

中国北方春玉米干旱灾害风险评估

王有恒¹, 张存杰², 段居琦², 王 胜³

(1. 西北区域气候中心, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;
3. 安徽省气候中心, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 开展农业干旱灾害风险评估是实施干旱灾害风险管理、减轻旱灾损失和影响的必要途径, 如何揭示成险因子变化及其相互作用是开展风险评估的关键。本文以中国北方春玉米为研究对象, 利用我国北方各地春玉米产量和气象数据, 以及地形、土地利用和土壤有效灌溉面积等数据, 基于自然灾害风险评估原理, 构建北方春玉米干旱灾害危险性指数, 在地理信息系统(GIS)平台下结合春玉米种植的暴露度和其他影响抗灾能力因子对中国北方春玉米干旱灾害进行风险评估区划。结果表明, 春玉米干旱较高或高风险地区主要位于内蒙古中部、宁夏、甘肃、辽宁西部和新疆部分地区, 风险指标值在 0.73 以上; 春玉米干旱较低或低风险地区主要位于黑龙江西南部、吉林中部、辽宁北部、河北南部和陕西中部等地区, 风险指标值在 0.72 以下。该研究有助于深化认识风险评估中成险因子相互作用, 研究结果对指导北方春玉米干旱灾害风险管理具有科学意义。

关键词: 中国北方; 春玉米; 灾损; 干旱灾害; 风险评估
中图分类号: S165 **文献标志码:** A

Risk assessment of spring maize drought disaster in Northern China

WANG You-heng¹, ZHANG Cun-jie², DUAN Ju-qi², WANG Sheng³

(1. Northwest Regional Climate Center, Lanzhou, Gansu 730020, China;
2. National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China;
3. Anhui Climate Center, Anhui Meteorological Bureau, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Drought risk assessment is the necessary way to implement drought risk management and reduce the losses and impacts of drought disaster. Moreover, the key problem of drought risk assessment is how to reveal the characteristics of risk factors and their interactions among each other. This article assessed and zoned drought risk for spring maize cultivated in the Northern China, using the data of yield of spring maize, meteorological data, terrain data, land use data and other relevant data. Based on natural disaster risk theory, the assessing indices and models of drought risk were established. According to the exposure degree of hazard-bearing bodies and capability of disaster prevention, the regional division of drought hazard risk was conducted based on GIS. The results showed that the areas with high and sub-high drought risk included central Inner Mongolia, Ningxia, Gansu, western of Liaoning and part of Xinjiang, with the value of above 0.73. The lower risk area was distributed in the southwestern of Heilongjiang, central Jilin, northern of Liaoning, south of Hebei and central Shanxi, with the value of below 0.72. This study is helpful to recognize the relationships among the factors of risk and provide science gist to develop risk management of drought disaster of spring maize in Northern China.

Keywords: Northern China; spring maize; yield reduction rates; drought disaster; risk assessment

干旱灾害是世界上危害最为严重的自然灾害之一, 其出现的次数、持续的时间、影响的范围、造成的损失, 居各种气象灾害之首, 是造成农业损失最大的气象灾害^[1-3]。随着全球变暖, 近年来干旱灾害发生更加频繁, 对农业造成的影响更加严重, 我国主要作物生产地面临干旱灾害的风险也呈加大趋势^[4]。开展干旱灾害风险评估是实施干旱灾害有效管理、减轻旱灾损失和影响的必要途径。以气象灾害

收稿日期: 2016-09-18 修回日期: 2016-11-30
基金项目: 公益性行业(气象)科研专项重大项目(GYHY201506001); 公益性行业(气象)科研专项重点项目(GYHY201506019); 国家重点基础研究发展计划(2012CB955301)
作者简介: 王有恒(1984—), 男, 青海贵德人, 高级工程师, 主要从事气候变化与风险评估研究。E-mail: lz_wyh@163.com。
通信作者: 张存杰(1966—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 研究员, 主要从事干旱监测、预警与干旱气候变化研究。E-mail: zhangcj@cma.gov.cn。

风险管理理论为基础,农业干旱风险评估重点是分析干旱致灾因子的发生程度、概率、范围以及承灾体的暴露性、脆弱性及抗灾能力,通过致灾因子对承灾体影响的分析,构建干旱风险指数,进而分析区域干旱风险^[5-7]。姚玉璧等^[8]结合致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性、承载体暴露度等指标评估石羊河流域干旱风险;刘荣花等^[9]结合冬小麦减产率、发生概率及产量变异系数等因子进行华北平原冬小麦干旱产量灾损风险评估;张存杰等^[10]基于干旱灾害对冬小麦产量的影响,构建了我国北方冬麦区干旱灾害风险评估模型;相关研究推进了农业干旱风险评估工作,但在受气候变化影响中国农业干旱损失率呈空间差异化特征^[12]、成险因子相互作用复杂的背景下,从气象干旱角度出发构建反映干旱发展累积过程的指数,定量揭示成险过程因子相互作用并进行风险评估的研究还较少。

我国是世界玉米生产大国,春玉米种植面积约占全国玉米种植面积的 36%,产量占全国玉米产量的 40%,在我国玉米产业中占据重要地位^[13],而干旱是造成春玉米产量不高不稳的主要原因^[14]。针对玉米干旱灾害风险评估和区划国内已有大量研究,如王春乙、杨平、薛昌颖、贾建英等基于自然灾害

风险评估原理,结合 GIS 技术对东北、黄淮海和西南地区玉米干旱灾害进行风险性评估与区划^[15-18]。本文以灾害风险评估理论为依据,基于我国北方春玉米种植区干旱致灾因子及其灾损脆弱性分析,定量确定干旱造成损失的致灾阈值及干旱危险性指数,并应用于春玉米种植区干旱灾害造成的春玉米减产风险区划和评价,从而为在气候变化背景下科学制订北方春玉米防灾减灾的措施,进行干旱灾害风险管理提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域

我国春玉米种植区主要集中在东北和华北平原地区,西北也有少量分布,因此根据中国玉米种植分布图,文中将春玉米种植区分为北方春玉米种植区和西北内陆春玉米种植区。春玉米种植区内除沙漠、戈壁、草原及高海拔地区不适宜种植春玉米外,大部分地区地势、气候均适宜春玉米生长(图 1)。由于春玉米种植区横跨我国东西大部,不同地区生育期存在一定差别。北方春玉米区 4 月下旬播种至 9 月中旬成熟,全生育期约 140 d;西北内陆玉米区 4 月中旬播种至 9 月上旬成熟,全生育期约 150 d。

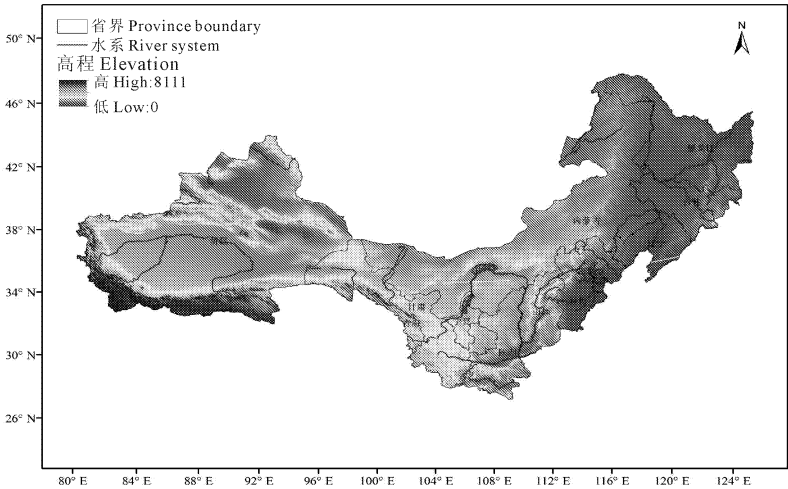


图 1 北方春玉米种植区分布图

Fig.1 Spatial distribution of spring maize growing areas in Northern China

1.2 资料来源

根据干旱灾害风险系统的构成和研究目的,选用的主要数据有:(1) 空间数据包括数字高程模型(DEM)数据、土地利用数据,其中,1:25 万 DEM 数据来源于 CGIAR - CSI SRTM 数据共享平台(<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>);1:10 万土地利用数据来源于国家气候中心;(2) 产量数据选取我国春玉米种植区 1960—2012 年 155 个市县

春玉米产量资料,来源于中国种植业数据库(<http://zzys.agri.gov.cn/moazzys/nongqing.aspx>);(3) 气象数据选取我国春玉米区 1960—2012 年 884 个气象站(已通过质量控制,剔除了年份较短及资料不完整的站点)气候要素以及部分农气站春玉米生育期资料,其中气候要素包括降水量、气温(平均、最高及最低)、日照时数、水汽压、相对湿度、平均风速,该资料来源于中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.>

gov.cn/home.do)。

1.3 数据处理

1.3.1 北方春玉米干旱指数构建 本研究选用标准化降水指数(SPI)作为表征春玉米区干旱灾害的指标,参照国标《气象干旱等级》(GB/T 20481 – 2006),以 $SPI \leq -0.5$ 作为 1 个干旱日,计算常年(1981—2010 年)北方春玉米生育期内干旱日数,进而与生育期日数相比,计算干旱频率。

干旱频率 = $\frac{\text{生育期内干旱日数}}{\text{生育期日数}} \times 100\%$ (1)

春玉米不同发育阶段对水分敏感程度存在差异。水分敏感系数反映了作物对缺水的敏感程度,其值越大越敏感,根据文献[19 – 20]研究成果确定春玉米水分敏感系数(表 1)。

表 1 不同生育期春玉米水分敏感系数
Table 1 Sensitive coefficient of spring maize to water forcing in growth stages

生育期 Growth stage	出苗期 Seeding	拔节期 Jointing	抽雄期 Tasseling	成熟期 Mature
λ	0.1899	0.2751	0.3211	0.1856

根据上述计算分析,北方春玉米全生育期干旱累积指数构建如下:

全生育期干旱累积指数 = $\sum$ 各生育期气象干旱频率 $\times$ 水分敏感系数

1.3.2 干旱灾害危险性指标构建 致灾因子与承灾体脆弱性相互作用决定了干旱致灾阈值,在此基础上可分析干旱发生频率,进而构建干旱灾害危险性指标。作物因灾减产率可用来衡量脆弱性的高低。利用 5 年滑动平均计算春玉米气候产量,在此基础上,计算历年各市县春玉米减产率。其计算公式如下:

$Y = Y_c + Y_t + \epsilon$ (2)

$R = \frac{Y_c}{Y_t} \times 100\%$ (3)

式中, Y 为作物实际产量; Y_c 为气候产量; Y_t 为 5 a 滑动趋势产量; ϵ 是受随机因素影响的产量分量(常忽略); R 为春玉米减产率。参考文献[9,21] 研究成果和数据分布情况以及我国春玉米实际减产情况,相对减产率($\%$) $\leq 10\%$ 的年份为轻度减产年;减产率在 $10\% \sim 25\%$ 之间为中度减产年,在 $25\% \sim 40\%$ 之间为重度减产年,大于 40% 为严重减产年。

根据春玉米干旱指数与减产率的相关程度,分别挑选出两种植区的 10 个典型干旱年。利用典型干旱年份的春玉米减产率与干旱指数进行线性回归分析,模拟春玉米减产率与干旱指数的定量关系,确

定不同等级干旱阈值。统计分析全生育期内不同等级干旱发生频率。由于不同等级干旱对玉米生产影响程度不同,对轻、中、重、特旱不同等级干旱出现频率赋予不同权重,进而计算北方春玉米干旱灾害危险性指标。计算方法如下:

干旱危险性指数(I_D) = 轻旱频率 $\times \frac{1}{10}$ + 中旱频率 $\times \frac{2}{10}$ + 重旱频率 $\times \frac{3}{10}$ + 特旱频率 $\times \frac{4}{10}$ (4)

1.3.3 干旱灾害风险评估 农作物干旱灾害风险由干旱致灾因子、承灾体脆弱性、暴露度及抗灾能力共同决定^[22–23]。干旱危险性指标是致灾因子和脆弱性相互作用的结果;在以行政区域为研究单元时,农作物承灾体暴露度常用作物种植面积表达,以反映作物暴露于灾害的程度,本研究在格点尺度上以玉米潜在种植来表达暴露度;作物的生长环境和人为措施都影响抗灾能力,就北方春玉米来说,影响干旱抗灾能力的环境和人为因素有气候干燥度、土壤有效持水量和灌溉保障情况。由此农作物全生育期干旱灾害风险评估模型计算公式如下^[10]:

$R = I_D \times E \times K \times S_m \times I_m$ (5)

式中, R 为全生育期干旱综合风险指数; I_D 为表达致灾因子与承灾体脆弱性(灾损)相互作用的干旱危险性指数; E 为暴露性指数; K 为气候干燥度; S_m 为土壤有效持水量; I_m 为有效灌溉面积。

由于各指标间的量纲和数量级都是不同的,为了消除这种差异,需要对每个指标做规范化处理^[24]。对于与干旱风险呈正相关的影响因子(如气候干燥度 K),归一化方法如下:

$D_{ij} = 0.5 + 0.5 \times \frac{A_{ij} - A_{\min i}}{A_{\max i} - A_{\min i}}$ (6)

式中, D_{ij} 为 j 区第 i 个指标的规范化值; A_{ij} 为 j 区第 i 个指标值; $A_{\min i}$ 和 $A_{\max i}$ 为第 i 个指标值中的最小值和最大值。

由于土壤有效持水量越高、灌溉越完善,抵御干旱能力越强,相应的灾害风险越小,因此对土壤有效持水量、有效灌溉指标进行归一化的方法与其他正相关要素不同,计算公式为:

$D_{ij} = 1.0 - 0.5 \times \frac{A_{ij} - A_{\min i}}{A_{\max i} - A_{\min i}}$ (7)

2 结果分析

2.1 气象干旱特征

基于 SPI 指数,分别计算 1981—2010 年春玉米全生育期干旱日数及干旱发生频率,结果显示干旱日数及发生频率空间分布不均,新疆天山地区、东北东部地区干旱频率最低,甘肃北部、黄土高原、内蒙

西北部及东北中北部干旱频率较高(30%以上)(图2)。此外,新疆南部地区干旱日数及发生频率较低,这主要是由于在插值过程中此处气象站点较少,且

受天山地区和塔克拉玛干沙漠周边绿洲气象站点的影响造成的。

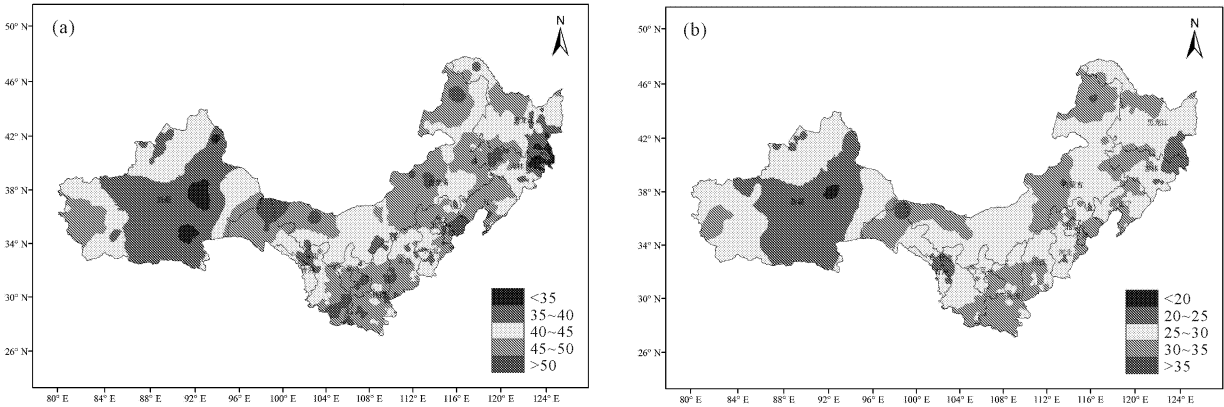
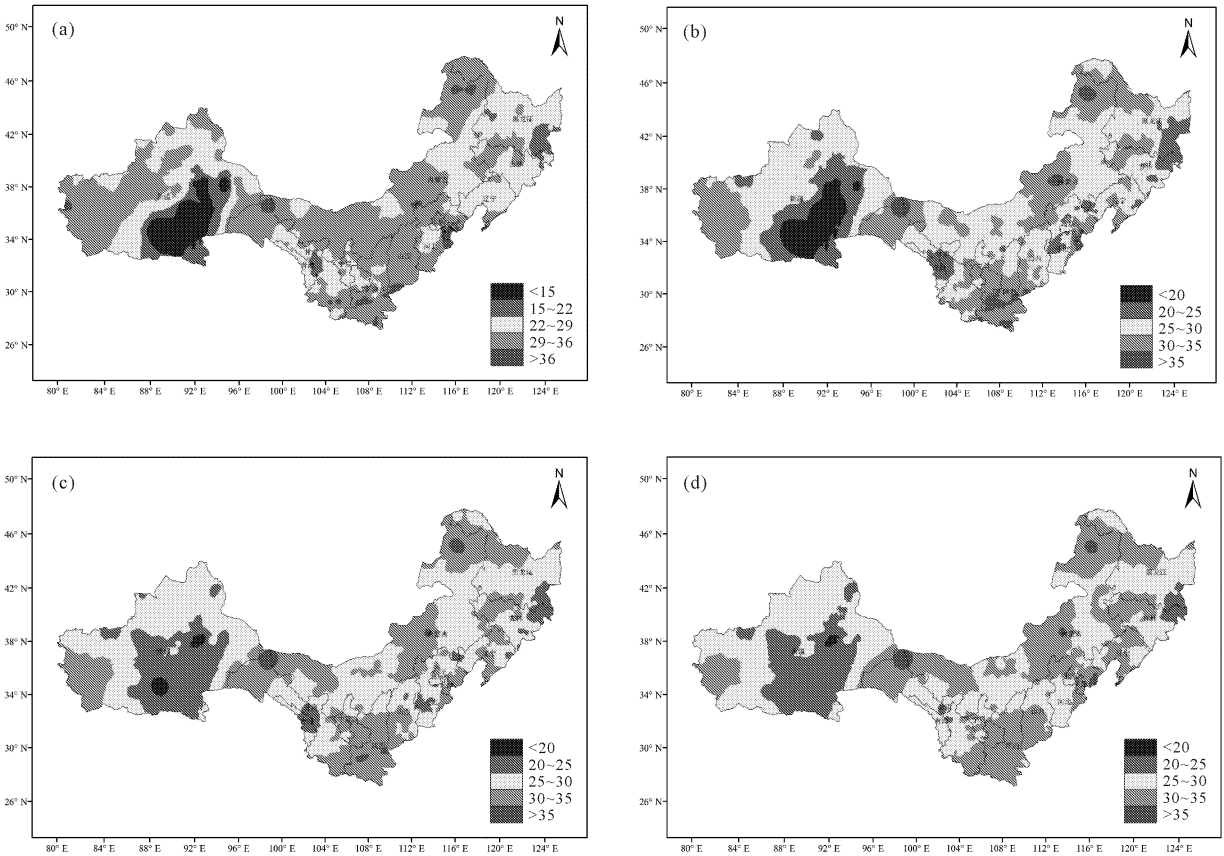


图 2 春玉米全生育期干旱日数(a,单位:d)和干旱频率(b,单位:%)
Fig.2 Spatial distributions of drought days(a, Unit:d) and frequencies(b, Unit:%)
during growth of spring maize period based on SPI

从春玉米各生育期干旱频率分布图来看,出苗期除新疆东南部 and 东北东部部分地区干旱频率较低外,其余地方干旱频率均较高(29%以上)。拔节至

成熟期,干旱频率高值区分布基本一致,主要分布在甘肃北部和东部、黄土高原、内蒙大部和东北中北部(30%以上)(图3)。



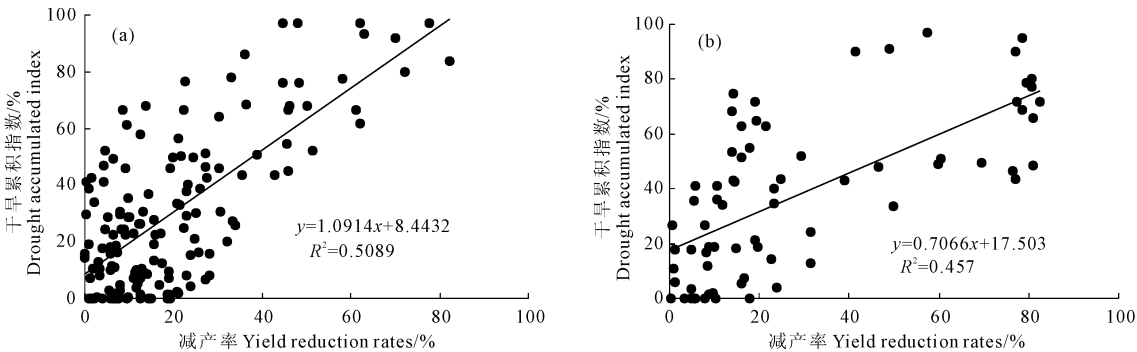
a.播种 – 出苗期 Sowing-seedling stage; b.拔节期 Jointing stage; c.抽雄期 Tasseling stage; d.成熟期 Mature stage
图 3 春玉米各生育期干旱发生频率(单位:%)

Fig.3 Spatial distributions of spring maize drought frequencies in different growth period(Unit: %)

2.2 干旱致灾阈值及危险性指数

2.2.1 干旱致灾阈值 利用 155 个市县产量资料,根据 SPI 干旱指数与减产率的相关程度,分别挑选

出两种植区的 10 个典型干旱年,并分析春玉米减产率与干旱累积指数之间的定量关系(图 4)。



a. 北方种植区 North; b. 西北内陆种植区 Northwest inland

图 4 春玉米生育期典型干旱年减产率与干旱累积指数散点图

Fig.4 Scatter diagram of drought accumulated index and the yield reduction rates of spring maize in typical drought years

根据图 4,北方春玉米种植区春玉米干旱累积指数和减产率相关系数为 0.71($P=0.001$),西北内陆春玉米种植区干旱累积指数和减产量相关系数为 0.68($P=0.001$),两种植区春玉米减产率与干旱累积指数的回归模型:

$$y = 1.0914x + 8.4432 \tag{8}$$

$$y = 0.7066x + 17.503 \tag{9}$$

式中, x 为春玉米减产率(%); y 为 SPI 干旱指数计算得到的干旱累积指数,式(8)为北方春玉米种植区,式(9)为西北内陆玉米种植区。根据春玉米减产率与干旱累积指数的线性关系,利用春玉米减产率确定不同干旱等级阈值 Y (表 2)。

表 2 北方春玉米全生育期减产率对应干旱累积指数阈值

Table 2 Thresholds of drought risk index corresponding to yield reduction rate of spring maize in Northern China

强度指标 Strength index	轻度 Light	中度 Moderate	重度 Heavy	特重 Worst
减产率 x_m /% Yield reduction rates	$x < 10$	$10 \leq x < 25$	$25 \leq x < 40$	$x \geq 40$
指标阈值(北方) Threshold(North)	$y < 19.4$	$19.4 \leq y < 35.7$	$35.7 \leq y < 52.1$	$y \geq 52.1$
指标阈值(西北) Threshold(Northwest)	$y < 25.2$	$25.2 \leq y < 35.2$	$35.2 \leq y < 45.8$	$y \geq 45.8$

2.2.2 干旱危险性指数 基于确定的干旱灾害风险阈值,对每个台站求出春玉米各强度干旱的总次数,除以该站的观测年数得到干旱频次,结果如图 5。轻旱和特旱频率呈西高东低的特征,新疆、甘肃、宁夏三省区的大部分地区轻旱频率在 50% 以上,东北大部及内蒙古、陕西、山西、河北北部等大部分地区轻旱频率在 50% 以下;新疆大部、甘肃北部和南部、宁夏、内蒙古中部等地干旱频率在 25% 以上。中旱和重旱频率呈现东高西低的特征,新疆、甘肃、宁夏等地中旱频率不足 15%,东北地区及山西、陕西、内蒙古等地中旱频率在 15% 以上,局部地区超过 25%;新疆、宁夏、甘肃南部、陕西中部等地大部重旱频率在 11% 以下,东北大部、山西、内蒙古及陕西大部、河北大部等地重旱频率超过 11%。

根据干旱危险性指数计算公式(4)计算北方春玉米生育期内干旱危险性空间分布,结果如图 6。

宁夏、内蒙古中部、新疆西部和北部、甘肃北部和南部及辽宁、吉林、黑龙江北部等地干旱危险性指数较高,山西、陕西及新疆东部等地干旱危险性指数较低。

2.3 暴露度及抗灾能力

暴露度是承灾体受到致灾因子不利影响的范围和数量。本研究提取中国土地利用/覆被类型中的耕地数据作为春玉米潜在种植区来描述暴露度。

环境条件及人为措施是影响抗灾能力的主要因素,结合北方春玉米生产实际,本研究主要从气候、土壤和灌溉措施方面考虑影响抗灾能力的因子。土壤有效持水量指土壤水中能被作物利用的水分数,其大小取决于作物根毛吸水力和土壤吸力的大小。春玉米区中东部土壤有效持水量较高,其中新疆塔克拉玛干沙漠边缘绿洲地区、东北北部、内蒙古东北部最高;西部土壤有效持水量普遍较低,其中新

疆南部(塔克拉玛干沙漠)、内蒙古西部最低(腾格里沙漠)(图 7a)。有效灌溉面积是指灌溉工程设施基本配套,有一定水源、土地较平整,一般年景下当年可进行正常灌溉的耕地面积,能反映抵御干旱的能

力。春玉米区灌溉区主要集中在华北东南部和东北部分地方,西部除新疆西北部外基本无有效灌溉用地(图 7b)。

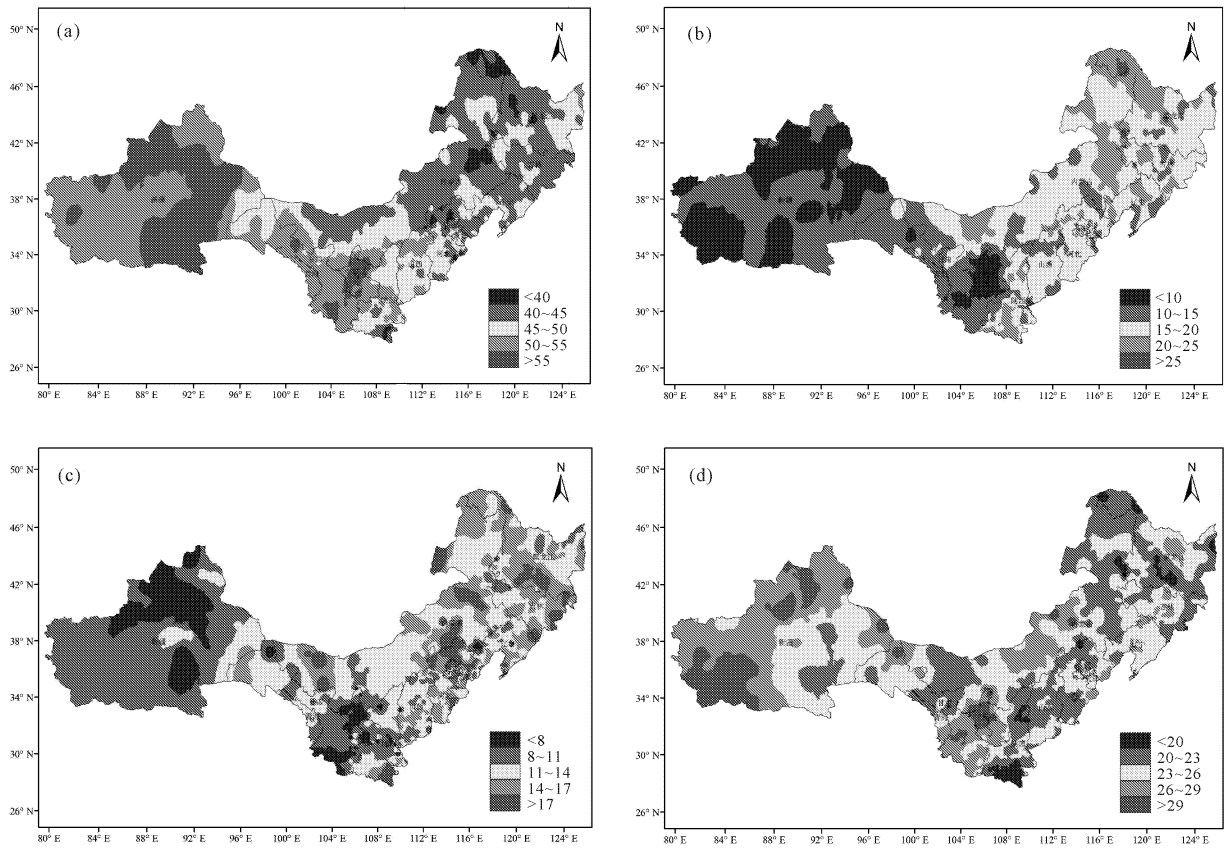


图 5 北方春玉米生长季不同等级干旱频率

Fig.5 Drought disaster frequency of different grades during spring maize growth season in Northern China

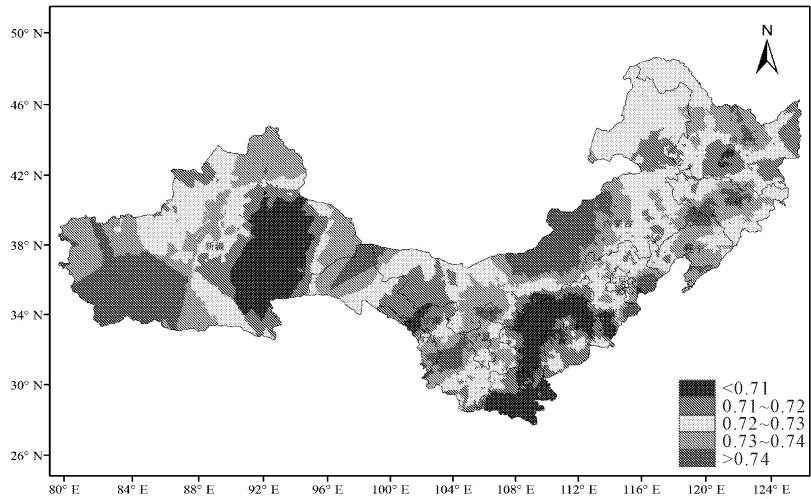


图 6 北方春玉米干旱危险性空间分布

Fig.6 Spatial distribution of spring maize drought risk in Northern China

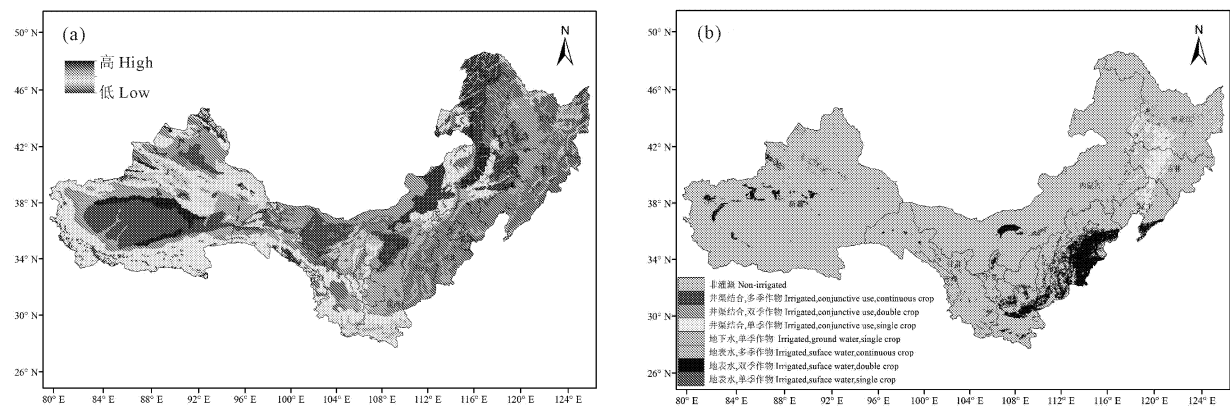


图 7 春玉米区土壤有效持水量(a)和土壤有效灌溉(b)
Fig.7 Soil available water – holding capacity(a) and effective irrigation area classification(b)
in spring maize growing areas of Northern China

2.4 干旱风险评估

基于干旱致灾因子和春玉米灾损脆弱性关系构建的干旱危险性指标,结合潜在种植区暴露度及影响抗灾能力的因子相互作用及其归一化处理,根据式(5)开展中国北方春玉米干旱灾害风险评估,空间分布结果如图 8。根据图 8,我国春玉米种植区干旱

灾害风险空间差异较大,干旱低风险区位于黑龙江西南部、吉林西部和辽宁中部,较低风险区位于河北南部、山西、陕西中部,中等风险区位于黑龙江北部、吉林东部、辽宁西部、河北北部、甘肃河东地区及新疆北部,较高和高风险区位于内蒙古中西部、宁夏、甘肃河西地区及新疆大部。

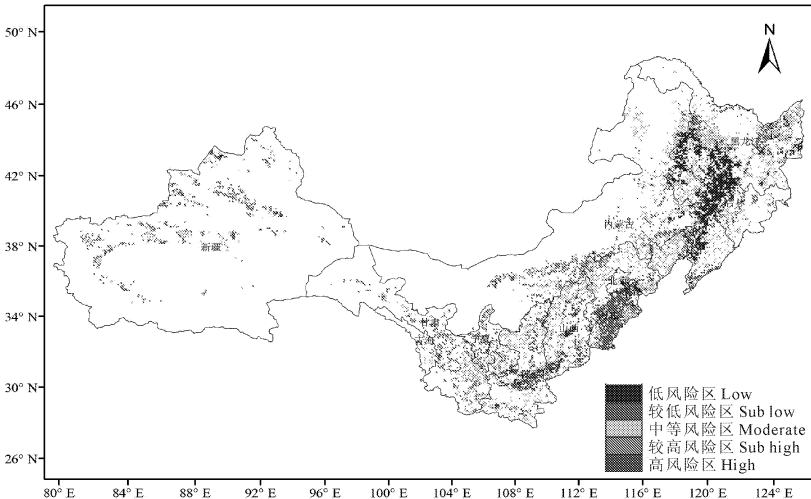


图 8 北方春玉米干旱灾害风险区划
Fig.8 Spatial distribution of spring maize drought disaster risk in Northern China

3 讨论与结论

3.1 干旱指数构建

干旱的发展是一个缓慢积累的过程,干旱常分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[25],在干旱研究中选择适宜的评价指标是诸多研究关注的重点问题之一^[26]。农业干旱研究中常用的评估指标有土壤墒情指标、作物水分亏缺指数、帕尔默干旱指数、叶水势、作物水分胁迫指数等^[15,27]。

但是,就作物干旱来讲,主要受土壤水势的影响^[28],干旱的发生是由于土壤水势低于作物根系水势,作物根系不能从土壤中吸收水分,反而根系内的水会倒流出去引起。因此,上述各种作物干旱指标都是围绕作物根系吸水这一作物生理现象所作的近似表达。气象干旱与其他干旱之间有着密切的联系,对其他干旱有着预警和指示作用^[25]。因此,本研究选用常用气象干旱指标 SPI,以干旱日数为单位进行累积计算^[29],并进一步考虑不同生育期作物水分敏

感性和不同强度干旱影响权重,构建春玉米干旱指数表达干旱的累积过程,具有较好的逻辑与科学基础。

3.2 干旱危险性评价

致灾因子危险性评价是灾害风险体系的重要组成部分^[30-31],但不同学科领域间对于相关概念术语的理解与表述差异仍较大。如在流行病学方面危险度是指导致不良结果的可能性,危险性评价是分析和评估暴露于环境的危害因子与健康和安全性的关系^[29]。在山地灾害危险度评价中,考虑了典型滑坡的诱发因素、滑坡内部条件、滑坡表面形态^[32]。在气象灾害危险性评价中,一些研究仅考虑致灾因子的作用^[33-35],而没有考虑其影响对象。实际上,由于承载体脆弱性不同,相同的致灾因子所造成的影响不同^[36],危险性评价需要在考虑致灾阈值的基础上进行诊断^[37]。因此,本研究在模拟北方春玉米干旱与灾损关系的基础上,揭示春玉米干旱致灾阈值,进而结合概率统计理论构建干旱危险性评价指标,为春玉米干旱风险评估提供科学依据。

3.3 风险评估与区划

本研究基于灾害风险评估的 4 要素理论,在定量考虑干旱致灾因子和春玉米灾损脆弱性相互作用,给出干旱危险性评价的基础上,结合春玉米种植的暴露度和其他影响抗灾能力的因子(主要为气候干燥度、土壤有效含水量和灌溉措施)相互作用,给出了中国北方春玉米干旱灾害风险评估区划图。在内蒙古中部、宁夏、甘肃及辽宁西部、新疆部分地区干旱灾害风险较高,可能受灌溉条件不足、干旱危险性高影响;在黑龙江西南部、吉林中部、辽宁北部、河北南部和陕西中部风险较低,可能与土壤保水性能强、灌溉条件好、干旱危险性指数偏低有关。

本研究尚存在一定的不足之处:一是假定研究时段土地利用类型和适应性管理措施不存在动态变化;二是没有考虑未来气候变化情景下的风险评估。

3.4 结论

- 1) 中国春玉米种植区,轻旱和特旱频率呈西高东低的特征,中旱和重旱频率呈东高西低的特征。
- 2) 中国春玉米种植区,内蒙古中部、宁夏、甘肃、辽宁西部和新疆部分地区干旱灾害风险较高,黑龙江西南部、吉林西部、辽宁中部和河北南部风险较低。

参 考 文 献:

[1] 陈 红,张丽娟,李文亮,等.黑龙江省农业干旱灾害风险评价与区划研究[J].中国农学通报,2010,26(3):245-248.
[2] 姚小英,张 强,王劲松,等.甘肃冬小麦主产区 40 年干旱变化

特征及影响风险评估[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):1-7.
[3] 杨小利,刘庚山,杨兴国.甘肃黄土高原主要农作物水分胁迫敏感性[J].干旱地区农业研究,2006,24(4):96-99.
[4] 张 琪,张继权,严登华,等.朝阳市玉米不同生育阶段干旱灾害风险预测[J].中国农业气象,2011,32(3):451-455.
[5] 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[J].自然灾害学报,2006,15(1):29-37.
[6] 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[J].农业工程学报,2012,28(8):186-194.
[7] 霍治国,李世奎,王素艳,等.主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究[J].自然资源学报,2013,18(6):692-703.
[8] 姚玉璧,李耀辉,石 界,等.基于 GIS 的石羊河流域干旱灾害风险评估与区划[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):21-28.
[9] 刘荣花,朱自玺,方文松,等.华北平原冬小麦干旱灾损风险区划[J].生态学杂志,2006,25(9):1068-1072.
[10] 张存杰,王 胜,宋艳玲,等.我国北方地区冬小麦干旱灾害风险评估[J].干旱气象,2014,32(6):883-893.
[11] 王素艳,霍治国,李世奎,等.北方冬小麦干旱灾损风险区划[J].作物学报,2005,31(3):267-274.
[12] 张 强,韩兰英,郝小翠,等.气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性[J].气象学报,2015,73(6):1092-1103.
[13] 何奇瑾,周广胜.我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性[J].生态学报,2012,32(12):3931-3939.
[14] 刘 帆,申双和,李永秀,等.不同生育期水分胁迫对玉米光合特性的影响[J].气象科学,2012,33(4):378-383.
[15] 王春乙,蔡菁菁,张继权.基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J].农业工程学报,2015,31(6):238-245.
[16] 杨 平,张丽娟,赵艳霞,等.黄淮海地区夏玉米干旱风险评估与区划[J].中国生态农业学报,2015,23(1):110-118.
[17] 薛昌颖,张 弘,刘荣花.黄淮海地区夏玉米生长季的干旱风险[J].应用生态学报,2016,27(5):1521-1529.
[18] 贾建英,贺 楠,韩兰英,等.基于自然灾害风险理论和 ArcGIS 的西南地区玉米干旱风险分析[J].农业工程学报,2015,31(4):152-159.
[19] 石 城.安徽省干旱灾害风险图研究[D].合肥:合肥工业大学,2013.
[20] 刘 聪,张旭晖.作物不同生长时段对水分胁迫敏感性分析[J].气象科学,1999,19(2):136-141.
[21] 张文宗,王 鑫,康西言,等.河北省玉米干旱风险评估及区划方法[J].华北农学报,2008,23(增刊):367-372.
[22] IPCC. 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
[23] 高晓容,王春乙,张继权,等.东北地区玉米主要气象灾害风险评估模型研究[J].中国农业科学,2014,47(21):4257-4268.
[24] 王 莹,王劲松,姚玉璧.甘肃省河东地区气象干旱灾害风险评估与区划[J].中国沙漠,2014,34(4):1115-1124.

展的影响[J].地理科学进展,2000,19(3):227-236.

[6] 郑冬晓,杨晓光. ENSO 对全球及中国农业气象灾害和粮食产量影响研究进展[J]. 气象与环境科学,2014,37(4):90-101.

[7] Ferris J N. An analysis of the impact of enso (el nino/southern oscillation) on global crop yields[J]. Staff Papers, 1999,81(5):1309.

[8] Yokoyama S. Historical occurrence of El Nino and its impact on food crop production at a regional level in Asia and the Pacific[J]. Radiology, 2006,240(2):369-379.

[9] Mauget S A, Upchurch D R. El Nino and La Nina related climate and agricultural impacts over the Great Plains and Midwest[J]. Journal of Production Agriculture, 1999,12(2):203-215.

[10] Hansen J W, Irmak A, Jones J W. El Nino-southern oscillation influences on florida crop yields[J]. Annual Proceedings Soil & Crop Science Society of Florida, 1998,57(85):12-16.

[11] Fulu Tao, Masayuki Yokozawa, Zhao Zhang, et al. Variability in climatology and agricultural production in China in association with the East Asian summer monsoon and El Niño Southern Oscillation[J]. Climate Research, 2004,28:23-30.

[12] Adams R M, Houston L L, McCarl B A, et al. The benefits to Mexican agriculture of an El Niño-southern oscillation (ENSO) early warning[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2003,115(3):183-194.

[13] 袁中友.厄尔尼诺/拉尼娜事件与广东省干旱关系探讨[D]. 广州:华南师范大学,2004.

[14] 丛晓明.近 40 a 青藏高原主要气象灾害对 ENSO 的响应[D]. 西宁:青海师范大学,2012.

[15] 曹 蓉.东北夏季降水的基本特征及其与大气环流和太平洋海温的关系[D].南京:南京信息工程大学,2014.

[16] 王敬方,吴国雄.持续性东北冷夏的变化规律及相关特征[J]. 大气科学,1997,21(5):523-532.

[17] 胡娜娜.东北三省旱涝时空演变及趋势判断[D].西安:陕西师范大学,2013:51-53.

[18] 李恩菊,赵景波.厄尔尼诺/拉尼娜事件对山东省气候的影响[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2010,38(3):80-84.

[19] 祁子云,赵景波.厄尔尼诺/拉尼娜事件对山西省北部地区气候的影响[J].水土保持通报,2012,32(4):97-101.

[20] 张鹏飞,赵景波.50 余年来厄尔尼诺 – 拉尼娜(El Nino/La Nina)事件对山西省气候影响分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):74-78.

[21] 高惠珍,安学军,刘亚萍.厄尔尼诺现象对山西省旱涝的影响分析[J].山西水利科技,1998,(4):13-15.

[22] 白小娟,赵景波.厄尔尼诺/拉尼娜事件对内蒙古自治区气候的影响[J].水土保持通报,2012,32(6):245-249.

[23] 张存杰,高学杰,赵红岩.全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J].冰川冻土,2003,25(2):157-164.

[24] 陈朝基.1950—2000 年甘肃农作物受旱面积与厄尔尼诺和拉尼娜的关系[J].安徽农业科学,2011,39(1):214-216.

[25] 雷治平.陕西农业干旱灾害评估及影响因子分析研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2005.

[26] 景毅刚. ENSO 现象和陕西省夏粮丰歉年景的关系[J].中国农业气象,2000,21(2):14-16.

[27] 程相坤,徐东进,曾国良.叶尔羌河流域农业干旱分析[J].气象科技,1997,(2):40-43.

[28] 白庆梅,田文寿,冯兆东,等.亚洲干旱/半干旱区降水与大洋暖池气候的相关特征研究[J].冰川冻土,2010,32(2):295-308.

[29] 徐小玲,延军平.近 30 年毛乌素沙区的气候与厄尔尼诺/拉尼娜事件的相关分析[J].干旱区研究,2003,20(2):117-122.

[30] 周双燕.重庆北碚柑橘旱情预警模型构建及应用[D].雅安:四川农业大学,2011.

(上接第 264 页)

[25] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等.气象、农业干旱指标综述[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):185-189.

[26] 王 胜,田 红,张存杰,等.安徽冬麦区 4 种干旱指数应用对比[J].气象科技,2015,43(2):295-301.

[27] 李柏贞,周广胜.干旱指标研究进展[J].生态学报,2014,34(5):1043-1052.

[28] 奚振邦,杨金楼,计仲孚,等.土壤有效水与化肥相互作用作用机理及其应用研究Ⅲ:不同土壤水势对甘蓝吸收土壤水分和养分的影响[J].植物营养与肥料学报,1996,2(1):32-38.

[29] 宋艳玲,蔡雯悦,柳艳菊,等.我国西南地区干旱变化及其对贵州水稻产量的影响[J].应用气象学报,2014,25(5):550-558.

[30] 杨若子,周广胜.东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性评估[J].气象学报,2015,73(6):1141-1153.

[31] 蔡菁菁,王春乙,张继权.东北地区玉米不同生长阶段干旱冷害危险性评价[J].气象学报,2013,71(5):976-986.

[32] 杨秋珍,许 明,李 军.对气象致灾因子危险度诊断方法的探讨[J].气象学报,2010,68(2):277-284.

[33] 樊晓一,乔建平,陈永波.层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J].自然灾害学报,2004,13(1):72-76.

[34] 武健伟,李锦荣,孙 涛,等.锡林郭勒地区沙尘暴气候致灾因子危险性评价[J].2011,28(6):936-943.

[35] 温华洋,田 红,唐为安,等.安徽省冰雹气候特征及其致灾因子危险性区划[J].中国农业气象,2013,34(1):88-93.

[36] 朱红蕊,于敏敏,姚俊英,等.黑龙江省水稻初霜冻灾害致灾因子危险性分析[J].灾害学,2012,27(2):96-99.

[37] Yin Yuanyuan, Zhang Xingming, Lin Degen, et al. GEPIC – V – R model: A GIS – based tool for regional crop drought risk assessment[J]. Agriculture Water Management, 2014,144:107-119.