

基于EPIC模型的黄淮海夏玉米旱灾风险评价

贾慧聪^{1,2}, 王静爱^{1,3,4}, 潘东华⁵, 曹春香²

1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;
2. 遥感科学国家重点实验室(中国科学院遥感应用研究所), 北京 100101;
3. 区域地理研究重点实验室(北京师范大学), 北京 100875;
4. 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学), 北京 100875;
5. 民政部国家减灾中心, 北京 100022)

摘要: 玉米是中国最主要的粮食作物之一,因其较高的需水量,受气候影响,极易遭受旱灾。因此,以黄淮海夏播玉米区为例,从风险的角度进行玉米旱灾评价,对于农业旱灾预警和保障国家粮食安全具有重要的现实和指导意义。在全面收集研究区气象、土壤、土地利用、农气观测等资料的基础上,基于农业旱灾风险评价的概念框架“致灾因子危险性H评价(Hazard)—承灾体脆弱性曲线Vc评价(Vulnerability Curve)—作物减产风险性R评价(Risk)”,引入基于物理过程的作物模型EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator),采用作物模型模拟和数字制图等技术,分别从全生育期和分生育期角度,对黄淮海夏播玉米区玉米旱灾风险的时空分布进行了定量评价。结果表明:在2、5、10和20年一遇致灾水平下,黄淮海夏播玉米区玉米旱灾减产风险总体呈现出从西北向东南方向递减的趋势,这主要由气候环境和下垫面的地形地貌条件所决定。20年一遇水平时,产量损失风险的高值区($R \geq 0.5$)集中分布在冀北高原山地和山东省中南部地区,占黄淮海夏播玉米区玉米总面积的7.63%。黄淮海夏播玉米区成灾风险较高的生育期:拔节期—抽雄期、抽雄期—乳熟期、乳熟期—成熟期应加强防范。研究可为高风险区和高风险时段的玉米旱灾风险防范提供理论依据和科技支撑。

关键词: 脆弱性曲线; 风险评价; 旱灾; 玉米产量; EPIC模型; 黄淮海夏播玉米区

粮食安全问题是国际社会永恒关注的焦点。玉米不仅是高产的粮食作物,还是优良的饲料作物,更是多种工业的重要原料。在我国,玉米是仅次于小麦的主要粮食作物,种植面积和总产量仅次于美国,居世界第二位^[1]。据统计,1952-2006年全国玉米年均播种面积占粮食播种面积的23.7%,平均单产是粮食单产的1.12倍,平均总产量占粮食总产量的26.4%^[2]。旱灾是世界上影响最广、造成农业经济损失最大的自然灾害之一^[3]。农业旱灾的直接承灾体是农作物,作为三大粮食作物之一的玉米,干旱是制约其生长发育的主要因素之一。

我国60%的玉米种植面积受到干旱胁迫,每年因旱灾而减产20%~30%,直接影响国民经济发展及灾区人民生活^[4]。因此,深入研究我国玉米的旱灾风险,符合我国农业可持续发展的要求,对我国预防和减轻农业旱灾具有重要的现实意义,同时为政府制定减灾规划决策提供科学依据。

国内外关于灾害风险评价的模型和公式有很多,例如:“风险=发生概率×损失”^[5]、“风险=(致灾因子×脆弱性)-减缓能力”^[6]、“风险=发生概率×不同影响强度”^[7]、“风险=致灾因子出现的概率”^[8]、“风险=(致灾因子×脆弱性)/恢复力”^[9]、“风险=物质破坏(暴露性和物质易损性)×影响因子(社会经济脆弱性和应对恢复力)”^[10]、“风险=致灾因子×承灾体脆

收稿日期: 2011-01-06; 修订日期: 2011-02-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD20B03) [Foundation: National Key Technologies R&D Program of China, No.2006BAD20B03]

作者简介: 贾慧聪(1981-),女,山东聊城人,助理研究员,主要从事自然灾害风险评估研究。E-mail: jiahc@irsa.ac.cn

通讯作者: 王静爱(1955-),女,满族,河北定州人,教授,主要从事自然灾害与区域地理研究。E-mail: sqq@bnu.edu.cn

弱性×暴露度”^[11]、“风险 = 危险性 × 暴露性 × 脆弱性 × 防灾减灾能力”^[12]等。目前,更多的研究者赞同联合国 ISDR 的风险表达式:“风险 (R) = 致灾因子 (H) × 脆弱性 (V)”^[13]。

目前,许多学者已就气候因子 (CO₂ 浓度、气温、降水等) 对夏玉米的生长发育、品种熟性、适种区域、产量与品质等问题展开了大量研究^[14-16]。而基于旱灾的成因机理,从风险的角度进行典型区夏玉米的旱灾评价研究还比较欠缺。

因此,本文选取夏玉米为承灾体,从作物自然脆弱性入手,利用 EPIC 模型 (Erosion Productivity Impact Calculator, EPIC) 模拟出典型玉米品种 (丹玉十三) 的自然脆弱性曲线,对我国玉米种植面积最大区域——黄淮海夏播玉米区玉米旱灾风险的时空分布规律进行了定量评价,以期为高风险区 and 高风险时段的风险防范与管理提供科学依据。

1 研究区概况

黄淮海夏播玉米区主要包括黄河、淮河、海河流域中下游的山东、河南全部,河北、北京和天津的大部分,山西省南部的晋中南地区和江苏、安徽两省北部的徐淮地区,是我国夏玉米最大的集中产区,也是全国最大的玉米集中产区 (图 1)。玉米播种面积常年维持 750 万 hm² 左右,占全国玉米播种面积的 30.8% 左右,总产量占全国的 35%~40%,单位面积产量 5.3 t/hm²^[17]。

本文从 2000 年的 1:100 万土地利用图中,提取了黄淮海夏播玉米区耕地中的水浇地和旱地作为玉米可种植区进行玉米旱灾的研究。

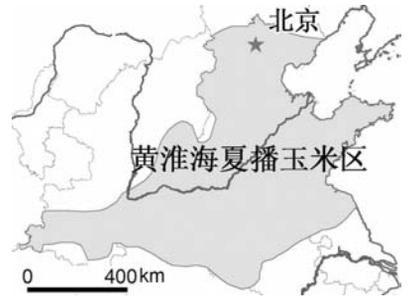


图 1 黄淮海夏播玉米区的空间位置
Fig. 1 Distribution of maize region in China

2 数据库的建立

根据农业旱灾风险评价理论和 EPIC 作物模型的需要,本文收集和整理了一系列的基础数据库来进行黄淮海夏播玉米区玉米旱灾风险评价的研究 (表 1)。

3 研究方法

3.1 EPIC 模型介绍

侵蚀—生产力影响评估模型 (Erosion Productivity Impact Calculator, EPIC) 是 1984 年美国农业部研制的水土资源管理和作物生产力评价模型。适合于模拟作物轮作、耕作实践、种

表 1 基础数据库列表
Tab. 1 List of basic database

数据库名称	数据内容	数据来源	数据年份
地面气象观测数据库	黄淮海夏播玉米区所有气象站点的降水量、气温、辐射、风速、相对湿度等日值数据	中国气象局信息中心	1961-2005
中国土地利用图 ^[18]	1:100 万土地利用数据,包括水田、旱地、林地、草地等主要土地利用类型	中国科学院	2000
2 分辨率的全球土壤类型分布图	土壤属性为 202 类	联合国粮农组织 (FAO)	1992
中国土壤理化属性数据库	包括土层分布、机械组成和有机碳含量等	联合国粮农组织 (FAO); 《中国土种志》	1992
农作物田间观测数据库	中国农业气象观测站玉米生长发育过程数据	中国气象局档案馆	1980-2005
中国分县统计农业数据库	中国各县小麦、玉米、水稻播种面积、产量、化肥施用量等	中国科学院; 《中国统计年鉴》	1996、2001

植日期、灌溉和施肥策略等^[19]。经过广泛验证和多次完善,已经在美国、法国、中国等多个国家成功地应用到作物估产、气候变化影响评价、精准农业、区域农业规划等多个领域。EPIC以日为时间步长,可模拟从一个生长季到上百年的农田水土资源及作物生产力的动态变化。作为一种多作物通用型作物生产系统模拟模型,EPIC模型能够模拟上百种作物、牧草和树木生长,其特点是根据各种作物生理生态过程的共性来研制其主体框架,再结合作物的生长参数和田间管理参数分别进行各作物的生长模拟^[20]。

EPIC模型对作物生长与产量形成过程,及其对环境的影响进行定量模拟的基本过程见图2。

3.2 基于EPIC模型的评价流程

3.2.1 致灾因子危险性评价 采用“水分胁迫”作为刻画其致灾因子强度的主要因子。由于水分胁迫的大小和胁迫的天数共同影响了作物在一个生长季内的干旱强度,因此,在不灌溉情景下,从日输出结果中提出每个生长季内受水分胁迫影响的当天的水分胁迫值和天数,构建了HI指数作为玉米旱灾致灾因子评价的指标:

$$HI_{y,j} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - WS_i) - \min HI}{\max HI - \min HI} \quad (1)$$

式中:HI为玉米生长季内的干旱致灾强度指数,HI_{yj}为y年第j站的干旱致灾强度指数,WS_i为第i天受水分胁迫影响的当天的胁迫值,n为生长季内受水分胁迫影响的天数,maxHI和minHI分别为所模拟的所有站点所有年份内 $\sum_{i=1}^n (1 - WS_i)$ 的最大值和最小值。

“丹玉十三”是通过辽宁、山东等省农作物品种审定委员认定的玉米品种,全生育期120~130天,株高230~250 cm,穗位高100 cm,种植密度为3000株,适宜在辽宁省、吉林省中南部以及山东、河南等黄淮海夏玉米区种植。选取典型玉米品种“丹玉十三”的作物遗传参数作为黄淮海夏播玉米区的玉米遗传参数,在无灌溉的条件下,通过EPIC模型模拟研究区内8 km网格单元上1966-2005年玉米的生长过程(模型的运行需要前5年的训练期)。

3.2.2 自然脆弱性评价 根据EPIC模型的特点,先控制养分和通气性胁迫,然后设定:完全满足养分与完全满足水分(S1情景)和完全满足养分与雨养即不灌溉(S2情景),分别进行模拟产量,利用S1减去S2的产量,认为是达到了剔除温度胁迫对作物生长的影响,只受水分胁迫影响的玉米产量损失值。基于空间数据库,计算黄淮海夏播玉米区评价单元上S1与S2产量的损失率。通过拟合玉米旱灾致灾强度和产量损失率之间的函数关系,得出“丹玉十三”的自然脆弱性曲线。

3.2.3 旱灾风险性评价 本文提出的农业旱灾风险分析的模型体系,是基于自然脆弱性的评价,在不考虑各种抗旱减灾能力,同时暴露性为1(玉米分布区)的情况下,认为评价单元

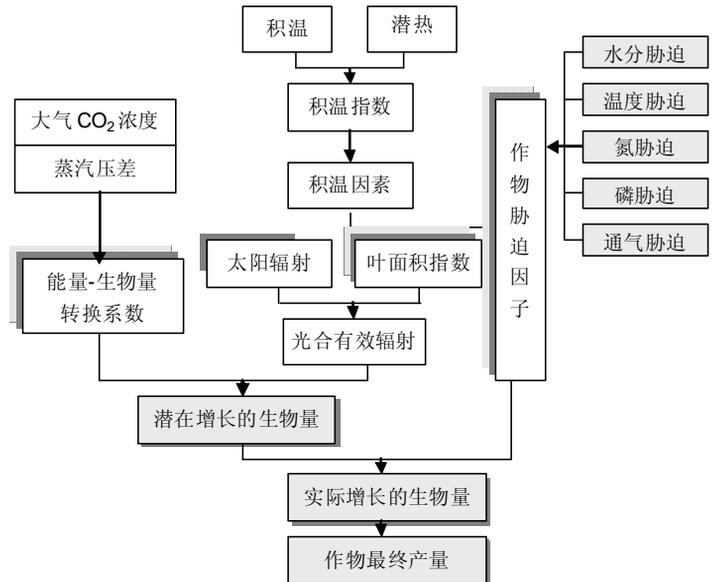


图2 EPIC模型作物产量计算流程图(据J.R. Williams, 1997 绘制)

Fig. 2 Crop production flow chart of the EPIC model

的风险就是致灾强度和脆弱性的函数。对于所有玉米干旱强度发生的频率,分别计算其可能遭受的损失率。因此,选取玉米旱灾损失的概率分布值作为黄淮海夏播玉米区玉米旱灾风险评价的指标。

4 EPIC 模型的应用

4.1 玉米作物参数的确定

为了验证 EPIC 模型在我国的模拟能力,首先需要对模型进行站点上的校准和验证。在模型运行过程中,作物遗传参数的选取直接影响到模拟效果,因而确定作物参数,对模型模拟的推广应用起着重要作用。

本文根据国家气象局全国农业气象站的田间观测试验数据,选择数据序列较好的黄骅国家基准气候站“丹玉十三”品种作为代表性作物,对 EPIC 模型自身广适性的玉米农作物参数进行修正,完成了作物遗传参数的本地化。具体调整玉米作物参数的方法是:按照模型需要的输入数据,将试验站点河北省黄骅县国家基准气候站 1986-1991 年的日气象数据、土壤数据和实际的田间管理数据(犁地、播种、灌溉、施肥、农药和收获等)输入到设置好的站点 EPIC 模型中,将输出的作物产量和实际测得的作物产量进行拟合。通过反复运行模型,运用试错法调整主要参数值,比较年际间产量变化趋势和产量值是否一致。最后拟合的平均误差为 0.082,模拟的产量与实验值在趋势上比较一致,并且数值也比较接近,因此,模型也得到较好的验证(图 3)。

4.2 EPIC 模型的空间尺度校验

用于 EPIC 模型校验的数据有:①模型的相关参数(耕作参数、作物参数和施肥参数等);②基本输入数据:日气象数据(含天气生成器数据)、土壤数据、田间管理操作的数据等。施肥量数据来源于 2001 年中国农业数据库,主要包括氮肥、磷肥、钾肥和复合肥。玉米的潜在热量单位(PHU)选择 2200 度^[21]。灌溉方式设定为均采用自动灌溉。基于获得的已有数据,本文用 2001 年统计产量数据和模型模拟的产量进行对比验证(图 4), R^2 相关系数为 0.5222。这样的模拟精度已经达到了满意水平。

5 全生育期玉米旱灾风险评价

5.1 玉米旱灾自然脆弱性曲线

根据前期已经调整好的“丹玉十三”玉米作物遗传参数,利用 EPIC 模型对这种玉米 S1 情景和 S2 情景分别进行模拟。计算每个站点在相应整个生长季内的旱灾致灾指数和 2 种灌溉情景设定下的玉米产量损失值。最终通过 MATLAB 软件非线性统计模型进行多次拟合,回归出脆弱性曲线图和相应的函数方程(图 5)。

5.2 玉米旱灾风险评价

结果分析

基于典型玉米品种“丹玉十三”的自然脆弱性曲线,在无灌溉并保证养分充足的情景下,通过空间

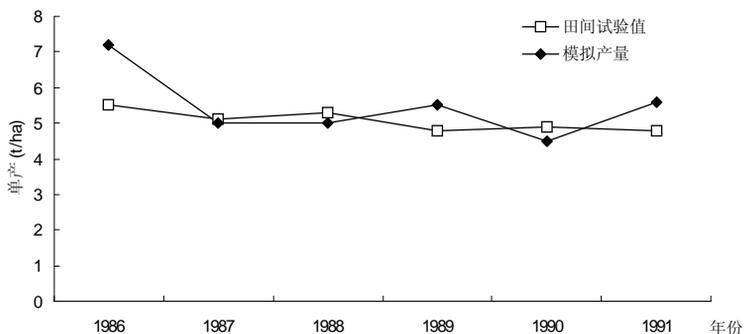


图 3 “丹玉十三”典型玉米品种模拟产量和实测产量的验证

Fig. 3 Verification of simulated yield and field measured yield of typical maize Danyu 13

EPIC模型模拟了黄淮海夏播玉米区内8 km 网格单元上1960-2005年玉米的生长过程,并提取每个生长季内受水分胁迫影响日的水分胁迫因子值,计算出每个生长季的致灾强度指数,结合典型玉米品种的自然脆弱性曲线,计算出研究区玉米受旱灾打击的产量损失率。在此基础上,通过计算每个评价单元减产损失的超越概率,绘制出黄淮海夏播玉米区不同致灾水平下的成灾风险系列图,包括了4个风险水平:2年一遇、5年一遇、10年一遇和20年一遇(图6)。结果表明:

1966-2005年,黄淮海夏播玉米区的旱灾损失风险的空间分布呈现出东部和南部地区整体损失较小,而西部和北部地区整体损失偏高的格局。主要由气候干旱和下垫面的地形所导致的区域水热再分配差异综合决定的。其中,北部山区多为雨养型玉米种植区,人工灌溉条件相对薄弱,这也是进一步使旱灾加剧的原因之一。2年、5年、10年一遇致灾水平时产量损失风险的高值区($R \geq 0.5$)分别占黄淮海夏播玉米区玉米总面积的0.08%、0.61%、3.26%。重点关注20年一遇致灾水平时损失风险的高值区,主要集中分布在冀北高原山地和山东省中南部地区,占黄淮海夏播玉米区玉米总面积的7.63%,这与其致灾风险水平是一致的。这些区域应是黄淮海夏播玉米区防范玉米旱灾风险的关键区域。

6 分生育期玉米旱灾风险评价

基于EPIC模型模拟的1961-2005年黄淮海夏播玉米区玉米的生长过程,“分5个生育时期”进行黄淮海夏播玉米区玉米旱灾风险的评价,找出了玉米致灾和成灾的高风险生育期,以期对玉米旱灾的分生育期防范提供科学依据。致灾风险刻画的是玉米不同生育阶段降水供给与需求的平衡关系,而成灾风险刻画的是玉米不同生育阶段因旱生物量损失的大小。

6.1 不同生育期致灾风险评价

在确定玉米不同生育阶段对应的日期后,基于研究区内每个8 km 网格的每年不同生育阶段,运用EPIC模型,进

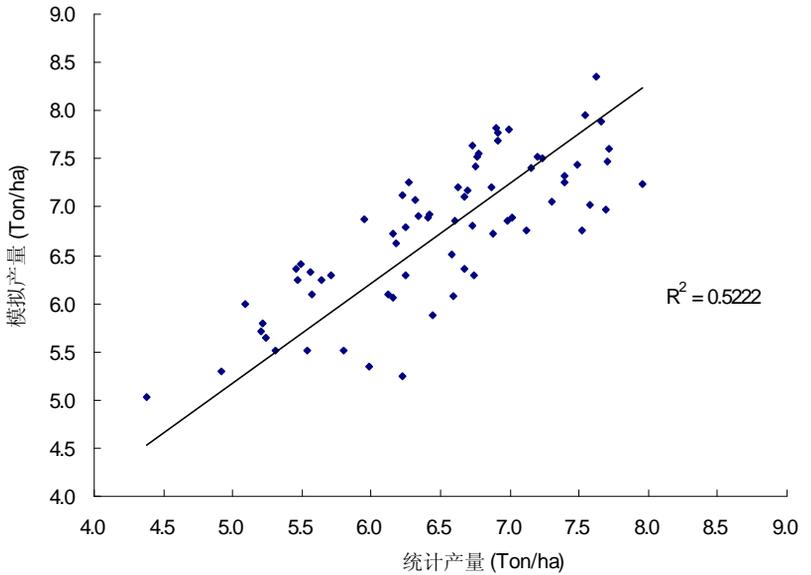


图4 EPIC模型的空间尺度校验图(2001年)

Fig. 4 Verification of the EPIC model on space scale (2001)

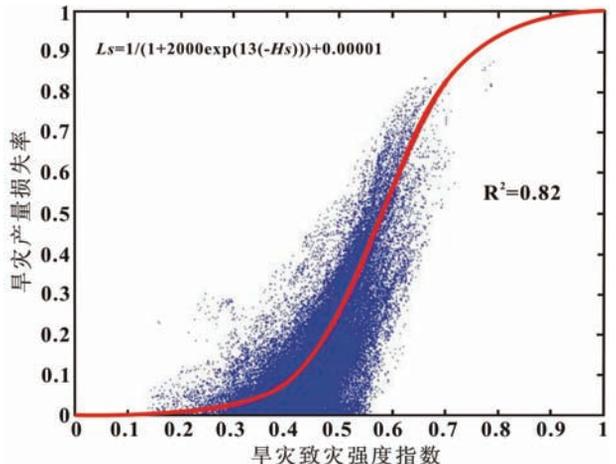


图5 典型玉米品种“丹玉十三”旱灾自然脆弱性曲线

Fig. 5 Physical vulnerability curve of typical maize Danyu 13

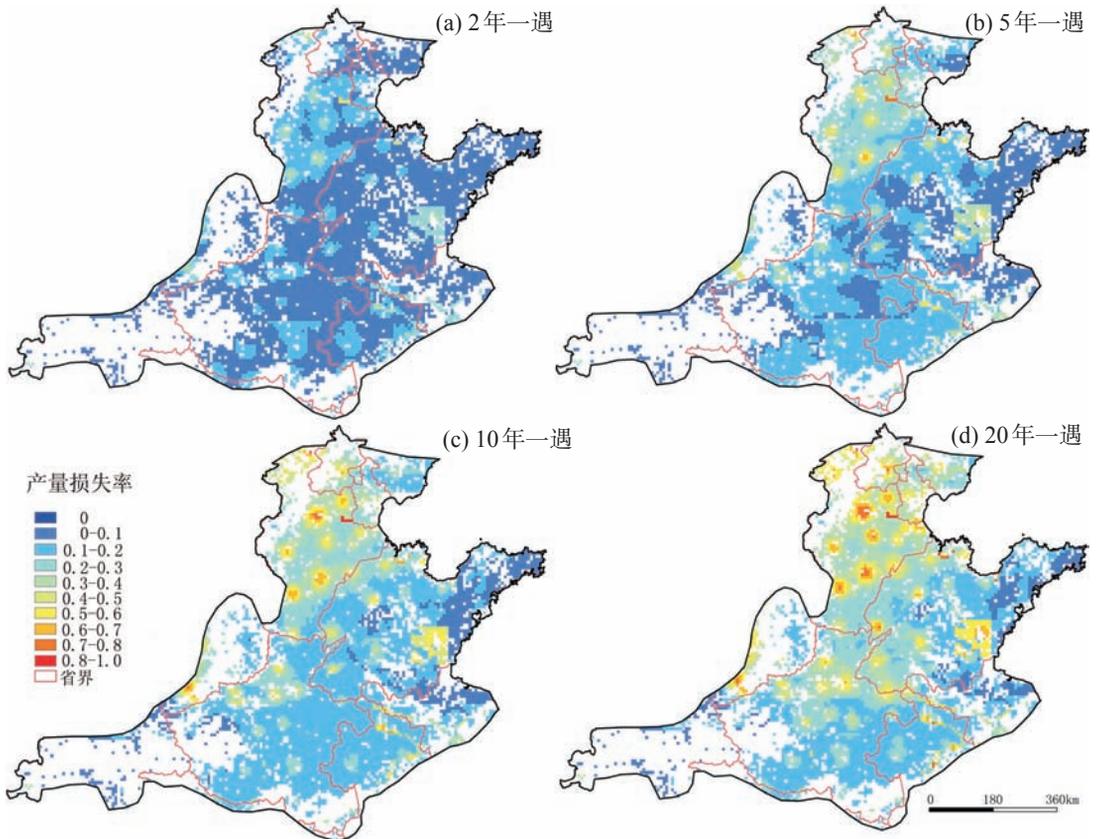


图6 黄淮海夏播玉米区玉米旱灾固定风险水平的产量损失率分布图

Fig. 6 Drought yield loss rate of maize region in northern China with maize hazard risk being once in 2, 5, 10 and 20 years 各自生育期的逐日 WS 值模拟。根据玉米旱灾危险性评价指标 H, 确定 1966-2005 年每年每个生育期的玉米干旱致灾强度指数均值, 绘制出黄淮海夏播玉米区全区各生育阶段与旱灾致灾风险变化的对应曲线图 (图 7)。整体来看, 随着生育期的推移, 玉米旱灾的致灾风险呈现先升高再降低后升高的趋势。可以得出: 抽雄期—乳熟期是玉米旱灾致灾风险的高风险时期, 而播种期—出苗期, 出苗期—拔节期的玉米受旱致灾风险较低。

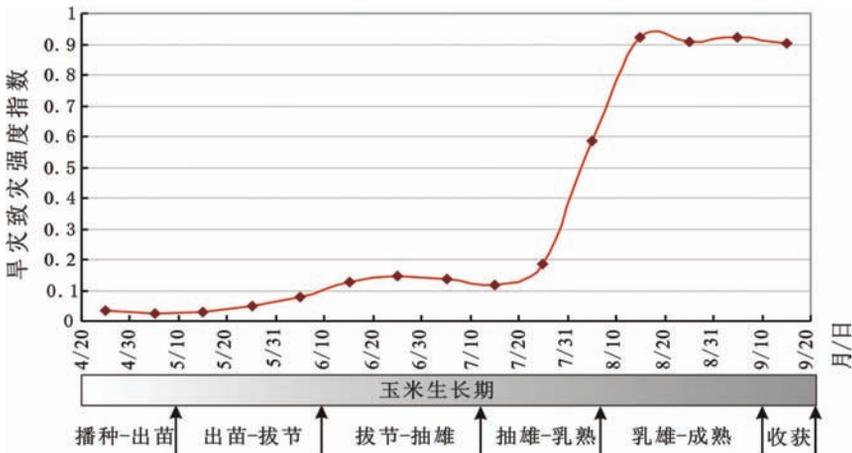


图7 1966-2005年各生育阶段划分与旱灾致灾风险变化的对应关系

Fig. 7 Corresponding relationship between different growth stages and hazard risk changes in drought , 1966-2005

因为本文构建的致灾指数指标是玉米受水分胁迫的强度,考虑的是玉米不同生育阶段降水供给与需求的平衡关系。黄淮海平原的年降水量虽然主要集中于6-9月,由图7可以得出,黄淮海夏播玉米区的玉米耗水高峰处于7月下旬至8月中下旬,导致此时期的玉米水分胁迫风险最高。因此,玉米旱灾致灾风险最高的生育阶段——乳熟期前后应加强防范。

6.2 不同生育期成灾风险年际变化

随着生育期的变化,生物量在玉米各器官之间进行分配以及不断积累的过程。基于黄淮海夏播玉米区内每个8 km 网格的每年不同生育期,在EPIC模型里,通过设定2个情景:S1情景(完全满足养分与完全满足水分)和S2情景(完全满足养分与完全雨养),分别进行1966-2005年各自生育阶段的逐日生物量(Biomass)值模拟(图8)。比较40年因旱生物量损失的风险年际变化,以揭示变化的特征和变化的原因。图8中a、b两条曲线表示玉米干物质积累的动态变化,而a、b两条曲线之间间距表示因旱生物量损失值。

从40年变化看,在7月中旬抽雄期—乳熟期,因旱生物量损失值达到最大(即7月20日对应的a、b两条曲线之间间距最大),为1.44 t/hm²;而后,因旱损失呈现缩小的趋势。生物量的积累在8月中下旬达到最高,在收获期还有降低的表现。这是因为玉米植株个体干物质积累速率,一般是生育前期和后期较低,而中期较高。根据干物质重量的增长曲线^[22],从出苗期到拔节期,干物质绝对重量增长小,而相对重量增长大;从拔节期到抽雄期,干物质重量增长数量大,是玉米一生中生长最旺盛、增长速率最快的时期;而从抽雄期到乳熟期,干物质积累速率逐渐减慢,日增重降低,体现了玉米干物质积累的动态变化。因此,拔节期—乳熟期是玉米生物量积累的最快速阶段。

6.3 不同生育期成灾风险评价

为了表达黄淮海夏播玉米区全区在不同生育期的成灾风险变化,计算5个生育期对应的生物量损失率,以此表征成灾的风险水平(图9)。整体来看,随着生育期的推移,玉米旱灾的成灾风险表现出先降低再上升后降低的趋势。可以得出:拔节期—抽雄期是玉米旱灾成灾风险的高风险时期,应该加强风险的防范;而播种期—出苗期的玉米受旱成灾风险较低。

从图9可以分析玉米不

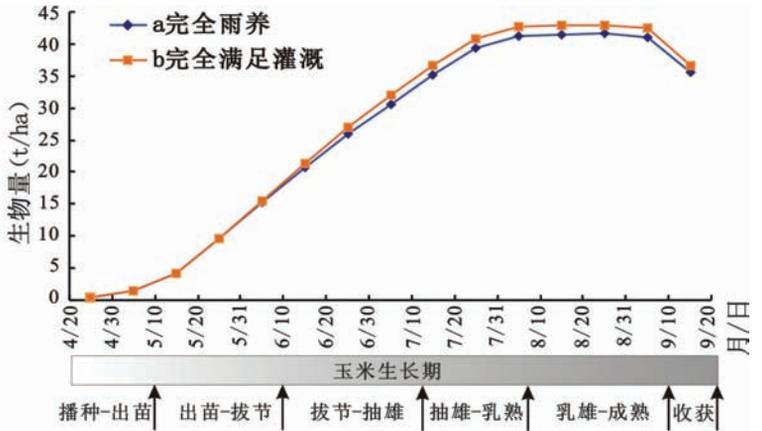


图8 黄淮海夏播玉米区不同生育期对应生物量损失40年均值变化(1966-2005年)

Fig. 8 Maize biomass annual average loss of 40 years in different growth stages (1966-2005)

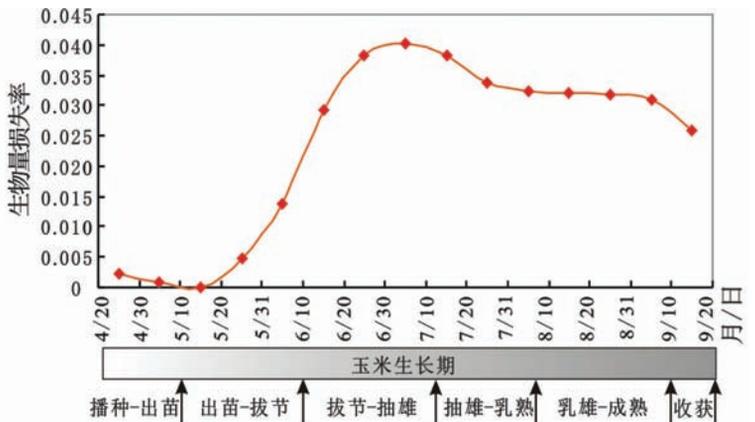


图9 各生育阶段划分与旱灾成灾风险变化的对应关系(1966-2005年)

Fig. 9 Corresponding relationship between different growth stages and drought disaster risk (1966-2005)

同生育时期干旱致灾风险对产量的影响程度的差异。首先,播种期一出苗期对水分胁迫的抵抗力比较强,适当的水分胁迫可以起到蹲苗和抗旱锻炼的作用。所以,苗期阶段轻度干旱有利于根系生长,增加根叶比,对产量有益。从图中也可看出此生育阶段干旱的生物量损失不增反减。拔节期是玉米株体形成的重要时期,植株生长旺盛,玉米需水强烈,此期受旱对玉米的株高、叶面积和根系生长影响变大,进而对产量的影响较大。而抽雄期的玉米主要由营养生长向生殖生长过渡,体内新陈代谢旺盛,为玉米的需水临界期,该期的干旱对产量损失产生重大影响。抽雄期6月下旬至7月中旬的生物量损失率达到最大,基本保持在0.04附近。进入乳熟期后,玉米仍需要较多的水分,此时玉米的光合作用和蒸腾都在旺盛进行,同时大量的营养物质从茎叶向果穗运移,此期受旱玉米植株生物量减产风险仍较高。进入成熟期后,玉米自身的生物量已经达到最大值,干旱胁迫对玉米的减产损失率基本保持在0.03。收获期时由于植株的水分亏损率变小,生物量损失率有下降的趋势。因此,拔节期—抽雄期对水分胁迫的敏感性最高,这可以作为减轻旱灾风险水平,选择田间灌水时期以及灌水数量的重要依据,以达到最优的玉米产量结果。

7 结论与讨论

7.1 结论

基于自然脆弱性的旱灾风险评价理论,利用作物EPIC模型,模拟了1961-2005年黄淮海夏播玉米区玉米的生长过程。同时结合灾害过程机制,开展了对黄淮海夏播玉米区玉米旱灾风险的评价研究。

在2、5、10和20年一遇致灾水平下,黄淮海夏播玉米区玉米旱灾减产风险总体呈现出从西北向东南方向递减的趋势,这主要由气候干旱和下垫面的地形条件综合决定。20年一遇水平时,产量损失风险的高值区($R \geq 0.5$)集中分布在冀北高原山地和山东省中南部,占黄淮海夏播玉米区玉米总面积的7.63%。这些区域应成为防范玉米旱灾风险的重点区域。

从玉米的生育阶段来看,玉米耗水高峰处于7月下旬至8月中下旬,此期的玉米水分胁迫风险最高。玉米旱灾致灾风险最高的生育阶段——乳熟期前后应加强防范。从总时段(1966-2005年)来看,在抽雄期—乳熟期,因旱生物量损失风险达到最大,为 1.44 t/hm^2 。各生育期成灾风险由大到小依次为:拔节期—抽雄期 > 抽雄期—乳熟期 > 乳熟期—成熟期 > 出苗期—拔节期 > 播种期—出苗期,生物量损失率分别为0.035、0.034、0.031、0.006和0.001。此结论可为减轻旱灾风险水平,选择田间灌水时期以及灌水数量的重要依据,以达到最优的玉米产量结果。

7.2 讨论

(1) 本文针对黄淮海夏播玉米区的玉米旱灾风险进行评价研究,由于玉米品种数据的限制,只选择了“丹玉十三”这一个品种的玉米进行了自然脆弱性曲线分析,对玉米自然脆弱性在黄淮海夏播玉米区范围内空间差异的表现有一定的不足,需要对玉米品种的相关数据做进一步的扩充,以完善玉米旱灾风险的研究。

(2) 由于数据的限制,本文做出一些情景假定。首先设定2000年土地利用中水浇地和旱地作为玉米的分布区,同时选择8 km 网格单元设定为均质的评价单元,玉米的种植品种单一,并且基于玉米受旱自然脆弱性的条件下对黄淮海夏播玉米区玉米旱灾风险进行了评价研究。今后如能更进一步细化分析网格单元内的作物类型、玉米品种、玉米种植比例以及综合考虑防灾减灾能力等问题,将使玉米旱灾风险评价的结果更精确。这样为我国分区保险费率的厘定以及制定农业旱灾风险的适应性对策提供更科学的政策启示和现实指导意义。

(3) 农业旱灾风险是未来特定时段内作物产量的损失可能性,而目前的研究是基于

1961-2005年过去40多年气象观测数据的基础上进行的,对未来气候变化条件下的风险研究还未开展。今后如何利用EPIC中的WXGEN模拟未来的逐日气象数据,或者基于GCM全球大气环流模式进行降尺度情景设置,并以模拟结果进行玉米旱灾风险的评价,尚需进一步深入研究。

参考文献 (References)

- [1] National Grain & Oils Information Center, <http://www.grain.gov.cn/BigClass.asp?BName=玉米频道>. [国家粮油信息中心. <http://www.grain.gov.cn/BigClass.asp?BName=玉米频道>.]
- [2] The Editorial Committee of China Agricultural Statistical Yearbook. China Agriculture Yearbook (2006). Beijing: China Agriculture Press, 2006. [中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴(2006). 北京: 中国农业出版社, 2006.]
- [3] Zheng Yuanchang. Review on global natural catastrophes. Natural Disaster Reduction in China, 2000, 10(1): 14-19. [郑远长. 全球自然灾害概述. 中国减灾, 2000, 10(1): 14-19.]
- [4] Yue Guidong. Cloning and analyses of genes involved in response to drought stress in maize [D]. Jinan: Shandong University, 2004. [岳桂东. 玉米干旱胁迫相关基因的克隆与分析[D]. 济南: 山东大学, 2004.]
- [5] Smith K. Environmental Hazards. London: Routledge, 1996: 389.
- [6] Ben Wisner. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. London: Routledge, 2000.
- [7] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers. WMO, 2001.
- [8] Downing T E, Butterfield R, Cohen S et al. Vulnerability Indices: Climate Change Impacts and Adaptation. UNEP Policy Series, UNEP, Nairobi, 2001.
- [9] United Nations. Risk awareness and assessment/Living with Risk. ISDR, UN, WMO and Asian Disaster Reduction Centre, Geneva, 2002: 39-78.
- [10] Carreno et al. (Inter-American Development Bank, Colombia University). Indicators of disaster risk and risk management program for Latin America and the Caribbean, 2000.
- [11] Perles Roselló M J, Vías Martínez J M, Andreo Navarro B. Vulnerability of human environment to risk: Case of groundwater contamination risk. Environment International, 2009, 35(2): 325-335.
- [12] Zhang Jiquan, Li Ning. Quantitative Methods and Applications of Risk Assessment and Management on Main Meteorological Disasters. Beijing: Beijing Normal University Press, 2007. [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.]
- [13] UN/ISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. Geneva: UN/ISDR, 2007.
- [14] Liu Jiandong, Wang Shili, Yu Qiang et al. Simulation of impacts of doubled CO₂ on the climatic productivity in Huang-Huai-Hai Plain. Journal of Natural Disasters. 2001, 10(1): 17-23. [刘建栋, 王石立, 于强等. CO₂倍增对黄淮海气候生产力影响的数值模拟. 自然灾害学报, 2001, 10(1): 17-23.]
- [15] Yang Xiu, Sun Fang, Lin Erda et al. Study on the sensitivity and vulnerability of maize to climate change in China. Acta Ecologica Sinica, 2005, 24(4): 54-57. [杨修, 孙芳, 林而达等. 我国玉米对气候变化的敏感性和脆弱性研究. 地域研究与开发, 2005, 24(4): 54-57.]
- [16] Jia Jianying, Guo Jianping, Peng Ni. Effects of climate change on yield of maize in Northeast China. Journal of Anhui Agri. Sci., 2010, 38(32): 18309-18312. [贾建英, 郭建平, 彭妮. 气候变化对东北地区玉米产量的影响. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18309-18312.]
- [17] Tong Pingya. Regionalization of Maize Growing Areas in China. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1992. [佟屏亚. 中国玉米种植区划. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.]
- [18] Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s. Geographical Research, 2003, 22(1): 1-12. [刘纪远, 张增祥, 庄大方等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. 地理研究, 2003, 22(1): 1-12.]
- [19] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R et al. The EPIC crop growth model. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 489-511.
- [20] Williams J R. The EPIC model. Rempel, TX: USDAARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 1997.
- [21] Cai Xitian, Xu Zongxue, Su Baolin et al. Distributed simulation for regional evapotranspiration and verification by using remote sensing. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 154-160. [蔡锡填, 徐宗学, 苏保林等. 区域蒸散发分布式模拟及其遥感验证. 农业工程学报, 2009, 25(10): 154-160.]
- [22] Leopold C, Krideman P E. Growth and Development of Plant. Beijing: Science Press, 1975. [Leopold C, Krideman P E. 植物的生长和发育. 北京: 科学出版社, 1975.]

Maize Drought Disaster Risk Assessment Based on EPIC Model: A Case Study of Maize Region in Northern China

JIA Huicong^{1,2}, WANG Jing'ai^{1,3,4}, PAN Donghua⁵, CAO Chunxiang²

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of CAS and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

3. Key Laboratory of Regional Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

5. National Disaster Reduction Center of China, Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China, Beijing 100022, China)

Abstract: As the global climate change and food security became an increasingly important issue, agriculture drought comes to the focus of attention. China is a typical monsoon climate country as well as an agricultural country with the world's largest population. The East Asian monsoon has had a tremendous impact on agricultural production. Therefore, a maize drought disaster risk assessment, in line with the requirements of sustainable development of agriculture, is important to drought disaster reduction and food security. This study collected information on meteorology, soil, land use and agro-meteorological observation of the research area, and quantitative assessment was done to present spatio-temporal distribution of maize drought in maize region of northern China based on the concept framework of "Hazard-inducing factors assessment (Hazard)-Vulnerability assessment of hazard-affected body (Vulnerability Curve)-Risk assessment (Risk)", importing crop model EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), and using crop model simulation and digital mapping techniques, from the point of view of whole growth period and sub-growth period. The results showed that in terms of 2-, 5-, 10- and 20-year return periods, the overall maize drought risk decreased gradually from northwest to southeast in the maize planting areas. In the 20-year return period, high risk value regions (maize risk level ≥ 0.5) are concentrated in northern Hebei plateau and central and southern parts of Shandong Province, accounting for 7.63% of the total maize area. The high risk maize growing periods of maize region in northern China were heading - tasseling period, tasseling - milking period and milking - mature period, which should be paid more attention. This paper may provide theoretical basis and technological support for maize drought risk prevention and mitigation of high-risk areas and high-risk periods.

Key words: physical vulnerability curve; risk assessment; agriculture drought; maize production; EPIC model; maize region of northern China