

Research on Vulnerability Curve of Waterlogging Disaster for Maize Based on CERES-Maize Model in the Midwest of Jilin Province

Enliang Guo, Jiquan Zhang, Yongfang Wang, Zhenhua Dong

School of Environment, Northeast Normal University, Nature Disaster Research Institute, Changchun
130117, China

基于 CERES-Maize 模型的吉林省中西部玉米涝 灾脆弱性曲线研究

郭恩亮, 张继权, 王永芳, 董振华

东北师范大学环境学院, 东北师范大学自然灾害研究所, 长春 130117, 中国

Abstract

Under the background of global warming, the loss caused by extreme precipitation is becoming more and more serious. As a bridge between risk and disaster losses, at present, research on vulnerability curve has become research focus in the field of disaster risk. In this study, based on meteorological data, crop physiological data, and field management data and so on, to select typical waterlogging disaster years as a case, the growth process of Maize in the Midwest of Jilin province was simulated by using the CERES-Maize model of localization and spatial scaling. The disaster intensity index is calculated by copula function, and then builds the construction of waterlogging disaster vulnerability curve of Maize. The results show that: vulnerability curve of waterlogging disaster for maize in descending order are: the emergence - jointing, jointing - heading stage, heading - milk stage, milky - maturity. The results can be used as mitigate water logging disaster for maize growth, choose a reasonable period of irrigation and drainage facilities provide an important basis, in order to achieve the result of optimal Maize planting arrangement.

Keywords: The vulnerability of curve; CERES-Maize model; waterlogging disaster; Midwest of Jilin Province

摘要

在全球气候变暖背景下, 极端降水造成的洪涝灾害损失越来越严重。作为连接风险与灾害损失的桥梁, 脆弱性曲线的研究已经成为现阶段灾害风险领域的热点。本研究在收集研究区气象数据、作物生理数据、田间管理数据等基础上, 选取典型涝灾年份为案例年, 通过对 CERES-Maize 模型进行本地化和空间升尺度处理, 对吉林中西部地区玉米生长过程进行逐日逐网格模拟, 耦合 copula 函数构建的致灾强度指数进行玉米涝灾脆弱性曲线的构建, 结果表明: 吉林省中西部地区玉米涝灾脆弱性由大到小依次为: 出苗—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期, 研究结果可以作为减轻涝灾对于玉米生长的影响, 选择合理的灌溉时期和排水设施提供重要依据, 以达到玉米种植优化布局的结果。

关键词: 脆弱性曲线; CERES-Maize 模型; 涝灾; 吉林中西部

1. 引言

根据 IPCC 第五次评估报告, 全世界面临极端气候事件带来的负面影响将越来越严重, 灾害的发生频率在未来的若干年内将增加,

影响的范围也会越来越广泛[1]。《第三次气候变化国家评估报告》指出：未来我国极端事件增加，暴雨、强风暴潮、大范围干旱等发生的频次和强度增加，洪涝灾害的强度呈上升趋势[2]。我国是农业大国，粮食产量在我国国民生产总值中占有举足轻重的地位。同时，由于我国在世界经济生活中越来越明显主导地位，中国粮食安全不仅影响到我国的发展，而且会影响到世界的政治和经济格局。由于全球气候的变化以及我国所处的特殊地理环境，造成我国农业灾害频发[3]，据统计，1972-2013 年我国平均受灾面积为 $4.39 \times 10^5 \text{ km}^2/\text{a}$ ，其中洪涝灾害受灾面积为 $1.05 \times 10^5 \text{ km}^2/\text{a}$ ，占气象灾害受灾面积的 24.08%，是仅次于旱灾造成严重损失的气象灾害。玉米是我国主要的粮食作物，玉米种植面积年均均在 $2.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 以上，年均总产量约为 $1.2 \times 10^{11} \text{ kg}$ 左右，面积与总产分别占我国粮食作物的 21%和 24%，是我国三大粮食作物之一。其中吉林省中西部地区位于我国黄金玉米带上，同时该区也是吉林省乃至东北地区典型的洪涝灾害频发地区[4]。对该区进行玉米涝灾脆弱性曲线的研究，对于提高我国的农业气象灾害的研究水平和应急管理能力、实现科学抗灾和主动抗灾的目标具有重要意义。其研究成果可推广到我国其它农业地区，为玉米生产合理布局及防灾减灾提供科学依据和方法

目前关于农业洪涝灾害脆弱性曲线研究大多集中于对不同致灾强度下某一类农作物的受涝损失率的研究[5]。致灾因子指标通常选取水深和淹没时间，损失程度则一般用减产率、作物死亡率表示。基于灾情数据进行脆弱性分析是最常见的方法之一。主要是通过查阅历史文献、灾情数据库、实地调查等，将致灾因子与成灾指标建立一一对应的关系，然后利用回归模型、神经网络等方法探究两者之间的关系[6]。基于对承灾体价值调查和受灾情景假设，推测出不同致灾强度下的损失率进而构建脆弱性曲线的方法，被称为系统调查法。主要是判断不同水位情景下农作物的淹没深度，最后建立农作物脆弱性曲线[7, 8]。作物模型着重对作物生长发育过程及其与环境的关系进行定量描述和预测，可在一定程度上定量分析不利气象条件作物生长发育和产量形成的影响，并已在农业气象灾害分析中得到初步应用[9, 10]。在农业洪涝脆弱性方面也进行了一系列的尝试，例如，Velde M, et al. 利用 EPIC 模型分析了法国 2007 年多雨条件下小麦和玉米的产量情况[11]。杨京平和陈杰试图利用计算机模拟

渍水时期及持续时间对春玉米生长及产量的影响[12]。基于模型模拟构建的脆弱性曲线的优点在于：可以模拟任意致灾强度中的农作物脆弱性水平，并且可以从灾害自身机理和农作物生长机理出发详细描述农作物的脆弱性[13]。因此，本研究拟选取吉林中西部玉米主产区为研究示范区，以玉米不同发育阶段为切入点，从玉米脆弱性出发，基于 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 尺度的格网数据，利用 CERES-Maize 模型模拟吉林中西部地区典型玉米品种（郑单 958）的脆弱性曲线，估算不同致灾强度可能造成的玉米生长过程中关键生理指标的损失，为科学制定应急抗灾、减灾措施提供理论依据和技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

吉林省中西部地区位于吉林省松嫩平原的西南端、科尔沁草原的东部，西毗邻内蒙古自治区，北靠黑龙江省(图 1)，地理范围介于北纬 $43^\circ 16' \sim 46^\circ 18'$ ，东经 $120^\circ 38' \sim 127^\circ 45'$ ，包括白城、松原、四平、长春和吉林 5 个地区 20 个市县(区)。白城市：镇赉县、洮南市、通榆县、大安市；松原市：扶余县、前郭尔罗斯蒙古族自治县、乾安县、长岭县；长春市：榆树市、德惠市、农安县、双阳区；四平市：公主岭、双辽县、梨树县；吉林市：舒兰市。研究区域总面积 828.73 万公顷，占吉林省土地面积的 44.23%。

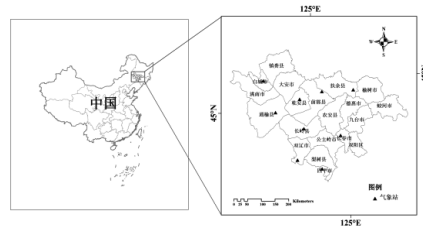


图 1 吉林中西部地区示意图

对于吉林省整个省份来说，该地区的气候类型为温带大陆性季风气候，但是由于吉林省西北部平原区临近蒙古高原，使得吉林省中西部地区变为温带半湿润-半干旱气候区。气候特点为四季分明，春季多风少雨、冬季漫长而寒冷，夏季多雨、秋季温差较大，年蒸发量在 700-1300mm 之间，日照时数 2600-3000h， 10°C

以上的积温为 2800-3000℃,无霜期在 120-160 天,其中吉林省中部地区主要受大陆季风气候的影响,而西部地区则由于受蒙古高压的牵制,造成研究区的降水量在时空上呈现分布不均的态势,最终造成水资源匹配组合在空间分布上存在着较大的“错位现象”,具体表现为年降水量在 200-650mm 之间,且降水量主要集中于 6-8 月份,占全年降水量的 60%以上,多集中在作物生长旺盛的季节,降水量从东南部向西北内陆递减。

2.2. 研究方法

玉米是一种需水量很大的农作物,并且不同生育期对于水分的需求不同,因此降水量的多少显著影响玉米作物的生长,通过对以往文献进行梳理发现,国内外学者在对涝灾危险性评价的研究中,对于涝灾致灾强度的确定,大部分用单一的指标进行表征,如利用 Z 指数, SPI 指数的大小或者根据干旱划分标准确定的不同干旱等级的频率,极端降水量或者淹没水深。但是对于玉米作物来说,极端降水引起的涝灾及对玉米生长造成的影响,不仅与 SPI 值确定的雨涝等级的频率有关,而且与不同生育期内雨涝历时有关。因此本文根据雨涝等级划分标准对吉林省中西部地区进行雨涝强度和

雨涝历时的划分。然后利用 Copula 函数计算致灾强度指数, Copula 函数具有无需统一变量边缘分布的优势,已经被广泛应用于灾害及风险评价领域[14-16]。本研究主要是利用 Copula 函数对雨涝强度和雨涝历时进行二维联合分布的计算,致灾强度指数的计算如公式(1)所示:

$$H_w=C(w_i,w_d) \tag{1}$$

其中 H_w 为致灾强度指数, w_i 为周 SPI 指数确定的致灾强度, w_d 为周 SPI 指数确定的致灾强度历时,不同站点的 H_w 值由各站点的致灾强度和致灾强度历时确定的 Copula 函数进行计算。其中 SPI 为标准化降水指数的简称, SPI 通过计算给定时间尺度内降雨量的累积概率,能够在多个时间尺度上进行计算比较,不仅可反映短时间内降雨量的变化,如对农业生产有重要影响的土壤水分的动态变化,也可以反映长期水资源的演变情况,如地下水供给、地表径流等。

2.3. 数据库的建立

根据 CERES-Maize 模型的需要,本研究收集并整理了一系列的基础数据库来进行吉林中西部地区玉米涝灾脆弱性曲线的构建,具体数据见表 1。

表 1 基础数据库列表

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	吉林省中西部地区 14 个气象站点逐日数据,包括降水量、最高气温、最低气温、日照时数	中国气象局信息中心	1960—2014
中国土地利用图	1:100 万土地利用数据,包括水田、旱地、草地、林地等	中国科学院	2000
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	国际粮食政策研究所	2009
农作物田间观测数据库	《东北地区玉米研究站点资料》的吉林省部分	国家气象信息中心资料室	1980-2014
吉林中西部各县统计农业数据库	各市、县玉米产量、化肥施用量等	《吉林省统计年鉴》	1985—2014

3. 玉米涝灾脆弱性曲线的构建过程

3.1. 脆弱性曲线的构建

根据研究表明,苗期长期的阴雨天气,低温寡照常常导致温度偏低偏低,不利于植株正常生长,植株矮小。因此出苗-拔节期选择叶面积指数(LAI)作为

损失指标;进入拔节期,频繁降雨天气会导致杂草快速生长,杂草与植株争抢营养,致使部分植株出现营养不良的情况,影响作物的生长,因此拔节—抽雄期选择 LAI 作为损失指标;抽雄—乳熟期,大量降水导致正常光合作用受到影响,阻碍干物质的形成,导致后期玉米籽粒不饱满。因此选取粒重作为损失指标;乳熟—成熟期,过量降水导致不能正常光合作用,

由于灌浆不充分,收获的新作容重降低,因此这一时期选择粒重作为损失指标。

根据 CERES-Maize 模型的特点,先控制模型运行过程中氮胁迫、养分胁迫和病虫害胁迫等,然后设定为完全满足养分与完全满足水分 (S_1 情景) 与完全满足养分与雨养 (S_2 情景),可认为是达到了排除温度胁迫对作物生长的影响,即 S_1 情景下与 S_2 情景下不同生育期相应指标的损失率为受涝渍扰动的敏感程度。损失率的计算方法为:利用每个网格 S_1 情景下某一生育期某一指标的数值减去 S_2 情景下相应的数值作为受涝渍胁迫影响的损失值,该值与该网格 S_1 情景下数值的比作为相应指标的损失程度,计算如公式 (2) 所示:

$$S = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} \quad (2)$$

式中: S 为某一网格某一生育期某一敏感性指标因涝损失程度, Y_1 和 Y_2 分别为 S_1 和 S_2 情景下的某一指标的数值。

3.2. CERES-Maize 模型的校验

用于 CERES-Maize 模型校验的数据有: ①模型的相关数据:(作物遗传参数、耕作参数、施肥信息); ②基本输入数据:逐日气象网格数据集、土壤数据、田间管理数据(播种、农药、施肥和物候期等)等。灌溉方式设定为自动灌溉。进行作物遗传参数的本地化。具体的方法是:按照模型所需要的数据,将洮南市试验点 2008—2014 年的日气象数据、土壤数据和这 5 年的田间管理数据输入设置好的站点 CERES-Maize 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,运用遗传算法调整主要参数值,直到模拟的产量与实测值在趋势上比较一致,而且数值也比较接近(图 2),最后拟合的平均误差为 0.093。基于校验好的遗传参数和已有的基本输入数据,对研究区 9 个农业气象站点 2010 年的统计产量数据和模型模拟的产量进行对比验证(图 3), R^2 相关系数为 0.5305,说明空间上的校验结果较为合理。

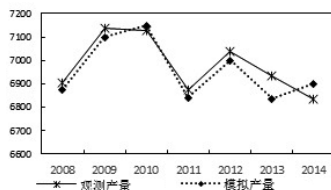


图 2 CERES-Maize 模型的参数校验图

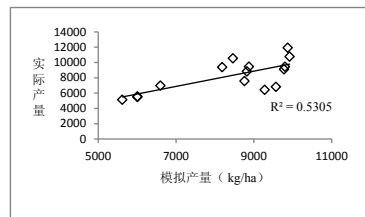


图 3 CERES-Maize 模型的空间尺度校验图

3.3. 结果与分析

郑单 958 是辽宁省、吉林省等 7 省区及国家农作物品种审定委员会审定的玉米品种,在东北春播玉米区平均全生育期为 146 d,是近年来东北地区主要种植的品种之一,因此选取典型玉米品种郑单 958 作为 CERES-Maize 模型所需输入的玉米遗传参数, S_1 情景下,利用 1960-2012 年平均逐日气象网格数据,对研究区 $5\text{km} \times 5\text{km}$ 网格单元玉米生长过程进行模拟, S_2 情景下,通过 CERES-Maize 模型模拟研究区 $5\text{km} \times 5\text{km}$ 网格上 1985 年、1994 年、2005 年和 2010 年等典型涝灾年份里玉米的生长过程。并且提取每个生育阶段受涝渍胁迫影响的损失指标,计算出每个生育期内不同致灾强度指数,结合自然脆弱性曲线的定义,计算出吉林省中西部地区玉米不同生育期内涝灾脆弱性曲线图 (4)。玉米的出苗—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期的关系式分别为 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 。

$$y_1 = 0.3328x^2 + 0.1467x + 0.1698, R^2 = 0.8763 \quad (3)$$

$$y_2 = 4.0722x^3 - 5.3751x^2 + 2.4333x - 0.0028, R^2 = 0.5551 \quad (4)$$

$$y_3 = -0.0081x^2 + 0.147x + 0.0924, R^2 = 0.6677 \quad (5)$$

$$y_4 = -0.2095x^2 + 0.3756x + 0.041, R^2 = 0.3591 \quad (6)$$

其中出苗—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—乳熟期的脆弱性皆通过了 0.05 的 F 值检验,也就是说,随着致灾强度指数的增加,每个生育期内对应指标的损失率增长趋势显著。其中出苗—拔节期受灾最为敏感,降水量显著影响玉米叶片的生长,损失率最高可达 60% 以上,拔节—抽雄期,由于需水量较大,当致灾强度指数大于 0.5 时,损失率不再增加。抽雄—乳熟期,粒重损失率可高达 25%。乳熟—成熟期,虽然随着致灾强度指数的增加,粒重损失率呈线性增长趋势,但是增长趋势不明显,主要与吉林省中西部地区年内降水分布有关,降水量主要集中在 7-8 月,进入 9 月之后,降水量显著减少,对玉米干物重积累的影响逐渐减弱。综上所述,吉林省中西部地区玉米涝灾脆弱性最强的时期为出苗—拔节期,其次为拔节—抽雄期和抽雄—乳熟期,乳熟—成熟期受灾较轻。

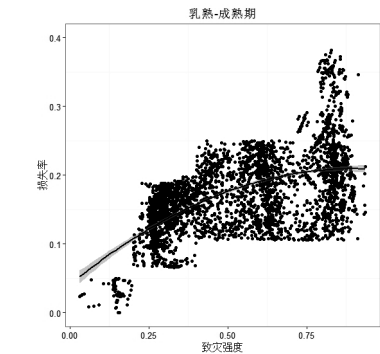
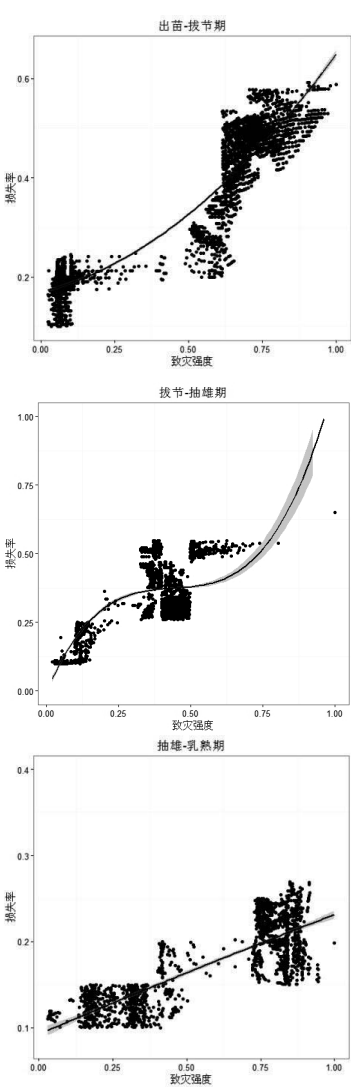


图 4 吉林中西部地区不同生育期玉米涝灾脆弱性曲线

4. 结论

脆弱性曲线是脆弱性评价与自然灾害风险评价研究的桥梁与纽带,如何建立有效的玉米涝灾脆弱性曲线是评估玉米受涝损失的关键,本研究通过选取对涝灾较为敏感的玉米生理参数作为损失指标,通过对典型涝灾年份的玉米逐日生长过程进行模拟,并且通过站点观测数据对模型空间化结果进行检验,最终在计算典型涝灾年份不同生育期致灾强度指数的基础上,建立不同生育期不同损失指标的玉米涝灾脆弱性曲线。吉林省中西部地区玉米涝灾脆弱性由大到小依次为:出苗-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-乳熟期、乳熟-成熟期,本研究突破了传统建立脆弱性曲线过程中选取产量损失作为玉米涝灾脆弱性指标的限制,通过构建不同生育阶段相对应的受涝敏感性较高的生理参数作为损失指标,建立了全生育期的玉米涝灾脆弱性曲线,此结论可以作为减轻涝灾对于玉米生长的影响,选择合理的灌溉时期和排水设施提供重要依据,以达到最优玉米产量的结果。

本研究在对吉林省中西部地区构建玉米涝灾脆弱性曲线的过程中,由于玉米品种参数选择的限制,只进行了郑单 958 这单一玉米品种的自然脆弱性曲线的构建,对于不同玉米品种在该研究区的时空差异性表现的研究上存在着一定的不足,需要对玉米品种的相关数据进行进一步的收集整理,以完善玉米涝灾脆弱性曲线构建的研究。

Acknowledgements

This study was supported by the National Key Technology R&D Program of China under Grant

(No.2013BAK05B01), the National Natural Science Foundation of China under Grant (No. 41571491) and China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (No. 2015001) and the National Non-Profit Research Program of China (No.201401015).

致谢

本研究得到“十二五” 社发领域国家科技支撑计划课题 (2013BAK05B01), 国家自然科学基金项目 (41571491)和公益性行业(气象)科研专项(2015001)和水利部公益性行业科研专项经费项目(201401015)资助。

参考文献

- [1] Zhang Q, Zhang J, Wang C. Risk assessment of drought disaster in typical area of corn cultivation in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016.
- [2] 编写委员会编著第三次气候变化国家评估报告. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.
- [3] 王春乙, 张继权, 霍治国, 等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望. *气象学报*, 73 (1):1-19, 2015.
- [4] 秦元明. 中国气象灾害大典•吉林卷. 北京: 气象出版社, 2008.
- [5] 蒋尚明, 王友贞, 汤广民, 等. 淮北平原主要农作物涝渍灾害损失评估研究. *水利水电技术*, 42(8):63-67, 2011.
- [6] Chau V N, Holland J, Cassells S, et al. Using GIS to map impacts upon agriculture from extreme floods in Vietnam. *Applied Geography*, 41:65-74, 2013.
- [7] Wang H, Kuo P, Shiau J. Assessment of climate change impacts on flooding vulnerability for lowland management in southwestern Taiwan. *Natural Hazards*, 68(2):1001-1019, 2013.
- [8] McFadyen L, Grieve A M. Effects of irrigation management and watertable depth on growth and yield of field-grown Sultana grapevines in south eastern Australia. *Agricultural Water Management*, 111(0):20-26, 2012.
- [9] Velde M, Tubiello F, Vrieling A, et al. Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data. *Climatic Change*, 113(3-4):751-765, 2012.
- [10] Jia H, Wang J, Cao C, et al. Maize drought disaster risk assessment of China based on EPIC model. *International Journal of Digital Earth*, 5(6):488-515, 2011.
- [11] Velde M, Tubiello F, Vrieling A, et al. Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data. *Climatic Change*, 113(3-4):751-765, 2012.
- [12] 杨京平, 陈杰. 计算机模拟渍水时期及持续时间对春玉米生长及产量的影响. *生物数学学报*, 16(3):253-261, 2001.
- [13] 郭恩亮, 张继权, 孙仲益, 等. 农业洪涝灾害风险评估研究综述: 中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会, 中国内蒙古呼和浩特, 2014.
- [14] 郭恩亮, 周沫, 张继权, 等. 基于Copula函数的长春市暴雨联合分布与特征分析. *灾害学*, 30(4):173-177, 2015.
- [15] Tiwari N, Singh S B. Analysis of a Risky Two Unit System under Marked Process Incorporating Two Repairmen with Vacations. *The Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 5(4):200-214, 2015.
- [16] Liu D, Wang D, Wang Y. Eutrophication Hazard Evaluation Using Copula-Cloud. *The Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 6(1):10-14, 2016.