技术研究进展. *水利学报*, 2016, 47(3): 398-412.]
- [25] 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.
- [26] Yang Jiaman. Evaluation of vulnerability to agricultural disaster and study on its countermeasures [D]. Hefei: Anhui

- Agricultural University, 2015. [杨家曼. 农业旱灾脆弱性评价及其对策研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.]
- [27] Xu Kai, Xu Xiangyu, Li Aihua, et al. Assessing agricultural drought disaster risk in Chengde city using stochastic method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(14): 139-146. [许凯, 徐翔宇, 李爱花, 等. 基于概率统计方法的承德市农业旱灾风险评估. *农业工程学报*, 2013, 29(14): 139-146.]
- [28] Qu Yanping, Li Jianqiang, Lv Juan, et al. A quantitative framework for assessing drought disaster risk and key techniques. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 297-304. [屈艳萍, 酆建强, 吕娟, 等. 旱灾风险定量评估总体框架及其关键技术. *水科学进展*, 2014, 25(2): 297-304.]
- [29] Jin Juliang, Li Jianqiang, Zhou Yuliang, et al. Research on the theoretical framework of drought risk assessment. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(3): 1-10. [金菊良, 酆建强, 周玉良, 等. 旱灾风险评估的初步理论框架. *灾害学*, 2014, 29(3): 1-10.]

Assessment on the risk of agricultural drought disaster in the three provinces of Northeast China

YANG Xiaojing^{1,2,3,4}, XU Zongxue^{1,2}, ZUO Depeng^{1,2}, CAI Siyang^{1,2}

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key

Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

4. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction, Beijing 100038, China)

Abstract: Due to the increasing effects of climate change, drought induced economic losses of agricultural production should no longer be ignored. It has become vital to better understand the causes of agricultural drought. This will help to ensure the security of agricultural production, especially in the major grain production regions of China. Few previous studies have focused on multi-year agricultural drought risk in the grain production of Northeast China. The three provinces are crucial to grain production in China. Increased understanding of drought in this agricultural region would benefit the management of agricultural production. This study focuses on the investigation of possible risks that contribute to agricultural drought in the region, based on the natural disaster system theory. A risk assessment model is developed, based on the region, to investigate the spatiotemporal features of agricultural drought and regionalize the potential risks at county and city levels. The contributing factors for agricultural drought potential risk are exposure, vulnerability, resistance capacity, and agricultural drought composite risk, and these factors have been explored separately. Results indicated two important ideas. First, at the province level, the risk of agricultural drought was the highest for Heilongjiang and the lowest for Liaoning, with Jilin falling in between. The disaster risk changed during the year when the fluctuation of exposure was comparatively stable. Drought vulnerability was gradually rising while agricultural drought resistance capacity remained stable from 2010 to 2014. Second, looking at the entire region, the risk of agricultural drought gradually increased from south to north. The severity level, which is the percentage of county and municipal agricultural drought composite risk within each province, was Heilongjiang (75.81%), Jilin (41.30%) and Liaoning (0%). The highest agricultural drought risks were concentrated in the Sanjiang Plain and Songnen Plain.

Keywords: hazard; exposure; vulnerability; drought resistance capacity; regionalization