

# 基于遥感数据的辽西北地区玉米干旱风险时空动态格局

刘晓静<sup>1</sup>, 张继权<sup>1</sup>, 王春乙<sup>2</sup>, 严登华<sup>3</sup>, 刘兴朋<sup>1</sup>, 马东来<sup>1</sup>, 包玉龙<sup>1</sup>

1. 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
2. 海南省气象局, 海口 570100
3. 中国水资源和水利研究院, 北京 100038

**摘要** 归一化差值植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 目前已被国内外广泛应用于干旱的定量识别与监测, 它是利用遥感方法获得的一个衡量地表植被生长状态以及植被覆盖度的指标。因此在气象干旱背景下, 对干旱时段的 NDVI 进行计算, 建立玉米干旱风险诊断模型, 通过作物对干旱的响应表征农业干旱的风险。本文在气象干旱条件下, 从玉米对干旱的响应出发, 利用 NDVI 建立玉米干旱风险诊断模型, 评估了研究区典型干旱年内典型干旱时段玉米的干旱风险。利用 K 均值聚类算法 (K-Means) 将玉米干旱风险分为低风险、中等风险及高风险 3 类, 运用 GIS 与 RS 手段绘制了玉米干旱风险等级图, 并对玉米干旱风险的时空格局进行了动态分析。结果表明, 在玉米干旱风险时间变化规律上, 由于土壤水的影响, 玉米干旱风险不能完全与典型干旱年内典型干旱时段的降水距平百分率成反比; 从玉米干旱风险空间分布特征来说, 受纬度、海拔高度以及防旱抗旱能力的影响, 干旱风险表现为南北差异明显。研究玉米干旱风险的时空动态格局, 能够为政府部门和田间管理者掌握干旱的发生、发展变化, 以及因地制宜地制定防御对策提供科学依据。

**关键词** 遥感; 玉米干旱风险诊断模型; 干旱风险时空动态格局; K 均值聚类算法; 地理信息系统

**中图分类号** TQ050.4\*25

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.19.004

## Temporal and Spatial Dynamic Distribution of Drought Risk over the Northwest of Liaoning Province Based on Remote Sensing Data

LIU Xiaojing<sup>1</sup>, ZHANG Jiquan<sup>1</sup>, WANG Chunyi<sup>2</sup>, YAN Denghua<sup>3</sup>, LIU Xingpeng<sup>1</sup>, MA Donglai<sup>1</sup>, BAO Yulong<sup>1</sup>

1. Institute of Natural Disaster Research, College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China
2. Hainan Province Meteorological Bureau, Haikou 570100, China
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

**Abstract** Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is an indicator which is able to measure the growth status and coverage of vegetation on the surface. It has been widely used at home and abroad for the quantitative identification and monitor of drought. Thus against the background of meteorological drought, NDVI in drought period is calculated in order to establish the drought risk diagnosis model of maize which is able to reflect the agricultural drought risk by the response of drought from crops. The NDVI under meteorological drought is used to build the drought risk diagnosis model of maize for assessing the drought risk of maize during the typical drought period of typical years in the study area. K-Means clustering algorithm is used to divide risks into three levels, namely, low, moderate, and high. Then the grade maps of risk are drawn by GIS and RS. And the temporal and spatial distribution of drought risk of maize is dynamically analyzed. The analysis result shows that based on the time changes of maize drought risk, because of water effect on soil, precipitation anomaly percentage at drought period in typical years is not completely inverse proportional to the drought risk of

收稿日期: 2012-03-24; 修回日期: 2012-05-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2011BAD32B04); 全球变化研究国家重大科学研究计划 (2010CB951102); 国家自然科学基金项目 (41071326)

作者简介: 刘晓静, 博士研究生, 研究方向为自然灾害监测预警、风险评价与管理, 电子信箱: liuxj599@nenu.edu.cn; 张继权 (通信作者), 教授, 研究方向为自然灾害风险评价与管理, 电子信箱: zhangjq022@nenu.edu.cn

maize; based on the drought spatial distribution features of maize, drought risk, which is affected by the latitude, altitude, and drought control ability, has a large differences between the north and south. The study on the temporal and spatial dynamic distribution of the drought risk of maize could provide a scientific basis for learning the occurrence and development of drought and making defense strategies based on local conditions for government departments and the farmers.

**Keywords** remote sensing; drought risk diagnosis model of maize; temporal and spatial dynamic distribution of drought risk; K-Means clustering algorithm; GIS

## 0 引言

作物干旱风险的时空动态格局主要包括作物干旱风险的时间变化以及空间分布规律。它是将风险概念与时空研究耦合后的成果。研究作物干旱风险的时空动态格局,能为政府部门及农田管理者掌握干旱的发生、发展变化,分析干旱的地域差异性以及变化趋势,制定有效防御对策提供科学依据,便于因地制宜地做出防御规划措施,达到防灾抗灾资源优化配置的目的。

然而,目前国内外对干旱风险的时空格局研究较少,大部分的研究还是建立在各自的体系上。董秋婷等<sup>[1]</sup>利用东北地区 1960—2007 年间的逐日气象数据,建立了 CWDI(作物水分亏缺指数),利用它分析春玉米的干旱等级和时空演变特征。张继权<sup>[2]</sup>利用 1949—1990 年的气象数据研究了松辽平原的干旱风险。但是前人无论对干旱风险还是干旱时空特征的研究都是建立在地面观测点的气象资料<sup>[3-8]</sup>基础上,而地面观测点的空间位置、密度等都限制了点至面的转换精度,从而降低了对干旱的监测与评价精度。

随着卫星技术的发展,遥感栅格数据的大尺度、均一性等特点被用来弥补这一缺憾。归一化差值植被指数(NDVI)是植物生长状态以及植被空间分布密度的最佳指示因子,一直被国内外广泛应用于大尺度植被活动状况<sup>[9]</sup>、与气候变化的关系以及土地利用/覆被变化<sup>[10-16]</sup>的研究。近年来全球变暖趋势越来越明显,NDVI 被众多学者用于对干旱的监测。研究表明,NDVI 能够识别并定量干旱对植被的影响<sup>[17-18]</sup>。Ji 等<sup>[19]</sup>利用 NDVI 和气象干旱指数 SPI 之间的关系证明了 NDVI 能够表征植被对干旱的响应。

因此,本文结合气象干旱时段以及玉米需水关键期,采用降水距平百分率作为气象干旱评价因子,提取 1985—2006 年间的典型干旱年的典型干旱时段,并利用 NDVI 建立该时段内的玉米干旱风险诊断模型。采用 K 均值聚类算法将玉米干旱风险分为低风险、中等风险及高风险 3 类,运用 GIS 与 RS 手段绘制了玉米干旱风险等级图,并对玉米干旱风险的时空格局进行了动态分析。

## 1 研究区概况

辽宁省位于中国东北地区的南部,属于温带大陆性季风气候区。境内雨热同季,日照丰富,积温较高,雨量不均,东湿西干。耕地面积约为 409.29 万  $\text{hm}^2$ , 占全省土地总面积的 27.65%,其中有 80%左右分布在辽宁中部平原区和辽西北低

山丘陵的河谷地带。辽宁省降水量由东南向西北呈递减趋势,西部地区正常年份的降雨量仅有 500mm,是辽宁省干旱发生最频繁、最严重的地区<sup>[20]</sup>。因此选取辽宁省西北部 6 个市——朝阳、阜新、锦州、铁岭、沈阳、葫芦岛作为研究区域。

## 2 数据来源与处理

### 2.1 卫星数据

本研究卫星资料选用 1985—2006 年美国国家航空航天局的模拟与制图研究全球数据集(Global Inventory Modelling and Mapping Studies, GIMMS), 该数据集中的 NDVI 是每 15d 合成的最大化 NDVI 数据,空间分辨率为 8km。为了消除数据中残留的云和大气的干扰,研究中每月两幅 NDVI 数据采用最大值合成法,生成 1985—2006 年的月 NDVI 数据集。

### 2.2 土地覆盖/利用数据

1992、1999、2000、2001 及 2006 年的土地利用/覆盖数据来自于中国科学院地理科学与资源研究所寒区旱区数据共享运行服务中心,已得到广泛验证与应用<sup>[4, 21-22]</sup>。对土地利用/覆盖数据投影之后,提取玉米分布范围,并将其重采样成 8km 分辨率的栅格数据。

## 3 研究方法

### 3.1 归一化差值植被指数

归一化差值植被指数是利用遥感方法获得的一个衡量地表植被生长状态以及植被覆盖度的指标,它通过植物体内叶绿素对近红外光和红光的反射特征来反映植物生物量的多少。绿色植被在近红外波段具有高反射的特点,而对红光波段则是强吸收,NDVI 利用植被在可见光及近红外光的这种光谱特征,通过两个波段间的组合,对地表植被覆盖和植被生长状况进行度量。计算公式如下:

$$NDVI = \frac{b_2 - b_1}{b_2 + b_1} \quad (1)$$

该公式确保了 NDVI 值在[-1, 1]之间,其中,  $b_1$  为红光波段反射率,  $b_2$  为近红外波段反射率。

### 3.2 降水距平百分率

降水距平百分率是指某一时段的降水与多年该时段的降水平均值的偏离程度,是最常用的干旱表征指标之一。本文利用辽西北地区的降水距平百分率作为其气象干旱的监测指标,通过对比分析,筛选出研究所需的典型干旱时段。

公式如下:

$$P = \frac{P_i - \bar{P}_i}{\bar{P}_i} \quad (2)$$

式中,  $P$  为降水距平百分率,  $P_i$  为某时段的降水量,  $\bar{P}_i$  为同期多年平均降水量。

### 3.3 K 均值聚类算法

K 均值聚类算法是 MacQueen 于 1967 年提出的,它是聚类方法中一个基本的划分方法,采用误差平方和准则函数作为聚类准则函数,是目前为止用于科学和工业应用的诸多聚类算法中一种有影响的技术。K 均值聚类算法是极其典型的基于距离的聚类算法,它采用距离作为相似性的评价指标,认为两个对象的距离越近,其相似度就越大。该算法认为簇是由距离靠近的对象组成,因此把得到紧凑且独立的簇作为最终目标。其工作原理是首先随机从数据集中选取  $K$  个点作为初始聚类中心,计算各样本到聚类中心的距离,按距离将样本归到离其最近的类。本算法的特点是每次迭代中都要考察各样本的分类是否正确。若不正确,则进行调整。在全部样本调整完后,修改聚类中心,进入下一次迭代,直到所有样本被正确分类,不再被调整,聚类中心也不再发生变化。由公式(3)得到的聚类标准具有如下特征——各聚类本身尽可能地紧凑,各聚类的类之间尽可能地分开。

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{p \in C_i} |p - m_i|^2 \quad (3)$$

式中,  $E$  为标准测度值,  $i$  为样本数,  $K$  为聚类数,  $p$  为代表对象的空间中的一个点,  $m_i$  为聚类  $C_i$  的均值。

## 4 研究区玉米干旱风险时空动态格局分析

### 4.1 玉米干旱风险诊断模型的建立

植被在红光、近红外的反射和吸收特征,确定了植被的  $NDVI$  值在  $[0, 1]$  之间。植被的  $NDVI$  值越大,表明植被生长状况越好,适用于植被早、中期生长阶段的动态监测。因此,将干旱时段玉米的  $NDVI$  与多年同期玉米  $NDVI$  的平均值进行比较,建立玉米干旱风险诊断模型:

$$MDRDI = \frac{NDVI_i - \overline{NDVI}}{\overline{NDVI}} \quad (4)$$

其中,  $MDRDI$  为玉米干旱风险诊断指数,用于表示在干旱条件下玉米的生长状态,其值越大,玉米干旱风险越低。 $NDVI_i$  为干旱时段  $i$  的  $NDVI$  值,  $\overline{NDVI}$  为该时段  $NDVI$  多年平均值。

通过将干旱时段玉米的生长状态与其多年同期的生长状态进行比较,不仅可以监测玉米遭受干旱时的生长状态,还可以反映玉米干旱风险的空间分布<sup>[2]</sup>,并通过分析时间序列  $MDRDI$  的变化,反映干旱风险的时间变化特征,从而达到玉米干旱风险的时空动态研究。

### 4.2 典型干旱时段的选取

文中干旱时段指的是气象干旱发生的阶段。气象干旱的发生并不一定能引起农业干旱的发生,因此单靠月降水量多少不能完全判断该地区玉米是否受旱。卫星提供的是大尺度

数据,研究玉米干旱风险的时空特征必须选取能够很好地展现干旱条件下玉米生长状态的  $MDRDI$ ,即干旱事件在玉米生长期应属于极端事件。因此,典型干旱时段的选取至关重要。利用辽西北地区 11 个站点 1956—2010 年 4—9 月的降雨数据计算降水距平百分率  $P$ ,判断典型干旱年(图 1)。根据马宗晋等对干旱等级的划分标准<sup>[24]</sup>( $P \leq -25\%$ ),结合辽西北的实际情况,选取 1992、1999、2000、2001 及 2006 年为典型干旱年。

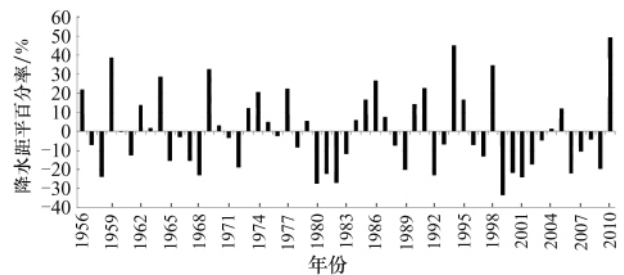


图 1 辽西北 55 年降水距平百分率

Fig. 1 Precipitation anomaly percentage of the northwest of Liaoning Province during last 55 years

根据研究区玉米生长资料可知,7 月是玉米生长的需水关键期,且从图 2 可以看出,各典型干旱年内(除 1992 年),7 月均符合干旱标准,趋势稳定、波动较小。因此研究选取各典型干旱年的 7 月作为典型干旱时段。

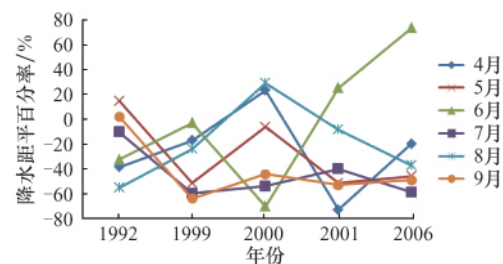


图 2 辽西北 5 个典型干旱年内 4—9 月降水距平百分率

Fig. 2 Precipitation anomaly percentage from April to September in five typical drought years in the northwest of Liaoning Province

### 4.3 玉米干旱风险时间变化特征

根据式(4),利用 1985—2006 年 7 月的  $NDVI$  计算出 5 个典型干旱年内典型干旱时段的  $MDRDI$ ,利用已处理过的 1992、1999、2000、2001 及 2006 年的土地利用/覆盖类型栅格数据与辽西北  $MDRDI$  数据叠加、裁剪,得到辽西北范围内玉米的  $MDRDI$ ,利用 K 均值聚类算法将玉米干旱风险分为 3 类:低风险、中等风险、高风险。

图 3(a)为各市 7 月降水距平百分率,除 1992 年的 4 个市(阜新、铁岭、沈阳、锦州)以及 2001 年的朝阳市,其余时段各市降水距平百分率均符合  $P \leq -25\%$  的特征,属于典型干旱时段。图 4 为 1985—2006 年这 22 年间,各市典型干旱年内典型干旱时段的玉米干旱风险诊断指数均值,表明了年际间各市的受灾趋势,分析发现,6 市年际间受灾趋势基本一

致,其中在 2000 年各市均有一低谷,表明在该典型干旱年内的典型干旱时段,玉米干旱风险最高。由气象资料和统计资料可知,2000 年,辽宁省遭受了极为严重的干旱,尤其是辽西北地区,年降水量仅为 445mm,其中彰武、阜新、朝阳、建平、黑山等县市降雨量不足 400mm,对比 6 个市 2000 年的单产数据,均比上年减少 25%以上,其中减产最多的为阜新和朝阳,与上年相比分别减少 73%和 60%,与图 3 降水距平百分率表征的气象干旱程度以及图 4 中 MDRDI 表征的干旱风险趋势基本一致。由于孕灾环境、植被对土壤湿度反应的“滞后性”以及地方防旱抗旱能力的不同,各地区玉米干旱风险不能完全与该地区的降水距平百分率成反比,但大致相符。表明典型干旱时段的降水距平百分率越大,玉米干旱风险越低;反之降水距平百分率越小,玉米干旱风险就越高。如图 3、图 4 所示,1999、2000、2001 年的 7 月属于严重干旱时段,但 1999 年和 2001 年 6—7 月的降水距平百分率相对于 7 月的较高,表明这两年里 6 月份的降雨量较充足,所以 1999 年和 2001 年 7 月的 MDRDI 值都较高,玉米干旱风险较低。6 市在 2006 年 7 月的降水距平百分率均低于-40%,部分地区远小于-50%,属于重度气象干旱时段,而玉米在此时段属于低风险,这主要是由于 6 月份的降雨量充足,较好地地为土壤补充了水分,因此在干旱的 7 月玉米为低干旱风险。另外,由辽宁省统计资料可知,在经过 1999、2000、2001 年 3 年连旱后,各市都加大了对防旱抗旱的投入以及灌溉面积,这也是 1999、2000、2001 及 2006 年典型干旱时段气象干旱指数基本相近的情况下,2006 年 7 月的干旱风险与其他干旱年 7 月的相比较小的另一重要原因。

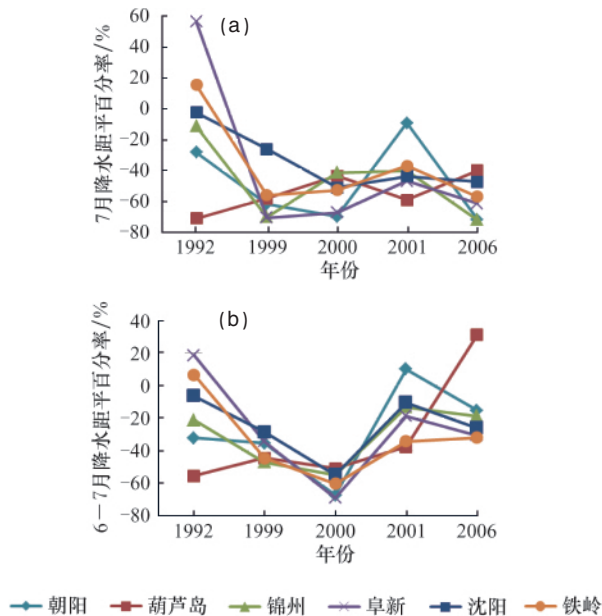


图 3 辽西北各市典型干旱年 7 月和 6—7 月的降水距平百分率

Fig. 3 Precipitation anomaly percentage in different cities in the northwest of Liaoning Province

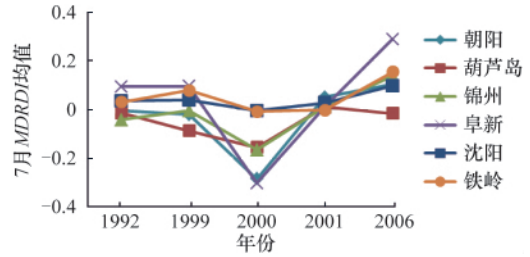
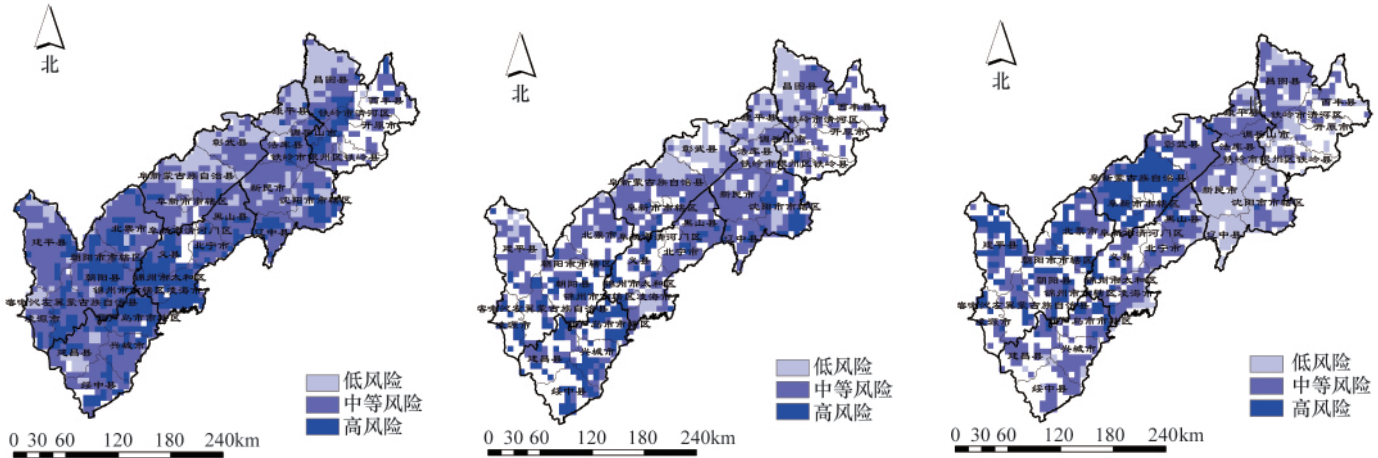


图 4 辽西北各市 5 个典型干旱年内典型干旱时段的 MDRDI 均值变化

Fig. 4 Average value changes of MDRDI during drought period in different cities of Liaoning Province

#### 4.4 玉米干旱风险空间分布规律

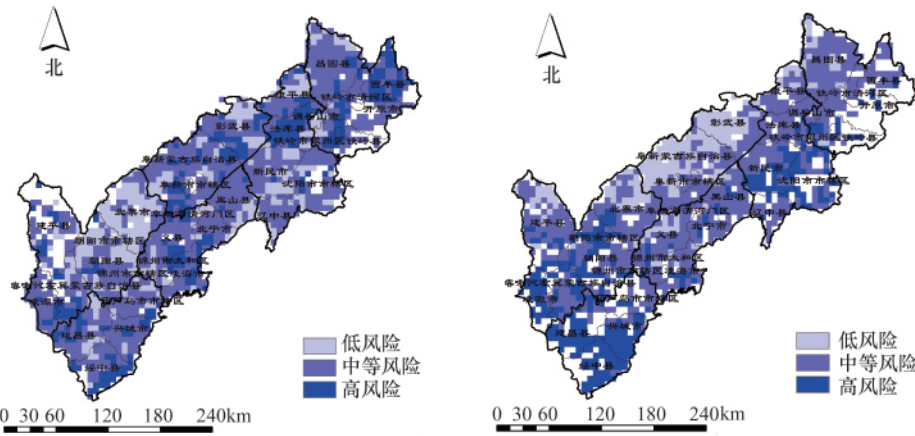
将 5 个典型干旱年内典型干旱时段的玉米干旱风险等级图(图 5)与风险等级在不同地区的分布图(图 6)进行对比分析,不同典型干旱时段各地区的玉米干旱风险分布差异较大,但整体上有一定规律性。在 1992、1999 年的 7 月,阜新、沈阳、铁岭玉米干旱风险南北差异较大,北部干旱风险较低,相反南边较重,分别约占其玉米总面积的 3%、18%、20%和 4%、13%、3%。朝阳、葫芦岛及锦州风险较高,这 3 个地区高风险面积分别占辽西北高风险区域总面积的 75%和 80%;2000 年,干旱风险趋势发生改变,阜新风险最高且变化明显,62%的玉米属于高风险,38%的为中等风险,而在 1992、1999 年的干旱时段,该地区没有高风险区域;其次,变化较为明显的是沈阳和铁岭,这两个地区均是南部为低风险,北部属于中等风险,且比例各占一半。在 2001、2006 年的两个干旱时段,干旱风险再次体现南北差异,整个辽西北区域内沿东西方向呈现北部低风险,南部高风险的趋势。这种趋势在 2006 年的 7 月更为明显。阜新、朝阳变化最大,风险呈变小趋势,其中阜新 57%左右的地区属于低风险,并集中分布于北部和西部,而属于高风险的玉米面积未占到玉米总面积的 1%;其次变化较大的是葫芦岛,中等风险面积减小,高风险区域增多,除市区内的玉米种植区属于中等风险外,绥中、兴城和建昌均为高风险;朝阳接近 60%的地区属于中等风险,北票市的北部以及建平县的北部为低风险;沈阳中部与铁岭南部均有超过 20%的玉米处于高风险,但大部分玉米种植区仍属于中等风险。锦州约有 77%的地区为中等风险,低风险分布在义县的西北部。纬度、海拔高度以及防旱抗旱能力是造成这种南北差异明显的原因。研究证明<sup>[25-26]</sup>,在山地丘陵地区,纬度与海拔高度的任一升高,都能造成玉米产量的增加。海拔每升高 100m,年平均气温约下降 0.56℃,雨量和相对湿度在一定的程度上则随海拔升高而增加。同样,纬度与气温也有直接关系,温度随着纬度的升高而降低,因此在高海拔或高纬度地区,干旱发生的可能性以及造成的损失也就愈小。防旱抗旱能力是造成南北差异更为重要的原因。由图 3 可知,经历了 1992、1999 年的干旱之后,玉米干旱风险由北轻南重变为南轻北重,这种演变趋势主要是由于当年受旱重的地区政府



(a) 1992年7月  
(a) July, 1992

(b) 1999年7月  
(b) July, 1999

(c) 2000年7月  
(c) July, 2000



(d) 2001年7月  
(d) July, 2001

(e) 2006年7月  
(e) July, 2006

图5 辽西北典型干旱年内典型干旱时段玉米干旱风险等级图

Fig. 5 Grade maps of corn drought risk in study areas during drought years

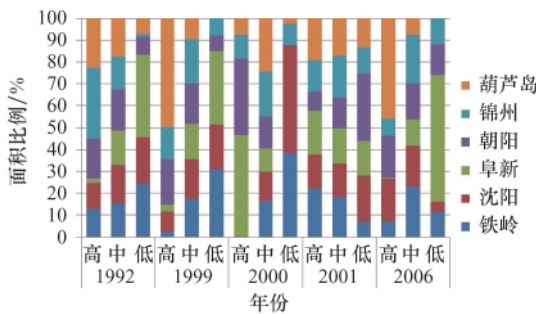


图6 辽西北典型干旱年内典型干旱时段玉米干旱风险等级不同地区分布

Fig. 6 Grade chart of corn drought risk during drought period in the different cities of Liaoning Province

和田间管理者加大了本区域的防旱抗旱能力,使得下一个干旱时段与北部相比,风险变低。

### 5 结论

通过以上分析研究,可以得到如下结论。

(1) 通过引入遥感数据,丰富了原先单一且分布不均的数据源。通过降雨数据提取气象干旱时段,结合典型干旱时段的遥感数据,解决了传统干旱风险研究中数据点代面的不均匀性,提高了研究精度。

(2) 辽西北玉米干旱风险空间分布特征具有一定规律性,沿东西走向南北差异较为明显,阜新、沈阳以及铁岭最为突出。

(3) 分析发现,降水越少气象干旱越严重,但不代表玉米干旱风险越高。这主要是因为作物的生长需水主要依赖于土壤水分,因此干旱年6月份的降水量是否充沛决定了干旱时段玉米干旱风险的高低。

但是,研究中还存在一些不足的地方,主要表现如下:

(1) 研究采用的是8km的GIMMS数据集,具有较低的空间

分辨率; (2) 典型干旱时段以月为单位, 没有对玉米的生长期进行划分, 因此时间尺度相对较粗。作者会在今后的研究中对以上不足加以完善。

### 参考文献 (References)

- [1] 董秋婷, 李茂松, 刘江, 等. 近 50 年东北地区春玉米干旱的时空演变特征[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 52-59.  
Dong Qiuting, Li Maosong, Liu Jiang, et al. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(4): 52-59.
- [2] Zhang J Q. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 102(2): 133-153.
- [3] 薛积彬, 钟巍, 赵引娟, 等. 历史时期广东省旱涝时空分布特征的初步研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 461-466.  
Xue Jibin, Zhong Wei, Zhao Yinjuan, et al. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(4): 461-466.
- [4] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions[J]. *Water International*, 1985, 10(3): 15-34.
- [5] Wu H, Wilhite D A. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA[J]. *Natural Hazards*, 2004, 33(1): 1-21.
- [6] 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 Xiaoque, Sun Xiubang. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(4): 472-476.
- [7] Yamoah C F, Walters D T, Shapiro C A, et al. Standardized precipitation index and nitrogen rate effects on crop yields and risk distribution in maize[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 80(1-2): 113-120.
- [8] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A. Monitoring drought using the Standardized Precipitation Index [M]// Wilhite D A. Drought: A Global Assessment. London: Routledge, 2000: 168-180.
- [9] 陈云浩, 李晓兵, 陈晋, 等. 1983—1992 中国陆地植被 NDVI 演变特征的变化矢量分析[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 12-19.  
Chen Yunhao, Li Xiaobin, Chen Jin, et al. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(1): 12-19.
- [10] 张树文, 张养贞, 李颖, 等. 东北地区土地利用/覆被时空特征分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
Zhang Shuwen, Zhang Yangzhen, Li Ying, et al. Spatial and temporal analysis of LUCC in the northeast of China [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [11] 张景, 姚凤梅, 徐永明, 等. 基于 MODIS 的土地覆盖遥感分类特征的评价与比较[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 248-253.  
Zhang Jing, Yao Fengmei, Xu Yongming, et al. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 248-253.
- [12] Wang Z M, Zhang B, Song K S, et al. Land use changes in northeast China driven by human activities and climatic variation [J]. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(3): 225-230.
- [13] 杨光华, 包安明, 陈曦, 等. 1998—2007 年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 436-444.  
Yang Guanghua, Bao Anming, Chen Xi, et al. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 436-444.
- [14] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 中国东北地区植被 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2009, 28(6): 1041-1048.  
Wang Zongming, Guo Zhixing, Song Kaishan, et al. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6): 1041-1048.
- [15] 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431.  
Ma Mingguo, Wang Jian, Wang Xuemei. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3): 421-431.
- [16] 毛德华, 王宗明, 宋开山, 等. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 283-292.  
Mao Dehua, Wang Zongming, Song Kaishan, et al. *China Environmental Science*, 2011, 31(2): 283-292.
- [17] Bayarjargal Y, Kamieli A, Bayasgalan M, et al. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(1): 9-22.
- [18] Bajgiran P R, Darvishsefat A A, Khalili A, et al. Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the northwest of Iran[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6): 1086-1096.
- [19] Ji L, Peters A J. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 85-98.
- [20] 王翠玲. 辽西北地区玉米干旱灾害动态风险评估研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.  
Wang Cuiling. A study on dynamic risk assessment of maize drought disaster in northwestern Liaoning province [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
- [21] 闫峰, 王艳姣, 吴波. 近 50 年河北省干旱时空分布特征[J]. 地理研究, 2010, 29(3): 423-429.  
Yan Feng, Wang Yanjiao, Wu Bo. *Geographical Research*, 2010, 29(3): 423-429.
- [22] 樊任华, 刘成林. 基于 SPI 的江西夏季干旱时空特征分析 [J]. 江西水利科技, 2008, 34(4): 240-243.  
Fan Renhua, Liu Chenglin. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2008, 34(4): 240-243.
- [23] 陈乾. 用植被指数监测干旱并估计冬麦产量 [J]. 遥感技术与应用, 1994, 9(3): 12-18.  
Chen Qian. *Remote Sensing Technology and Application*, 1994, 9(3): 12-18.
- [24] 马宗晋, 张业成, 高庆华, 等. 灾害学导论[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 1998, 96-98.  
Ma Zongjin, Zhang Yecheng, Gao Qinghua, et al. Disaster science [M]. Changsha: Hunan People's Publishing, 1998, 96-98.
- [25] 张兴瑞, 霍仕平, 李求文, 等. 海拔高度对武陵山区玉米品种生育期和产量的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(3): 99-101, 106.  
Zhang Xingrui, Huo Shiping, Li Qiuwen, et al. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(3): 99-101, 106.
- [26] 霍仕平, 许明陆, 晏庆九. 纬度和海拔对西南地区中熟玉米品种灌浆期和粒重及株高的效应[J]. 中国农业气象, 1997, 18(4): 24-28.  
Huo Shiping, Xu Minglu, Yan Qingjiu. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1997, 18(4): 24-28.

(责任编辑 马骁骁)

### 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文, 要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性, 同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰, 并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。