

基于 TOPSIS 与极值理论的地区巨灾风险评估模型

刘振宗 焦鹏道 钱潇

西南大学，重庆北碚，400715；

摘要：本文首先从定性和定量的视角界定农业巨灾。农业巨灾风险既是农业风险又是巨灾风险，而不论是农业风险还是巨灾风险都具有地域差异化的特征，为了评估不同地区的巨灾风险大小和种类，本文建立了基于 TOPSIS 理论的 14 指标风险评估体系和基于极值统计理论的农业巨灾风险评估模型。

关键词：农业巨灾风险；TOPSIS；超越阈值模型；极值理论

DOI: 10. 69979/3041-0673. 25. 10. 073

近年来，数据表明，全球气候变化导致极端天气事件的发生频率与强度呈现出显著上升趋势，我国粮食生产先后经历了大冷、大暖、大旱，大涝等诸多极端灾害气候的轮番冲击。^[1]自然灾害已成为我国粮食安全最大的风险隐患。

1 基于 TOPSIS 的农业巨灾风险评估模型

自然灾害风险评估机理实质上是人类与自然环境间的相互作用关系。自然灾害系统是一个相互作用的有机整体，由孕灾环境、承灾体、致灾因子等因素组成三者一起决定了自然灾害的灾情大小也就是风险等级。我们从上述三个角度出发，选择了 15 个二级指标形成农业巨灾风险评价体系。这一指标体系的建立旨在全面衡量地区巨灾风险的情况，可以全面评估一个地区在面对自然灾害时的脆弱性和恢复能力，将有助于有效识别地区自然灾害风险，为制定科学合理的防灾减灾策略提供依据。

表 1 农业巨灾风险评价体系

目标层	一级指标	二级指标
农业风险等级评估	致灾因子的危害性	干旱受灾面积(千公顷)
		洪涝受灾面积(千公顷)
		冷冻灾害受灾面积(千公顷)
		风雹灾害受灾面积(千公顷)
		地质灾害发生次数(次)
		成灾面积占比(%)
		受灾人口(万人次)
	承载体的易损性	有效灌溉面积占比(%)
		农村居民人均可支配收入(元)
		农村低保人口占比(%)
		农林水事务支出占比(%)
		自然灾害经济损失(亿元)

孕灾环境的敏感度	年均森林覆盖率(%)
	年均建筑业增加值(亿元)
	平均人口密度(人/平方公里)

2 基于极值统计理论的农业巨灾风险评估模型

传统统计方法（包括参数和非参数估计）通常以数据均值为核心，建立在中间数据的基础上。然而，极端自然灾害（即巨灾风险）的破坏后果往往极为严重，并集中体现在分布的尾端。因此，使用这些传统方法对巨灾风险进行拟合与评估时，可能会产生较大的偏差和误差，从而难以准确衡量农业巨灾风险的大小。所以，我们进一步尝试将极值统计技术引入农业巨灾风险评估模型中，用以实现对农业灾害损失尾部分布的有效拟合。

2.1 确定农业灾害损失率

鉴于农业灾害实际损失数据的统计缺位，现行研究多采用区域产量均值作为风险评估基准，但该方法因空间异质性导致的风险对冲效应易造成损失低估。^[2]本研究创新构建多维灾损评估框架，整合民政部灾情统计三维指标：受灾 A_1 、成灾 A_2 、绝收 A_3 ，结合梯度减产系数：受灾 C_1 、成灾 C_2 、绝收 C_3 ，建立递进式计量模型：

$$G(x) = \{[(A_1 - A_2)C_1 + (A_2 - A_3)C_2 + A_3C_3]y\} / A_0y \quad (1)$$

其中 y 为农作物单位面积产量， A_0 为农作物总播种面积。为了简化研究，在此我们假定某地区不同的农作物遭受灾害损失的概率相同。

2.2 确定农业巨灾损失概率分布函数

假定 u 为农业灾害损失样本集的阈值，样本值在阈

值之上的事件（尾部事件）为农业巨灾所导致的损失，根据现代极值理论的超越阈值模型（POT），超越阈值的样本将服从广义 Pareto 分布（GPD）：

$$G(y) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\sigma}\right)^{-1/\xi}, & \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-\frac{y}{\sigma}}, & \xi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $G(y)$ 即为农业巨灾损失的概率分布函数，其中 $y = x - \mu$, $\sigma > 0$ 为尺度参数， ξ 为形状参数。

2.3 农业巨灾风险的度量

风险价值（简称 VaR）是一种用于衡量和评估资产或投资组合在特定时间段内可能面临的最大潜在损失的量化指标。它通常基于一定的置信水平 α 来计算。对于农业巨灾风险而言，由于其破坏后果严重且集中在分布尾端，传统的 VaR 方法可能无法完全捕捉极端事件的风险特征，因此我们选择结合已建立的农业巨灾损失概率分布模型来度量农业巨灾风险。^[3] VaR 的数学定义为：设 x 为描述资产组合损失的随机变量， $F(x)$ 是其概率分布函数，置信水平为 α ，则 $VaR = -\min\{x/F(x) \geq \alpha\}$ ，即

$$P(\Delta x > VaR) = 1 - \alpha \quad (3)$$

其中 Δx 为资产组合在持有期内的损失，VaR 为置信

水平 α 下处于风险中的价值。VaR 从本质上讲就是计算 $F(x)$ 在置信水平 α 下的上分位数或下分位数，因而完全能够用于农业巨灾风险的度量。

VaR 为农作物遭遇 10 年一遇（ $\alpha = 0.1$ 的上分位数）、20 年一遇（ $\alpha = 0.05$ 的上分位数）、50 年一遇（ $\alpha = 0.02$ 上分位数）以及 100 年一遇（ $\alpha = 0.01$ 的上分位数）的巨灾事件下超越阈值部分的损失大小即为 y 。进一步计算 $x = \mu + y$ 得到农作物遭遇巨灾事件下最终损失的大小，从而实现对农业巨灾风险的有效分析和评估。

3 两个农业风险评估模型的应用——湖南省的风险分析报告

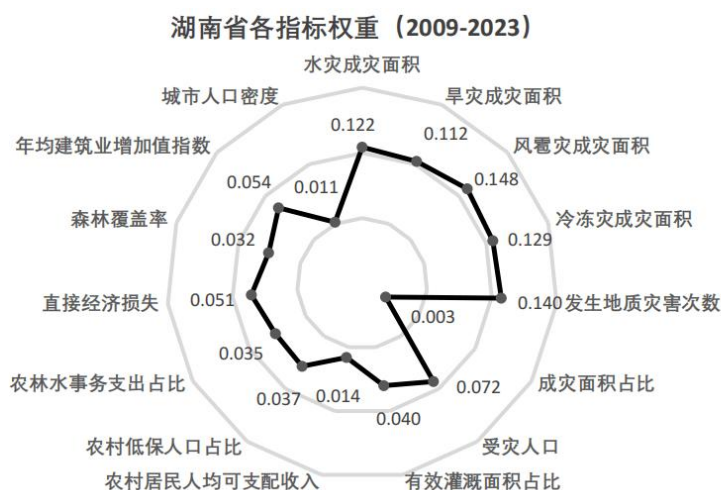
本文中的农业灾情数据来自于中国统计年鉴和中国农村统计年鉴。

3.1 基于 TOPSIS 的评估模型

由于带有权重的 TOPSIS 风险评估模型已经完成，我们尝试将我们的模型应用于特定地区，以评估其风险等级状况。由于湖南省是全国水稻主产区，农业产值占比高，风险直接影响粮食安全与经济稳定，我们选择湖南省进行进一步的分析评估。

3.1.1 计算指标权重

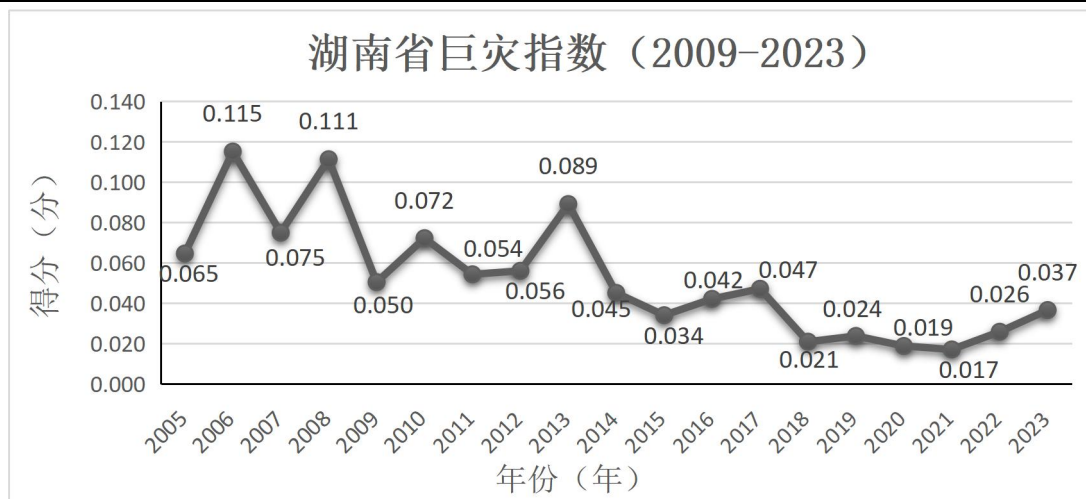
对于表 1 中所列出的 14 个二级指标，我们收集了湖南省 2009 年至 2023 年的具体数据进行测算，得到各指标权重如下图表 1：



图表 1 湖南省各指标权重图

3.1.2 计算巨灾指数

我们应用已建立的风险评估模型得出湖南省近 15 年（2009 至 2023）的巨灾指数汇总如下图表 2：



图表 2 湖南省巨灾指数折线图（2009-2023）

从湖南省巨灾指数的变化情况，我们可以发现湖南省历年巨灾指数相差较大，具有不确定性；虽然近几年因为灾害监测预警机制的逐步完善，湖南省农业巨灾指数有所降低，但是几年来呈现逐年增加趋势，可见评估湖南省巨灾风险以减缓巨灾影响很有必要。

3.2 基于极值统计理论的农业巨灾风险评估模型 (以洪涝灾害为例)

3.2.1 计算农业巨灾损失率

依据国家民政部的灾情统计方法，农作物受灾面积、成灾面积和绝收面积分别指减产 10%以上、减产 30%以上和减产 80%以上，采用中位值法确定梯度减产系数，确定 $C_1 = 0.20$, $C_2 = 0.55$, $C_3 = 0.90$ 。基于等效风险假设，根据式（1）我们可以得到湖南省 1978-2022 年农业巨灾损失数据。并且整体上看，四种灾害造成的损失率在这段时间内都存在较大的波动，没有明显的长期上升或下降趋势，其中以旱灾和洪涝灾害最为严重。

3.2.2 拟合湖南省巨灾损失分布函数

(1) 确定时间序列的最佳分布

由于旱灾导致的湖南省粮食损失率数据仅有 44 个，为解决样本不足在极大似然估计中引发误差增大的问题，我们采用蒙特卡罗模拟方法扩展湖南省粮食旱灾损失率的样本空间。在蒙特卡罗模拟中，我们选择了 7 种常用的分布模型（Beta 分布、Gamma 分布、Log-logistic 分布、Logistic 分布、Lognormal 分布、Normal 分布、Weibull 分布）作为候选模型，并通过对湖南省洪涝灾害损失率时间序列进行拟合优度检验（包括 AD 检验、K-S 检验和 Fisher 检验），来确定该时间序列的最佳拟合分布形式。模拟结果表明：Log-logistic (2P) 分布为该时间序列的最佳分布。

(2) 确定阈值

用 GPD—POT 模型拟合分布的时候，最重要的一步就是选取合理的阈值 μ ，过高的阈值会使可利用的样本容量过少，从而导致估计参数的方差偏高；而阈值过低又会使模型的渐近性得不到满足，产生有偏的估计量。

为选择合理的阈值 μ ，我们通过平均超出量函数图来确定农业灾害损失的阈值，阈值为 0.05，超过阈值的数据有 333 个。

3.2.3 参数估计及检验

在上文求得阈值 μ 的基础上，我们使用极大似然估计对广义 Pareto 分布的尺度参数 σ 和形状参数 ξ 进行估计，计算结果如表格 3 所示：

表格 2 GPD 参数估计结果

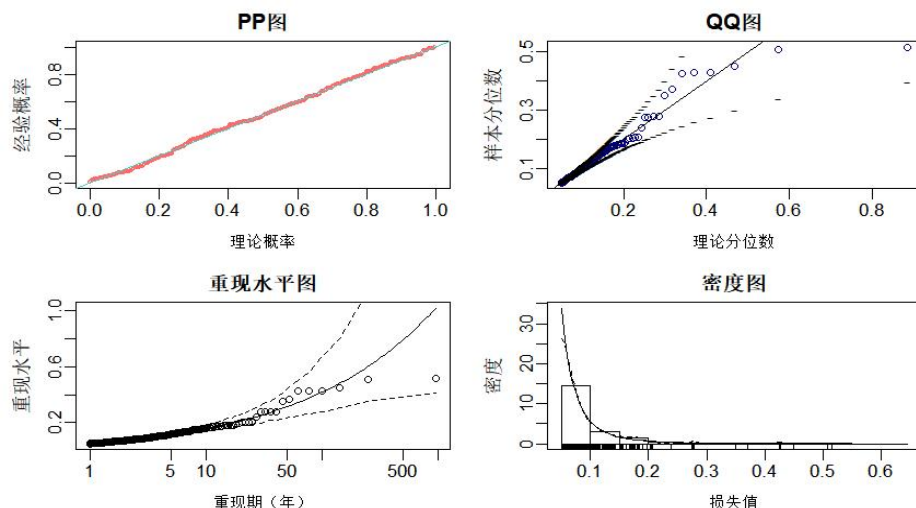
阈值	尺度参数	形状参数	超出样本量
0.05	0.02948519	0.3786873	333

把上述参数值带入式（2），可以得到我国洪涝灾害的损失概率分布函数和概率密度函数分别为（4）式和（5）式：

$$F(x) = 1 - \left[1 + \frac{0.03786873}{0.02948519} (x - 0.05) \right]^{-\frac{1}{0.03786873}} \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{1}{0.02948519} \left[1 + \frac{0.03786873}{0.02948519} (x - 0.05) \right]^{-\frac{1}{0.03786873} - 1} \quad (5)$$

根据上述参数估计结果，对 GPD—POT 模型的分布函数进行检验，分别画出了 GPD 分布函数经验值的 PP 图、QQ 图、密度函数图和重现水平图。



图表 3 GPD-POT 模型检验图

从图表 3 可以很明显的发现 PP 图与 QQ 图上的点基本上在一条直线上。GPD 分布函数的概率密度函数图中密度曲线基本上可以拟合直方图的走势。重现水平图中的点都在上下 2 条虚线之间，即都在返回水平的置信区间内。因此，通过对上述 4 个拟合图的观察，可以得到估计的参数值具有合理性，且 GPD-POT 模型的拟合效果较好。

4 度量巨灾风险

根据湖南省洪涝灾害巨灾损失概率分布函数，运用 VaR 方法计算出湖南省农业生产时遭遇 10 年一遇 ($\alpha = 0.1$)、20 年一遇 ($\alpha = 0.05$)、50 年一遇 ($\alpha = 0.02$) 以及 100 年一遇 ($\alpha = 0.01$) 的巨灾事件下的损失大小，即通过 Matlab 软件计算出巨灾损失概率分布函数在上述情形下的上分位数。结果如下表格 2。

表格 3 不同程度巨灾损失率

	10 年一遇	20 年一遇	50 年一遇	100 年一遇
损失率	0.2545	0.3393	0.4916	0.6475

通过对表格数据的统计结果可以看出，湖南省农业生产系统在抵御极端气候事件时呈现出明显的脆弱性。具体而言，遭遇 10 年一遇和 20 年一遇洪涝灾害时，粮食作物受损比例分别攀升至 25.45% 和 33.93%。当遭遇 50 年一遇和百年一遇等级的特大旱灾时，粮食生产系统遭受的破坏性影响呈现指数级增长，损失率分别达到 49.16% 和 64.75% 的惊人水平，这种量级的产能折损将导致区域粮食供应链出现结构性断裂风险。

5 总结与建议

湖南省的自然灾害，洪涝和旱灾的发生概率较高，且可能造成严重的损失，应成为湖南省风险管理的重点，同时也要注意风雹和冷冻灾害可能带来的异常损失。此外，湖南省农业生产系统在应对极端气候时显示出明显脆弱性。建议积极完善灾害数据库，实现跨部门数据联动；健全灾害监测预警机制，提高农业抗灾救灾效率，确保反应的时效性和针对性；建立农业抗灾能力建设机制，设立专项救灾基金，并大力推广适应性种植。

参考文献

[1] 徐磊, 张峭. 构建粮食生产风险管理体系, 完善粮

食安全保障长效机制[J]. 中国食物与营养, 2010(11): 4-6. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2010.11.001.
[2] 张峭, 王克. 我国农业自然灾害风险评估与区划. 中国农业资源与区划, 2011, 32(3): 32~36
[3] 徐磊. 农业巨灾风险评估模型研究[D]. 中国农业科学院, 2012.

作者简介: 刘振宗 (2004—), 男, 汉族, 山东聊城人, 本科生, 单位: 重庆西南大学数学与统计学院数学与应用数学专业, 研究方向: 数学与应用数学

焦鹏道 (2004—), 男, 汉族, 河北邢台人, 本科生, 单位: 重庆西南大学数学与统计学院数学与应用数学专业, 研究方向: 数学与应用数学

钱潇 (2003—), 女, 汉族, 重庆南川人, 本科生, 单位: 重庆西南大学数学与统计学院数学与应用数学专业, 研究方向: 数学与应用数学。

基金项目: 重庆市西南大学大学生创新创业训练计划项目《基于 TOPSIS 地区巨灾风险评估模型的保险新策略 —— 为农业繁荣撑起“保护伞”》; 项目编号: S20241063207