

基于三级分层框架的农业气象灾害多风险评估

王祥, 淮建军

(西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100)

摘要: 农业气象灾害多风险评估对于防灾减灾、制定风险对策具有重要意义。根据 1980—2015 年陕西省农业气象灾害年度统计资料和 2015—2018 年农户调研数据, 运用贝叶斯网络、贝叶斯分层模型(BHM)等多风险评估方法, 分析陕西省农业气象灾害的变化趋势、灾害间相互作用以及生计资本对于不同作物脆弱性的影响。结果表明: (1) 1980—2015 年陕西省洪涝的灾害率和灾害强度显著下降, 斜率分别为 0.17%、0.7%, 冷冻的灾害率显著上升, 斜率为 0.25%, 干旱和冰雹灾害无明显变化; (2) 干旱和洪涝显著影响其他灾害, 各种灾害之间存在复杂的相互作用; (3) 增加有效灌溉面积率、农作物种植面积、农村用电量和农用磷肥施用折纯量等生计资本指标, 可以显著降低脆弱性。本文有助于提高农户对农业气象灾害的适应能力, 为预防和治疗农业气象灾害提供决策参考。

关键词: 三级分层框架; 多风险评估; 多重灾害; 多重脆弱性

近年来, 高温、干旱、洪水和冰雹等日益严重的农业气象灾害频繁发生, 给人类社会、经济发展带来严重影响。2018 年, 农业气象灾害以及其他自然灾害共造成我国 1.3 亿人次受灾, 农作物受灾面积 2081.43 万 hm^2 , 其中绝收 258.5 万 hm^2 , 直接经济损失 2644.6 亿元^[1]。多灾多难给人类生计、自然和社会环境带来巨大的破坏, 多种灾害的相互作用既可能扩大也可能减少它们带给农业的损失。因此, 各级政府和相关主体面对多灾频发和相互作用的风险采取了各种适应和管理措施。但是现实中, 地方政府人员难以制定多风险管理方案, 农户仅仅针对单一灾害采取相关措施。可见, 采取多风险管理措施, 对于防灾减灾和农户可持续生计发展具有重要意义^[2-4]。

针对多风险管理措施制定困难的原因, 国内外学者进行了大量的研究。比如, 选取山洪、泥石流和滑坡三种主要自然灾害为评价对象, 从危险性、易损性两个方面, 致灾因子、孕灾环境、承灾体、防灾减灾能力四个角度建立评价体系, 基于 ArcGIS 10.1 空间分析技术进行多灾种风险耦合分析, 利用风险矩阵完成综合评估^[5]。研究表明, 灾害不是独立发生的, 而是强烈耦合的, 多风险管理措施的制定需要进行精确的多风险评估^[6], 比如多灾害作用对桥梁设计方法提出更加精确的要求^[7]。随着多灾害、灾害链等现象的不断频发, 使用跨学科和协作的方法来减少灾害所带来的风险显得愈加必要^[8]。一些学者从多个角度来考虑导致灾害、脆弱性和风险增加的因素, 对灾害的种类、频率和强度特征进行分析与建模, 认为多风险评估应从对多种灾害的单个风险评估的加总过渡到对多灾害的综合风险评估^[9,10]。多风险评估是一个动态过程, 涉及到跨尺度层面上若干关联因素的交互作用^[11]。然而, 对农业气象灾害之间的交互复杂性进行建模分析时, 不同灾害的影响

收稿日期: 2019-04-11; 修订日期: 2019-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(71473196); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA023070201-08)

作者简介: 王祥(1995-), 男, 河南新郑人, 硕士, 主要从事管理系统工程研究。E-mail: 942774363@qq.com

通讯作者: 淮建军(1974-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 主要从事气候变化经济学研究。

E-mail: h2009j.happy@163.com

从一个尺度转换为另一个尺度，这在理论和方法分析方面具有相当大的难度。采用一些纵向的评估方法（队列和趋势研究），可以更好地分析多灾害的动态作用^[12,13]。

近期少数研究开始关注农业气象灾害的多风险评估，但由于缺少处理多维和相互依赖灾害的关系框架，层叠、级联和链效应研究不够深入，如何科学评估农业气象灾害的多风险问题依然没有得到有效解决^[14]。尽管农业气象灾害多风险评估的研究备受重视，但现有研究仍然存在以下不足：一是灾害影响的过程及其分析指标不具有直接可比性。目前多风险评估文献，主要是通过标准化的方法来消除量纲以保证可比性，比如将灾害的强度分类，连续指数模型等方法的应用^[15]。但是这些方法在确定灾害特征分类标准时的主观性较强，往往会由于研究区域的不同而产生较大的差异。二是灾害间的相互作用过程、触发级联效应以及耦合机制不明确。在具体的农业生产过程中，各种不同的灾害频发。如果仅仅对单一灾害的风险进行评估，并简单相加，会掩盖灾害间的级联效应与耦合机制^[16]。目前，风险矩阵定性分析试图解释级联效应、耦合机制，但是由于缺乏量化分析，不能将灾害间的相互作用纳入可靠的大规模预测系统之内，尚需开发更深入的数据驱动方法。三是忽略了尺度差异。由于不同农业气象灾害的影响范围、过程以及持续时间等有较大差异，多风险评估需要选择合适的空间与时间尺度，忽略了尺度差异会造成若干不相关区域之间灾害相互影响的问题^[17]。大量研究试图从模型与算法的角度来解决尺度选择不合理导致的不相关问题，比如时空重排扫描、时空聚类等方法^[18]。但是，这些模型与算法是否能从根本上解决此类问题，尚需进一步的理论分析与实践检验。

本文根据1980—2015年陕西省农业气象灾害年度统计资料和2015—2018年农户调研数据，运用贝叶斯网络、贝叶斯分层模型（BHM）等多风险评估方法，分析陕西省农业气象灾害的变化趋势，灾害间相互作用以及生计资本对于不同作物脆弱性的影响。主要贡献是为多种灾害的多风险评价提供定量化的分析方法和框架：第一，以关键风险要素为中心，研究环境与社会经济系统之间的相互作用，提出对农业气象灾害进行评估的三级分层框架；第二，以调查区域所发生灾害的频次与强度以及农作物产量的损失比例为研究对象，运用贝叶斯网络对于灾害间的相互作用进行定量分析；第三，基于贝叶斯分层模型（BHM）分析选定的生计资本指标对于不同作物脆弱性的影响，以期对多风险管理措施的制定提供理论与实证支持。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 三级分层框架

尽管应用多风险评估框架来分析多种灾害并发的场景是国际公认的，但如何评估多种灾害影响的组合并整合有效的策略方案仍不明确^[19]。因此，本文依据多风险评估相关理论，提出对农业气象灾害进行多风险评估的三级分层框架（图1）。三级分层框架以关键风险要素为中心，研究环境与社会经济系统之间的相互作用，重点在于分析多重灾害与多重脆弱性。一级分析是灾害特征分析，包括分析灾害的灾害率（发生概率、次数）与灾害强度（对农业生产的影响程度）及其变化趋势。二级分析采用半定量方法来识别灾害间的相互作用的过程与强度。三级分析则对多风险评估的支柱部分——多重灾害与多重脆弱性进行评估，试图量化灾害间的相互作用与不同生计资本对于脆弱性的影响。

农业气象灾害多风险评估必须考虑多重灾害与多重脆弱性这两个核心要素^[19]。脆弱性由社会生计资本与气候变化相互作用所决定，表示受灾个体应对灾害的波动性、随机

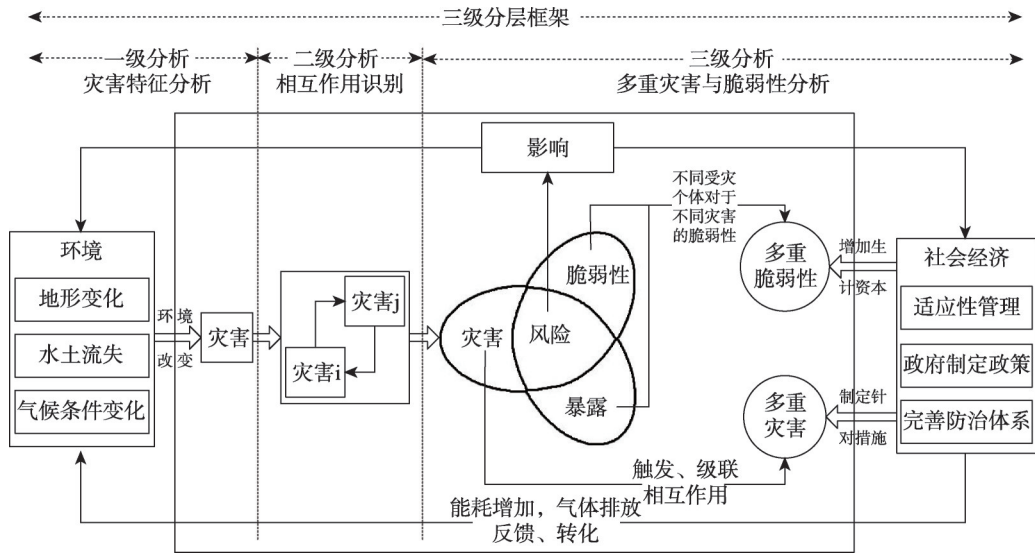


图1 评估农业气象灾害的三级分层框架

Fig. 1 A three-level hierarchical framework for assessing agrometeorological disasters

性和压力变化的趋势，是暴露、敏感性和适应能力的函数，脆弱性分析应考虑不同条件下的脆弱性与受灾个体的动态变化^[20]。多重灾害是指可能存在触发、级联等相互作用的不同灾害，多重脆弱性是指不同的受灾个体面对不同类型的灾害而可能会存在多种不同的脆弱性。在具体的农业生产实践中，由于灾害间的相互作用关系错综复杂，降低一种灾害的风险可能会增加其他灾害的风险^[12]，灾害间的相互作用对农业生产的影响可能远大于各部分作用的总和^[21]。因此，多重灾害分析是进行多风险评估所不可或缺的一环。分析多重脆弱性则应该充分考虑不同受灾个体的脆弱性与社会经济活动之间的相互影响。在整合灾害波动、周期性理论的前提下，分析人们生计及其适应选择对脆弱性的影响可能更为有效^[22]。因此，多重脆弱性评估需要仔细评估比较多重灾害引起的不同受灾个体间的脆弱性差异，并检验不同的生计资本对于脆弱性的影响^[23]。

1.2 研究区概况

陕西省位于中国内陆腹地，从北到南跨温带、暖温带和北亚热带三个气候带。省内生态环境要素年际变化剧烈，各种农业气象灾害频繁发生，主要有洪涝、干旱、风雹和冷冻（包括低温连阴雨、低温冷害、霜冻、寒潮）。整体来讲，陕北、关中地区最易发生干旱，陕南地区的洪涝灾害频发。同时由于秦岭横跨陕西省，省内气候条件较为多变，陕北、关中和陕南地区的年平均气温呈现上升的趋势，陕北地区上升的幅度最大；年平均降水量则具有鲜明的区域特征，秦岭以南的长江流域占到全省降水量的71%^[24]。

1.3 数据来源

本文从中华人民共和国国家统计局的省级年度数据（<http://www.stats.gov.cn>）以及陕西省民政厅的灾情信息纪录（<http://shaanxi.mca.gov.cn/>）中选取了陕西省1980—2015年间农作物的受灾面积和成灾面积等数据，用于分析灾害特征。从《中国统计年鉴（1980—2015）》中选取了陕西省1980—2015年间的自然、物质、金融、人力等四大资本指标的数据，用于生计资本对于作物脆弱性的影响分析（表1）。

在进行多重灾害分析时，需要考虑所选择的空间与时间尺度。因此为了避免尺度选

表1 变量选取及其定义

Table1 Variable selection and definition

	变量名	变量定义
自然资本	有效灌溉面积率	省有效灌溉面积/khm ² /省农作物种植面积/khm ²
	农作物种植面积	实际播种或移植有农作物的面积/khm ²
物质资本	农业机械总动力	用于农业的各种动力机械的动力总和/10 ⁴ kW
	农村用电量	为农村居民生活服务的各种用电量/10 ⁸ kWh
	农用氮肥施用折纯量	用于农业生产的氮肥数量/10 ⁴ t, 施用量要求按折纯量计算
	农用磷肥施用折纯量	用于农业生产的磷肥数量/10 ⁴ t, 施用量要求按折纯量计算
	农用钾肥施用折纯量	用于农业生产的钾肥数量/10 ⁴ t, 施用量要求按折纯量计算
	农用复合肥施用折纯量	用于农业生产的复合肥数量/10 ⁴ t, 施用量要求按折纯量计算
金融资本	农村居民家庭人均纯收入	按农村人口平均的农民纯收入/元
	农业GDP	以货币形式表现的农业全部产品的总量/10 ⁸ 元
人力资本	乡村男性从业人员	在农村工作的男性人员数量/10 ⁴ 人
	乡村女性从业人员	在农村工作的女性人员数量/10 ⁴ 人
暴露	暴露指数	某种灾害年灾害率与平均灾害率的比值减1
敏感性	敏感性指数	某种作物年产量与平均产量的比值减1
脆弱性	脆弱性指数	敏感性指数与暴露指数的比值
灾害特征	灾害率	某种灾害的受灾面积/khm ² /农作物总耕作面积/khm ²
	灾害强度	某种灾害的成灾面积/khm ² /受灾面积/khm ²
灾害情况	灾害发生情况	灾害发生为1, 不发生为0
	作物产量减产比例	[正常年份作物产量 (0.5 kg) - 灾害发生年份作物产量 (0.5 kg)] / 正常年份作物产量 (0.5 kg)

择不合理导致不相关区域产生影响的情况, 本研究将空间尺度确定在每个农户家庭所拥有的地块, 时间尺度确定在一年内, 实地调研陕西省2015—2018年间619位农户的不同地块上受灾情况(保证每位农户有一年的数据)。在调研过程中, 调研人员经过充分培训, 将正常年份(未发生农业气象灾害)与非正常年份(发生农业气象灾害)的定义给予农户充分的解释说明, 帮助他们确定正常年份与非正常年份作物的产量, 从而计算出作物产量减产比例。

1.4 研究方法

依据陕西省不同灾害的发生频次与损失程度, 选定对农业生产有较大影响的洪涝、干旱、风雹和冷冻四种农业气象灾害来进行多风险评估。采用五点三次平滑法对于四种农业气象灾害的灾害率与灾害强度进行处理, 并分析灾害率与灾害强度的变化趋势^[25]。对于灾害率的分析结果将用于二级分析与三级分析中。

1.4.1 采用半定量化的因果矩阵法识别灾害相互作用

首先对每种灾害的灾害率(X_j)与其他三种灾害(X_i)进行多元线性回归, 用标准化系数 θ_i 来衡量计算出彼此相互作用的强度数值。灾害间相互作用强度的总和 $W = \sum \theta_i$ 。

$$X_j = \theta_0 + \sum_{i=1}^3 \theta_i X_i + \varepsilon_i (i \neq j) \quad (1)$$

$$R_{\max} = 3n(n-1) \quad (2)$$

式中: i 与 j 代表灾害种类; X 为灾害率; θ_i 表示灾害作用的强度; n 为灾害的数量; R_{\max} 为

相互作用强度总和的最大值； W 被用来判断对选定灾害的评估是否需要进行分析。依据Liu等^[26]的研究，50%的 R_{\max} 是进行第三级分析的阈值，如果 $W \geq 50\%R_{\max}$ ，那么就推荐进行第三级分析。

1.4.2 多重灾害分析

这里运用贝叶斯网络对被调查农户的地块年度灾害的相互作用进行定量分析。首先对农户生计情况进行分析，然后将洪涝、旱灾、霜冻、连阴雨、高温热害、风灾和冰雹等灾害数据进行预处理后导入贝叶斯网络，选用TAN (Tree Augmented Naive Bays) 模型进行比较分析。TAN模型是朴素贝叶斯的树形依赖扩展，可以用来分析决策变量之间的相互作用关系。贝叶斯公式如下：

$$P(B_i|A) = \frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{i=1}^n P(B_i)P(A|B_i)} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中：灾害 B_i 的概率为 $P(B_i)$ ，灾害 B_i 发生条件下灾害 A 的概率为 $P(A|B_i)$ ，灾害 A 发生条件下灾害 B_i 的概率为 $P(B_i|A)$ 。

1.4.3 多重脆弱性分析

分别计算每种作物的暴露(E)、敏感性(S)和脆弱性(V)。参照Huai^[27]的脆弱性计算方法，暴露是指灾害的发生情况，通常用灾害指标来描述，这里用灾害率来表示[式(4)]；敏感性是指各种作物对灾害的反应程度，用作物产量来衡量[式(5)]；脆弱性(V)是暴露和敏感性的函数[式(6)]。公式如下：

$$E_{ik} = \frac{H_{ik}}{\bar{H}} - 1 \quad (4)$$

$$S_{ck} = \frac{Y_{ck}}{\bar{Y}} - 1 \quad (5)$$

$$V_{ick} = \frac{S_{ck}}{E_{ik}} \quad (6)$$

式中： c 是作物种类(粮食、小麦、玉米、谷子和大豆)； k 是年份； H_{ik} 是 i 灾害在 k 年的灾害率； \bar{H} 是 i 灾害的平均灾害率； Y_{ck} 是 c 作物在 k 年的产量(万t)； \bar{Y} 是 c 作物的平均产量(万t)。采用贝叶斯分层模型(BHM)来分析选定的生计资本指标对脆弱性的影响。BHM的模型结构由下式给出：

$$V \sim N(\mu, \sigma^2) \mu = \beta_0 + \sum_{i=1}^{10} \beta_i x_i + \varepsilon \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \beta_0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_{10} \end{pmatrix} \sim MVN \left(\begin{pmatrix} b_0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{10} \end{pmatrix}, \Sigma \beta \right) \quad \varepsilon \sim N(0, \tau^2) \quad (8)$$

式中： V 表示计算出的脆弱性指数； $x_1 \sim x_{10}$ 分别是选定的生计资本指标； β_0 是回归截距； $\beta_1 \sim \beta_{10}$ 分别是生计资本指标的回归斜率； ε 是回归截距的残差； MVN 表示多元正态分布； N 表示正态分布。

2 结果分析

2.1 陕西省农业气象灾害特征分析

从图2a、图2b可知，1980—2015年间，陕西省洪涝的灾害率显著下降，斜率为

0.17% ($P<0.05$)；干旱灾害率远大于其他三种灾害率，干旱灾害率呈现出下降趋势，其斜率为0.31%。风雹灾害率呈上升趋势，斜率为0.15%。冷冻灾害率显著上升 ($P<0.05$)。

从图2c、图2d可知，1980—2015年间，陕西省洪涝的灾害强度显著下降，其斜率为0.7% ($P<0.05$)。干旱灾害强度在1980—1997年间整体在20%到80%之间波动。2000年以后，风雹灾害强度波动较大，在2001年达到了最大值。冷冻灾害强度呈上升趋势，其斜率为0.5%。

综上，陕西省洪涝的灾害率和灾害强度显著下降，冷冻的灾害率显著上升，干旱和风雹的灾害率与灾害强度无显著变化。

2.2 陕西省多种灾害间相互作用的半定量化分析

如图3所示，以因果矩阵对角线上的灾害种类（如洪涝等）为起点，顺时针方向，从右向下看是该种灾害对其他灾害的作用，从左向上看是其他灾害对于该灾害的反作用。单元格中的数字为灾害间相互作用强度 θ_i 。为了简化，令 $0=[0, 0.4)$ ， $1=[0.4, 0.6)$ ， $2=[0.6, 0.8)$ ， $3=[0.8, 1]$ ，因此 $|\theta_i| \in \{0, 1, 2, 3\}$ 。

依次将每一行、每一列的数值相加，发现干旱灾害对于其他灾害的影响最大，洪涝灾害次之。干旱灾害具有影响范围大、持续时间长的特点，洪涝灾害往往具有一定的突发性，二者对于生态环境的影响巨大。风雹和冷冻对于其他灾害的影响较小。风雹灾害由于持续时间短，很难与其他灾害产生一些联系。冷冻灾害一般发生在春冬两季，与洪涝和干旱基本不在同一时间段内发生。计算得出因果矩阵的相互作用强度总和 W 为26，大于 $50\%R_{max}=18$ （36的50%）。因此，需要进行三级分析。

2.3 灾害间相互作用定量化分析

对实地调研的数据进行分析，发现调查的农户主要集中在关中地区，共有14个县，

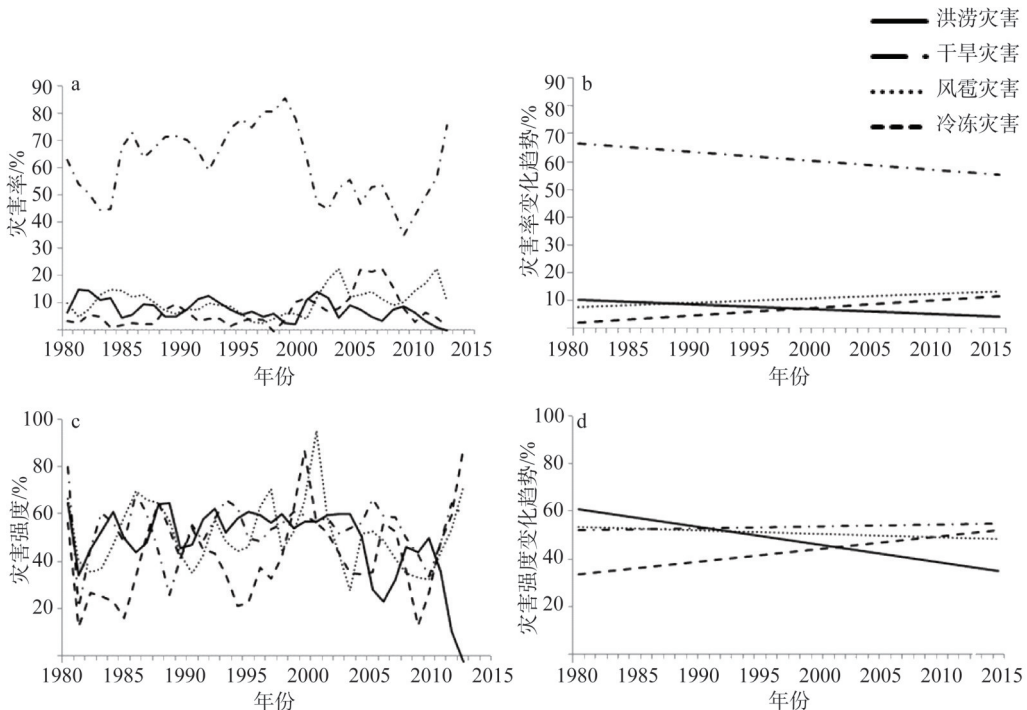


图2 1980—2015年陕西省各种灾害的灾害率、灾害强度变化趋势

Fig. 2 Trends of rate and intensity of various disasters in Shaanxi province from 1980 to 2015

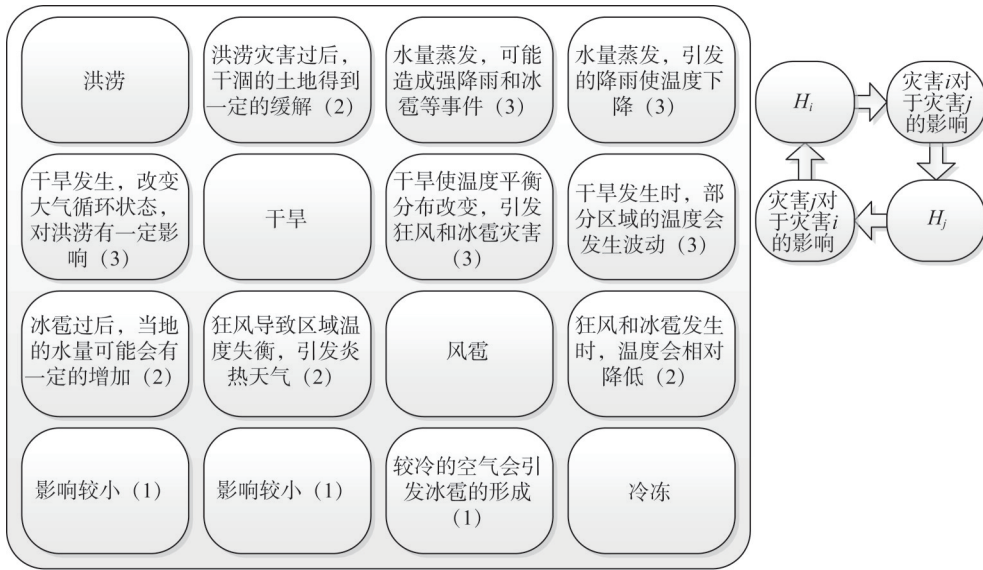


图3 分析洪涝、干旱、风雹和冷冻灾害的因果矩阵

Fig. 3 Analysis of causal matrices for floods, droughts, hail and freezing disasters

310户农户, 其他9个县分布在陕北陕南地区, 共有309户农户。同时, 对于农户的基本特征进行了一定分析, 发现71.4%的农户家庭人口数在5位以下 (包括5位), 77.7%的农户地块数在5块以下 (包括5块), 81.3%的农户与农贸市场的距离在10 km以内。

将实地调研数据导入IBM SPSS Modeler 18.0软件, 实现贝叶斯网络算法。以各种灾害为输入变量, 以减产比例为目标变量, TAN模型的运行结果如图4所示, 高温热害被从模型中剔除。每个节点代表一个变量, 节点之间的有向弧段反映了变量间的依赖关系。指向节点X的所有节点称为X的父节点, X作为子节点对其所有的父节点产生影响。例如, 减产比例与霜冻节点指向连阴雨, 即连阴雨对霜冻和减产比例产生影响。从模型中还可得出各输入变量的重要性, 即影响减产比例的依次是霜冻 (43%)、旱灾 (30%)、连阴雨 (16%)、风灾 (5%)、洪涝 (3%) 和冰雹 (2%)。

另外, 贝叶斯网络模型用条件概率表示输入变量间关系的强度, 一个节点在其父节点不同取值组合的条件下, 取不同属性值的概率, 就构成了该节点的条件概率。条件概率表明了节点对其父节点的影响程度。TAN模型中所有的条件概率如表2所示。如旱灾的父节点是洪涝与减产比例, 当洪涝发生, 减产比例分别等于1、2、3、4、5时, 旱灾发生的条件概率依次为0.23, 0.23, 0.08, 0.08和0.02, 条件概率相对较低; 当洪涝不发生, 减产比例分别等于1、2、3、4、5时, 旱灾发生的条件概率依次为0.08, 0.53, 0.45, 0.43和0.33, 条件概率相对较高, 表明在洪涝灾害不发生时, 旱灾对于总体的减产情况影响更加明显。

2.4 生计资本对于脆弱性的影响分析

采用lmer函数拟合的BHM模型回归结果如

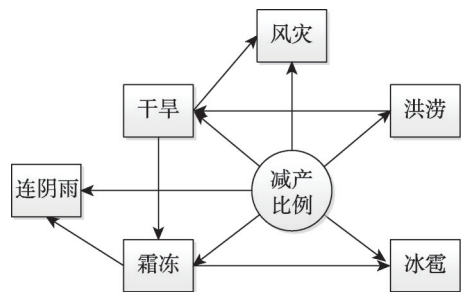


图4 贝叶斯网络模型示意图

Fig. 4 Bayesian network model diagram

表2 贝叶斯网络模型条件概率
Table 2 Bayesian network model conditional probability

节点	父节点	条件概率=1	条件概率=1				
			Y=1	Y=2	Y=3	Y=4	Y=5
洪涝	减产比例Y	0.01	0.03	0.05	0.01	0.07	
旱灾	洪涝	减产比例Y	0.23	0.23	0.08	0.08	0.02
	无洪涝	减产比例Y	0.08	0.53	0.45	0.43	0.33
霜冻	旱灾	减产比例Y	0.07	0.12	0.11	0.07	0.19
	无旱灾	减产比例Y	0.05	0.43	0.52	0.61	0.52
连阴雨	霜冻	减产比例Y	0.16	0.10	0.06	0.15	0.14
	无霜冻	减产比例Y	0.02	0.10	0.08	0.18	0.28
风灾	旱灾	减产比例Y	0.07	0.06	0.10	0.05	0
	无旱灾	减产比例Y	0.03	0.20	0.05	0.03	0.05
冰雹	霜冻	减产比例Y	0	0.03	0.02	0.03	0
	无霜冻	减产比例Y	0.01	0.08	0.16	0.11	0.02

注：减产比例Y取值为1、2、3、4、5时，分别对应减产0~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%、80%~100%。

表3所示。由于选定的生计资本指标对于玉米的脆弱性无显著影响，故将玉米从回归结果中剔除。从洪涝和干旱灾害来看，粮食、小麦和谷子的脆弱性受到生计资本指标的影响较小；大豆对于洪涝和干旱灾害的脆弱性受到农村用电量、有效灌溉面积率、农作物种植面积、农村居民家庭人均纯收入和农用磷肥施用折纯量的显著影响。然而，从风雹和冷冻灾害来看，选定的生计资本指标对于作物的脆弱性影响十分明显；增加有效灌溉面积率、农作物种植面积、农村用电量和农用磷肥施用折纯量等指标均能显著降低脆弱性。

3 结论与讨论

3.1 结论

以陕西省为例，本文提出了基于三级分层框架的农业气象灾害多风险评估方法：一是定性分析灾害特征，二是半定量分析灾害相互作用，三是定量分析多重灾害和多重脆弱性以及生计资本对灾害脆弱性的影响。应用陕西省1980—2015年间农作物受灾以及自然、物质、金融、人力等四大资本数据，以及陕西省2015—2018年间619位农户的调研数据，分析得到以下结论：

(1) 洪涝的灾害率和灾害强度显著下降，斜率分别为0.17%、0.7%；冷冻的灾害率显著上升，斜率为0.25%，干旱和风雹灾害无明显变化。

(2) 干旱和洪涝对于其他灾害的影响显著，各种灾害之间存在复杂的相互作用。各种灾害对农业生产影响的重要性依次为：霜冻、干旱、连阴雨、风灾、洪涝和冰雹。

(3) 通过增加生计资本来降低脆弱性时，应尽可能地选择有效灌溉面积率、农作物种植面积、农村用电量和农用磷肥施用折纯量等指标。

据此，陕西省农业气象灾害多风险管理应着重采取缓解冷冻和干旱灾害的措施，包括完善干旱灾害防治体系结构，加大对于冷冻灾害预防工作的投入与激励；制定灾后响应工作的规章制度，并适当培训农户以提高应对灾害的能力；同时结合当地实际情况增加部分生计资本，以降低灾害所造成的损失。

表3 BHM模型结果

Table 3 BHM model results

脆弱性	生计资本									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
粮食	洪涝									
	干旱									
	风雹			18.85*						
	冷冻	-0.18*	-0.18*	-0.36*				-0.33**	0.45*	
小麦	洪涝									
	干旱									
	风雹			-33.59*	30.01*					
	冷冻									
谷子	洪涝									
	干旱			58.05*						
	风雹									
	冷冻	0.75*	-0.48*				-1.24*	-1.10*		1.10*
大豆	洪涝					-1.38*				
	干旱	-2.88*	-2.63*		-6.64*			4.48*		
	风雹				28.13*					
	冷冻	-0.50	0.69**							

注：X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8、X9、X10分别是有效灌溉面积率、农作物种植面积、农业机械总动力、农村居民家庭人均纯收入、农业GDP、农村用电量、农用氮肥施用折纯量、农用磷肥施用折纯量、农用钾肥施用折纯量、农用复合肥施用折纯量。表格中的数字表示生计资本指标对脆弱性指数的回归系数。“*”、“**”、“***”分别表示在0.01、0.05、0.1水平上显著。

3.2 讨论

目前国内外对于多风险评估的研究已逐渐深入，一些多风险评估框架与模型分析方法正在为越来越多的人所熟知。Kloos等^[28]提出基于系统动力学的多风险评估框架，在系统动力学的基础上，考虑到多种灾害之间的相互作用，并考虑到脆弱性水平的相互作用。Bayliss等^[29]将风险和风险管理概念结合在一起，描述了在灾害层面上环境与社会系统之间的相互作用和耦合过程。Bathrellos^[30]基于多标准分析和GIS生成了多灾种地图，用来分析不同来源的数据，开发灾害分析模型以及估算研究区域的脆弱性和风险。尽管上述框架与模型方法都可以运用到多风险评估中来，但是由于未能定量分析灾害间的相互作用过程、触发级联效应以及耦合机制，始终不能清晰把握多灾害之间的相互作用。

因此，本文通过联合分析与量化所有影响承灾体的气象风险因素，比较不同来源的灾害，对灾害间的级联效应与耦合机制进行定量分析，对于制定风险管理战略与农户适应性管理对策具有重大意义。文中运用多风险评估框架探讨了农业气象灾害的特征及变化趋势，结果表明：陕西省洪涝的灾害率和灾害强度呈显著下降趋势，冷冻的灾害率呈显著上升趋势，干旱和风雹的灾害率与灾害强度无显著变化趋势。张丽艳等^[31]研究表明在引起陕西省洪涝灾害发生的所有因素中，较重要的降水量因素整体呈现出下降趋势；屈振江等^[32]认为陕西省部分地区处于花期冻害的易发区，冻害发生频率相对较高。本文对四种灾害的特征分析很好地佐证了前人研究结论。此外，研究发现干旱和洪涝灾害对于其他灾害的影响显著。这与于小兵等提出的旱涝灾害对生态环境影响巨大的结论相符^[33]。

在多风险评估部分中，对实地调研数据进行分析后可以发现霜冻和干旱灾害对于农业生产的巨大影响，这是由于陕北和关中地区近些年来旱灾和霜冻频繁发生，农户未能

有有效的应对方案。同时,各种灾害间的相互作用对于减产比例的影响也得到了定量的表示,这将有助于在多灾害的实际生产环境中制定灾害的预防和治理方案^[34]。多重脆弱性的分析表明在各类作物中,仅仅只有大豆对洪涝与干旱灾害的脆弱性受到选定生计资本的显著影响。这与杨浩等^[35]关于提高教育水平、劳动人数和固定资产等生计资本可以减少农户因气象灾害而带来的脆弱性不符,可能的原因是,旱涝灾害对农业生产的影响巨大,而仅仅增加部分生计资本很难降低整体脆弱性。然而,粮食、小麦、谷子和大豆对风雹与冷冻的脆弱性却受到选定生计资本的显著影响。风雹和冷冻灾害尽管对作物的影响很大,但由于各种防冻、防雹措施的开发与应用,鼓励农户采用新技术并适当提高生计资本能够很好地降低脆弱性。孙特生等^[36]研究表明,针对性地来提高农户的生计资本,能够避免或减轻灾害所造成的损失。此外,根据不同生计资本对脆弱性的显著影响,应尽可能地增加有效灌溉面积率、农作物种植面积、农村用电量和农用磷肥施用折纯量等指标来降低脆弱性。

本文探讨农业多风险评估的现实意义在于:第一,多风险评估是进行多风险管理的首要前提,对于进行更详细的风险分析和策划农业气象灾害的防治方案至关重要;第二,多风险评估能够定量分析灾害间的相互作用关系,为更加有针对性的综合治理提供依据;第三,多风险评估考虑到脆弱性在不同受灾要素中的动态变化,为制定适应性管理措施提供参考。此外,本文提出的三级分层多风险评估框架为一些基于指标或过程的灾害风险评估和管理工作指出了实践方向。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2018.]
- [2] KREIBICH H, BUBECK P, KUNZ M, et al. A review of multiple natural hazards and risks in Germany. *Natural Hazards*, 2014, 74(3): 2279-2304.
- [3] KAPPES M S, KEILER M, ELVERFELDT K V, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Natural Hazards*, 2012, 64(2): 1925-1958.
- [4] FURLAN E, TORRESAN S, CRITTO A, et al. Spatially explicit risk approach for multi-hazard assessment and management in marine environment: The case study of the Adriatic Sea. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1008-1023.
- [5] 王嘉君, 何亚伯, 杨琳, 等. 基于 GIS 的山区村镇多灾种耦合风险评估. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(1): 102-112. [WANG J J, HE Y B, YANG L, et al. Comprehensive multi-hazard risk assessment of villages and towns in mountain areas based on GIS. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(1): 102-112.]
- [6] AGHAKOUCHAK A, HUNING L S, CHIANG F, et al. How do natural hazards cascade to cause disasters?. *Nature*, 2018, 561(7724): 458-460.
- [7] 张喜刚, 田雨, 陈艾荣. 多灾害作用下桥梁设计方法研究综述. *中国公路学报*, 2018, 31(9): 11-23. [ZHANG X G, TIAN Y, CHEN A R. Review of bridge design method for multiple hazards. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(9): 11-23.]
- [8] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 1-12. [SHI P J, LYU L L, WANG M, et al. Disaster system: Disaster cluster, disaster chain and disaster compound. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 1-12.]
- [9] SAHOO B, BHASKARAN P K. Multi-hazard risk assessment of coastal vulnerability from tropical cyclones: A GIS based approach for the Odisha coast. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 1166-1178.
- [10] WANG R, ZHANG J, GUO E, et al. Integrated drought risk assessment of multi-hazard-affected bodies based on copulas in the Taoerhe Basin, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 135(1-2): 577-592.
- [11] PESCAROLI G, ALEXANDER D. Critical infrastructure, panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters. *Natural Hazards*, 2016, 82(1): 175-192.
- [12] FAWCETT D, PEARCE T, FORD J D, et al. Operationalizing longitudinal approaches to climate change vulnerability

- assessment. *Global Environmental Change*, 2017, 45: 79-88.
- [13] EIDSVIG U M K, KRISTER K, VIDAR V B. Assessing the risk posed by natural hazards to infrastructures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 17(3): 481-504.
- [14] 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*, 2015, (1): 1-19. [WANG C Y, ZHANG J Q, HUO Z G, et al. Prospects and progresses in the research of risk assessment of agro-meteorological disasters. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, (1): 1-19.]
- [15] FORZIERI G, FEYEN L, RUSSO S, et al. Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change*, 2016, 137(1-2): 105-119.
- [16] TYAGUNOV S, VOROGUSHYN S, JIMENEZ C M, et al. Multi-hazard fragility analysis for fluvial dikes in earthquake and flood prone areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(9): 2345-2354.
- [17] 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. *自然资源学报*, 2003, 18(6): 692-703. [HUO Z G, LI S K, WANG S Y, et al. Study on the risk evaluation technologies of main agrometeorological disasters and their application. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(6): 692-703.]
- [18] 唐建波, 邓敏, 刘启亮. 时空事件聚类分析方法研究. *地理信息世界*, 2013, (1): 38-45. [TANG J B, DENG M, LIU Q L. On spatio-temporal events clustering methods. *Geomatics World*, 2013, (1): 38-45.]
- [19] GALLINA V, TORRESAN S, CRITTO A, et al. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168: 123-132.
- [20] JURGILEVICH A, RÄSÄNEN A, GROUNDSTROEM F, et al. A systematic review of dynamics in climate risk and vulnerability assessments. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(1): 013002.
- [21] BROWN I. Assessing climate change risks to the natural environment to facilitate cross-sectoral adaptation policy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2018, 376(2121): 20170297.
- [22] 陈启亮, 谢家智, 张明. 农业自然灾害社会脆弱性及其测度. *农业技术经济*, 2016, (8): 94-105. [CHEN Q L, XIE J Z, ZHANG M. Social vulnerability of agricultural natural disasters and its measurement. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2016, (8): 94-105.]
- [23] 李文龙, 石育中, 鲁大铭, 等. 北方农牧交错带干旱脆弱性时空格局演变. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 127-140. [LI W L, SHI Y Z, LU D M, et al. The spatio-temporal evolution of drought vulnerability in the ecotone between agriculture and animal husbandry in the north of China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 127-140.]
- [24] 徐小钰, 朱记伟, 解建仓, 等. 陕西省 1470—2012 年旱涝灾害时空分布特征及演变趋势分析. *西安理工大学学报*, 2015, (2): 231-237. [XU X Y, ZHU J W, JIE J C, et al. Analysis of spatial and temporal distribution characteristics and evolution trend of drought and flood disasters from 1470 to 2012 in Shaanxi province. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, (2): 231-237.]
- [25] 武炜, 陈标, 吴剑锋, 等. 基于五点三次平滑算法的入库流量反推研究. *水利水电技术*, 2013, 44(12): 100-102. [WU W, CHEN B, WU J F, et al. Study on reverse deduction of reservoir-inflow based on cubical smoothing algorithm with five-point approximation. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, 44(12): 100-102.]
- [26] LIU Z, NADIM F, GARCIA-ARISTIZABAL A, et al. A three-level framework for multi-risk assessment. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2015, 9(2): 59-74.
- [27] HUAI J J. Integration and typologies of vulnerability to climate change: A case study from Australian wheat sheep zones. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33744.
- [28] KLOOS J, ASARE-KYEI D, PARDOE J, et al. Towards the development of an adapted multi-hazard risk assessment framework for the West Sudanian Savanna zone. *Acta Oto Laryngologica*, 2015, 93(386): 193-195.
- [29] BAYLISS P, FINLAYSON C M, INNES J, et al. An integrated risk-assessment framework for multiple threats to floodplain values in the Kakadu region, Australia, under a changing climate. *Marine and Freshwater Research*, 2018, 69(7): 1159-1185.
- [30] BATHRELLOS G D, SKILODIMOU H D, CHOUSIANITIS K, et al. Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 119-134.
- [31] 张丽艳, 杨东, 薛双奕, 等. 陕西省降水特征及其对旱涝灾害的影响. *中国农学通报*, 2017, 33(21): 126-133. [ZHANG L Y, YANG D, XUE S Y, et al. Precipitation in Shaanxi: Characteristics and influences on drought and flood. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(21): 126-133.]
- [32] 屈振江, 刘瑞芳, 郭兆夏, 等. 陕西省苹果花期冻害风险评估及预测技术研究. *自然灾害学报*, 2013, (1): 219-225. [QU Z J, LIU R F, GUO Z X, et al. Study of risk assessment and prediction of apple blooming freezing injury in

- Shaanxi province. *Journal of Natural Disasters*, 2013, (1): 219-225.]
- [33] 于小兵, 卢逸群, 吉中会, 等. 近45 a来我国农业气象灾害变化特征及其对粮食产量的影响. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(10): 1700-1710. [YU X B, LU Y Q, JI Z H, et al. Change trend of agricultural meteorological disasters and the relationship with grain yield in recent 45 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(10): 1700-1710.]
- [34] GODA K, RISI R D. Multi-hazard loss estimation for shaking and tsunami using stochastic rupture sources. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 28: 539-554.
- [35] 杨浩, 庄天慧, 蓝红星. 气象灾害对贫困地区农户脆弱性影响研究: 基于全国592个贫困县53271户的分析. *农业技术经济*, 2016, (3): 103-112. [YANG H, ZHUANG T H, LAN H X. Impact of meteorological disasters on farmers' vulnerability in poor areas: Based on analysis of 53271 households in 592 poverty counties. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2016, (3): 103-112.]
- [36] 孙特生, 胡晓慧. 基于农牧民生计资本的干旱区草地适应性管理: 以准噶尔北部的富蕴县为例. *自然资源学报*, 2017, 33(5): 761-774. [SUN T S, HU X H. Grassland adaptive management in arid region based on livelihood capitals of peasants and herdsmen: A case study of Fuyun county in the north of Junggar Basin, China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 33(5): 761-774.]

Multi-risk assessment of agrometeorological disasters based on a three-level hierarchical framework

WANG Xiang, HUAI Jian-jun

(School of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The multi-risk assessment of agrometeorological disasters is of great significance for disaster prevention and mitigation and the development of risk countermeasures. According to the annual statistics of agrometeorological disasters in Shaanxi province from 1980 to 2015 and the survey data of farmers in 2015-2018, we use multi-risk assessment methods such as Bayesian network and Bayesian hierarchical model (BHM), analyze the change trend of agrometeorological disasters in the province, as well as the interactions between disasters and the impact of livelihood capital on the vulnerability of different crops. The results show that: (1) The rate and intensity of flood disasters in Shaanxi Province from 1980 to 2015 dropped significantly, with slopes of 0.17% and 0.7%, respectively, and the disaster rate of frosts increased significantly, with a slope of 0.25%, while there was no significant change in drought and hail disasters. (2) Droughts and floods significantly aggravated other disasters, and there were complex interactions between various disasters. (3) When we reduced vulnerability by increasing livelihood capital, these livelihood capital indicators, such as the ratio of effective irrigated area, crop planting area, rural electricity consumption and agricultural phosphate fertilizer application, should be selected. The study will improve the adaptability of farmers to agrometeorological disasters and provide guidance for the prevention and mitigation of agrometeorological disasters.

Keywords: three-level hierarchical framework; multi-risk assessment; multiple disasters; multiple vulnerabilities