

# 基于 Copula 函数方法的保费定价研究

王复高<sup>1</sup>, 王红霓<sup>2\*</sup>, 王岩<sup>3</sup>, 王莹<sup>4</sup>

1. 沂水县园林环卫保障服务中心, 山东 沂水 276400

2. 山东财经大学, 山东 济南 250014

3. 亚太科技大学, 马来西亚 吉隆坡 57000

4. 临沂市人民医院, 山东 临沂 276000

DOI:10.61369/ASDS.12189

**摘要** : 农业生产面临产量波动和价格波动双重风险, 农作物收入保险作为综合性风险管理工具日益受到重视。本研究通过模拟分析和山东省大豆实证数据, 发现产量与价格的负相关性能显著降低收入保险费率。引入 Copula 函数代替传统线性相关方法, 更精确地捕捉非线性关系。发现产量与价格间的负相关能显著降低保险费率, 而正相关则大幅提高费率, 且保障水平越高, 费率上升越快。建议完善小区域数据采集, 利用风险对冲特性降低保费, 建立多层次农业保险体系, 提高农户风险管理意识。

**关键词** : 农作物收入保险; 产量价格相关性; Copula 函数

## A Study on Premium Pricing Based on the Copula Function Approach

Wang Fugao<sup>1</sup>, Wang Hongni<sup>2\*</sup>, Wang Yan<sup>3</sup>, Wang Ying<sup>4</sup>

1. Landscaping and Sanitation Service Center of Yishui, Yishui, Shandong 276400

2. Shandong University of Finance and Economics, Jinan, Shandong 250014

3. Asia Pacific University of Technology & Innovation, Kuala Lumpur, Malaysia 57000

4. Linyi People's Hospital, Linyi, Shandong 276000

**Abstract**: Agricultural production faces dual risks from yield fluctuations and price volatility. Crop income insurance has emerged as a key tool for comprehensive risk management. Using simulation analysis and empirical soybean data from Shandong Province, this study shows that the negative correlation between yield and price significantly reduces insurance rates. By applying the Copula function instead of traditional linear methods, non-linear relationships are captured more accurately. Results indicate that negative yield-price correlation lowers rates, while positive correlation increases them, especially at higher coverage levels. Policy recommendations include improving small-area data collection, leveraging risk-hedging to lower premiums, building a multi-level insurance system, and strengthening farmers' risk management awareness.

**Keywords**: crop income insurance; yield-price correlation; Copula function

## 引言

农作物收入保险的保险标的是农户从事农业生产活动时预期取得的收入。其基本结构是“价格保险+产量保险”, 既保护农户面临的市场价格下跌风险, 又保护农民在农业生产中面临的减产风险。中央一号文件自2016年起已连续六年对建立农业收入保险制度做出重要指示和部署, 目前已成为我国农业支持保护政策的聚焦点<sup>[1]</sup>。2018年我国全面启动主要粮食作物的农作物收入保险试点工作, 2019年提出计划在2022年基本建立契合农民风险保障需求且适应农业现代化发展的多层次农业保险体系。农作物收入保险相比传统农业保险、区域产量保险、农作物价格保险等, 在全面保障农民面临的农作物市场价格和产量不确定性方面具有现实意义。

作者简介:

王复高(1981—), 男, 沂水县园林环卫保障服务中心中级经济师(沂水276400);

王莹(1981—), 女, 临沂市人民医院副研究员(临沂276000);

王岩(2000—), 男, 马来西亚亚太科技大学硕士研究生。

通讯作者: 王红霓(1996—), 女, 山东财经大学统计与数学学院博士研究生(济南250014)。

注: 作者按姓氏排序, 同等贡献。

## 一、文献综述

农作物保险是农业风险管理的重要手段，对稳定农户收入、推动农业可持续发展具有积极作用。然而，农户普遍对农作物保险的认知不足，且受到教育程度、年龄等因素的显著影响。研究发现，农户对收入保险的支付意愿明显高于现行保费水平，说明收入保险仍存在较大推广和优化空间<sup>[2]</sup>。保险产品的设计需充分考虑农作物产量、市场价格的波动性及二者之间的相关性，传统风险度量方法（如基于矩和分位点的风险度量）为费率厘定提供了重要依据<sup>[3]</sup>。部分学者构建了基于分位点的精细化风险测度模型，指出将产量与价格的相关性纳入风险评估，有助于提高保险费率的精准度<sup>[4-5]</sup>。

同时，农业保险不仅能帮助农户转移风险，也可推动生产要素的优化配置，促进农业现代化。农户的风险认知水平与自身抗险能力同样是影响保险需求和费率设计的重要因素。相关实证研究表明，风险认知、经济压力与土地退出决策密切相关，这从侧面验证了风险管理在农作物收入保险中的核心地位<sup>[6]</sup>。此外，已有研究从更宏观的经济视角提供了重要支撑，例如基于时间序列和截面数据分析发现，外部经济环境会显著影响农村家庭经济行为及农业投入决策<sup>[7]</sup>；而耕地保护与整治政策研究强调了政策环境变化对农业收益稳定性的调控作用<sup>[8]</sup>。自然资源核算框架的相关探讨则进一步提供了农业风险评估的宏观视角<sup>[9]</sup>。

此外，国内外学者也围绕农业保险运行机制与风险分摊问题进行了深入研究。国外研究以印度为例，揭示出保险索赔处理延误与保费设定不合理的问题，这对我国农作物收入保险的发展有一定借鉴价值<sup>[10]</sup>。国内研究则着重探讨了农业保险对生产要素配置和绿色农业发展的影响，提出了以保费收入为指标的农业保险发展水平衡量体系，为平衡风险与收益提供了新的视角<sup>[11,3]</sup>。

## 二、研究方法

### （一）产价关系

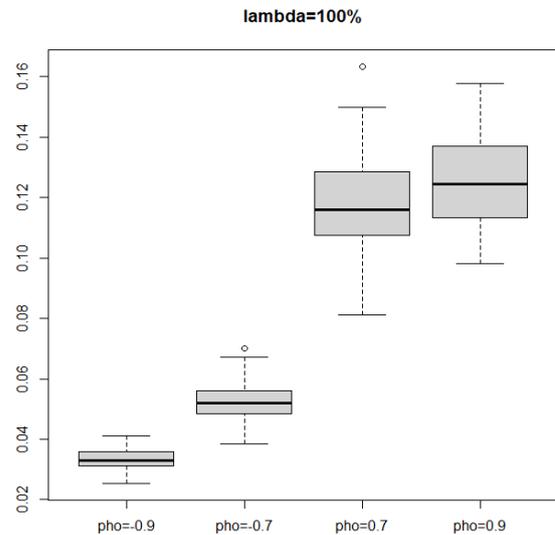
通过R软件产生二元高斯分布的30组随机数来模拟农作物的产量和价格，进行费率的厘定。通过设置不同的相关系数 $\rho$ ，得到相关性不同的产量和价格序列，比较不同相关系数下的农作物收入险费率厘定结果，发现在不同保障水平下，价格和产量之间的负相关性都能够显著降低收入保险的费率。由于价格和产量是在高斯多元分布下产生的随机数，选用正态分布分别拟合二者的边际分布，接着使用normal copula拟合二者的联合分布，最后使用Bootstrap的方法计算费率。费率计算公式如下：

$$\frac{E(\max\{\lambda E(YP) - YP, 0\})}{\lambda E(YP)} \quad (\lambda \text{ 表示保障水平})$$

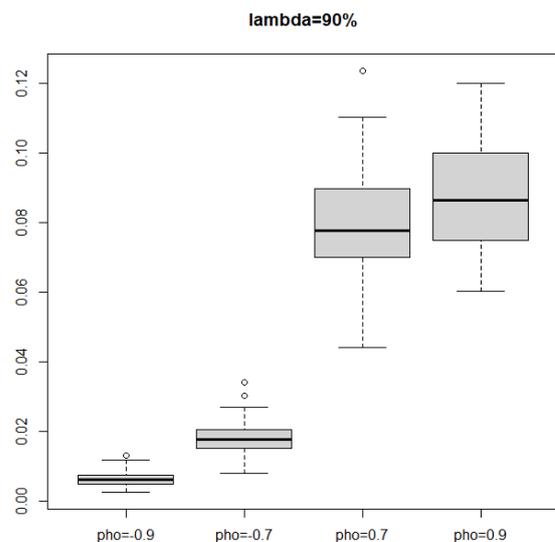
分别设置相关系数为-0.9，-0.7，0.7和0.9，每个相关系数下分别随机抽样30次并相应地计算费率，得到结果如下图所示。图1, 2, 3分别展示了在100%，90%和80%的保障水平下，设置不同相关系数得到的收入保险费率厘定结果。在100%保障水平下，当价格和产量的模拟相关系数设为-0.9时，平均费率最低为

3.27%，将相关系数设置为-0.7，0.7和0.9，相应的平均费率升高至5.26%，11.69%和12.50%，将相关系数设为正数之后，厘定的费率几乎是原来的二倍。由此可见，相较于负相关性，价格和产量之间的正相关会引起收入保险所需费率的显著上升，一种可能的原因是负相关性相当于价格和产量能够相互对冲，产量降低时价格会有所上升，使得实际收入低于预期收入的可能性有所降低。

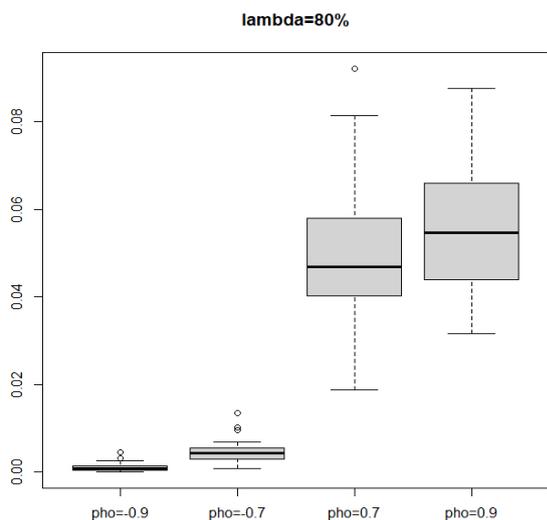
根据随机模拟的结果，价格和产量之间的相关性会对农产品收入保险费率厘定结果产生显著影响，因此在收入保险厘定的研究中应将二者的相关系数纳入费率的计算，从而更精确地厘定费率。



> 图1 100%保障水平下收入保险费率厘定结果



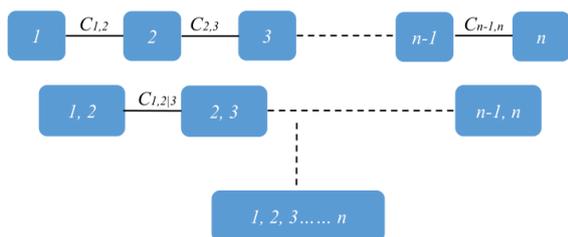
> 图2 90%保障水平下收入保险费率厘定结果



> 图3 80%保障水平下收入保险费率厘定结果

### (二) Copula函数的引入

线性相关方法存在局限性，而 Copula 方法能够描述不同元素之间的非线性相关性，是一种更好的度量变量间相关性的方法。对于更高维的情况，Vine Copula 结构为研究变量之间的关系提供了新思路。利用 Copula 方法来度量影响保险定价的要素间的相关性，可以保证费率厘定更加精确。



> 图4 n维 Vine Copula 结构

## 三、产量与价格的联合分布

由于目前国内统计网站或各省市统计年鉴缺乏完整的县、乡、村等更小区域的大豆历史单产统计数据，因此本节在不考虑任何因素的条件下建立产量与价格的联合分布时选取的大豆单产数据以市为单位。针对市级数据中存在的大豆单产数据样本较少的问题，在本节中采用针对小区域农作物单产估计的密度比方法进行大豆单产分布的估计。

### (一) 数据来源

鉴于数据的可得性，研究采用山东省济南、青岛等 16 市 2006 年以来的大豆单产数据。数据跨度为 2006 年至 2017 年，所有的单产数据来自 Wind 数据库。本章价格数据选自大连商品交易所 2006-2017 的黄豆 1 号期货合约交易数据。根据我国农产品期货交易，黄豆 1 号在每年的 1 月、5 月、9 月的期货合约为主力期货合约。由于山东地区的大豆种植期多在 4 月和 5 月份，因此预期价格取次年 1 月份到期货合约在 4 月份的日结算价格算术平均值。同时由于收获期多为 9 月和 10 月份，实际价格取次年 1 月份

到期货合约在 10 月份的日结算价格算术平均值。

由于各地市产量数据和价格数据在时间跨度上较短，时间趋势项不明显且对时间趋势项的二次多项式回归结果不显著。因此，本节只对数据进行简单的预处理操作。

### (二) 数据预处理

用表示第  $i$  地市在时刻  $t$  的单产数据， $P_t$  表示  $t$  时刻的价格数据。这里时间趋势项是常数，所以单产数据还可以写为：

$$Y_t^i = \bar{Y}_t^i(1 + \epsilon_t/\bar{Y}_t^i), P_t = \bar{P}_t(P_t/\bar{P}_t) \quad (1)$$

式 (1)  $\bar{Y}_t^i$  中表示第  $i$  地市单产数据的平均值， $\bar{P}_t$  表示价格的平均值。 $\bar{Y}_t^i$  由式 (2) 给出：

$$\bar{Y}_t^i = \epsilon_t/\bar{Y}_t^i, \bar{P}_t = P_t/\bar{P}_t \quad (2)$$

接下来将讨论  $\bar{Y}_t^i$  和  $\bar{P}_t$  的边际分布和联合分布，并用于计算费率。

### (三) 边际分布测定

#### 1. 产量分布测定

由于研究中采用的大豆单产数据以市为单位，无法借鉴国外的经验直接按照一个确定的分布估计产量数据。因此本节在估计大豆单产分布过程中，采用密度比方法。根据 Yvette (2017) 的研究，密度比方法可以有效解决在数据较少的情况下带来的估计偏差<sup>[12]</sup>。本节在该研究的基础上，采用小区域估计的密度比方法来解释产量数据。

密度比方法假定各地市的产量概率密度函数  $f_i(x)$  可以表示成式 (3)：

$$f_i(x) = f_0(x)h_i(x) \quad (3)$$

关于  $f_0(x)$  的估计，使用较为弹性的非参数估计方法。本节参考 Yvette (2017)<sup>[12]</sup>，使用 Logspline 方法来拟合  $f_0(x)$ 。但由于各市的产量数据很少， $h_i(x)$  的估计较为困难。针对过少的数据量，本节的  $h_i(x)$  选用简单的正态分布密度函数。最后将两个函数相乘并积分归一化，得到第  $i$  地市的密度函数。

#### 2. 价格分布测定

根据 Goodwin (2000)，价格数据选用 Log-Normal 分布进行拟合<sup>[13]</sup>。由于 1999 年才开展黄豆 1 号期货交易，其期货价格数据最早只能追溯至这一年。相比美国等发达国家，期货价格数据较缺少。鉴于此，本节不再深入研究模型。

### (四) 大豆收入保险费率的计算——基于 Copula 方法

本节采用 Copula 函数来构造产量和价格的联合分布函数。估计得到的第  $i$  地市的产量分布函数和价格分布函数，则第  $i$  地市产量和价格的联合分布函数就可以写成。其中，是二元 Copula 分布函数。本节的待选 Copula 模型有：Normal Copula, Archimedean Copula 中的 Frank Copula 和 Clayton Copula。Copula 的选择可以基于多种拟合优度统计量。本节根据 Pakyari (2012) 选择 Cramer-von Mises 统计量<sup>[14]</sup>，即衡量经验 Copula 函数到估计 Copula 函数的差距。

本节假定所有地市的 Copula 函数类都是一致的，原因如下。

1. 各地市数据量过少导致模型准则选定的不一定是最适合的，需要全面地结合所有地市的拟合结果。

2. 在同样的 Copula 模型下，各地市最终得到的结果具有可

比性。但由于所有地市的参数可能不同，因此本节没有假设它们的 Copula 完全一致。在某种拟合优度检验（如 Cramer-von Mises）下，第  $i$  种 Copula 模型对应的检验统计量记为  $S_{ij}$ 。一般  $S_{ij}$  越小，拟合优度越高。记  $S_{ij}$  在  $S_{i1}, S_{i2}, \dots$  中的秩为  $r_{ij}$ ，本节选择  $\sum_i r_{ij}$  最小的 Copula 模型。

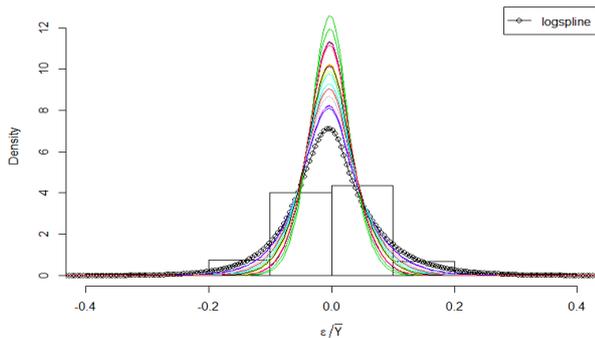
得到概率密度函数后可以通过数值积分或者 bootstrap 的方法来计算费率，本节使用 bootstrap 的方法生成随机数来计算费率。费率的公式如式 (4) 所示：

$$E(\max\{\alpha E(YP) - YP, 0\}) / \alpha E(YP) = \frac{E\left(\max\left\{\alpha E\left(\left(1 + \frac{\epsilon}{\bar{Y}}\right)\left(\frac{P}{\bar{P}}\right)\right) - \left(1 + \frac{\epsilon}{\bar{Y}}\right)\left(\frac{P}{\bar{P}}\right), 0\right\}\right)}{\alpha E\left(\left(1 + \frac{\epsilon}{\bar{Y}}\right)\left(\frac{P}{\bar{P}}\right)\right)} \quad (4)$$

式 (4) 中  $\alpha$  表示保障水平且  $0 < \alpha \leq 1$ ， $(\epsilon/Y, \bar{P}/\bar{P})$  表示通过 copula 方法得到的单产与价格的联合分布。

### (五) 不同保障条件下大豆收入保险费率测算结果分析

图 5 给出了所有产量数据整体的直方图，以及基于这些数据使用 Log spline 方法估计出的  $f_0(x)$ ，它是图中峰度最低尾部最宽的分布。通过使各市的概率密度  $f_0(x)$  与一个期望为 0、方差为各市数据方差的正态分布相乘，可以使产量波动不大的地市的概率密度更加集中在 0 附近并且产量波动较大的地市会更接近 Log spline 方法得到的函数。图 6 给出了价格的概率密度直方图和相应的对数正态分布估计。



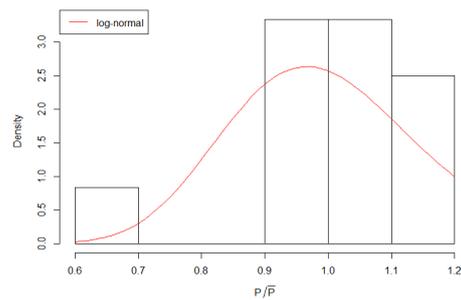
> 图5 基于所有产量数据的估计（黑线）和各地的概率密度的估计

表1 Copula 的 Cramer-von Mises 统计量计算结果

城市\模型	Normal Copula	Frank Copula	Clayton Copula
济南	0.0663	0.0655	0.0755
青岛	0.0897	0.0886	0.0878
淄博	0.2167	0.2163	0.2090
枣庄	0.1430	0.1327	0.1304
东营	0.1036	0.1105	0.1051
烟台	0.1064	0.1066	0.1093
潍坊	0.1030	0.0965	0.0692
济宁	0.1259	0.1295	0.1258
泰安	0.5944	0.4940	0.2880
威海	0.0874	0.0844	0.0847
日照	0.2535	0.2349	0.2224
临沂	0.1022	0.1080	0.1116
德州	0.0470	0.0471	0.0558
聊城	0.1693	0.1793	0.1892

城市\模型	Normal Copula	Frank Copula	Clayton Copula
滨州	0.0419	0.0442	0.0427
菏泽	0.1184	0.1186	0.0971
秩和	35	37	30

表 1 列出了三种 Copula 用不同地市的数据估计出的模型相应的拟合优度统计量。统计量越大，估计的模型就和经验 Copula 分布相差越大。拟合优度就越低。由于不同的地市数值没有一定的可比性。本节先把每个城市对应的三个 Copula 的统计量转化为有序变量（如济南市 Clayton Copula 的秩为 3，Frank Copula 的秩为 1，Normal Copula 的秩为 2），然后再把这些秩按每个 Copula 分别相加得到表 1 中的秩和。可以看出 Clayton Copula 的秩和最小，所以本节在进行农作物收入保险费率计算时使用的联合分布的 Copula 函数全部选用 Clayton Copula。表 2 列出了大豆收入保险费率的厘定结果。



> 图6 价格直方图和对数正态估计

从表 2 可以看出，当介于 70%–100% 的保障水平下时，测算得到的各个地市大豆收入保险费率水平介于 0.01%–7.12% 之间。东营在保障水平为 100% 条件下测算出的大豆收入保险费率水平大概为 7.09%，威海在保障水平为 100% 条件下测算出的大豆收入保险费率水平在 7.07% 左右，而济南、日照在保障水平为 70% 条件时大豆收入保险费率的测算值仅为 0.01%。并且随着保障水平的降低，保险的费率也进一步降低。例如，济南在保障水平为 100% 条件下计算出的保险费率水平为 5.65%，但在保障水平为 85% 的条件下大豆收入保险费率测算值却仅为 0.86%。

此外，随着保障水平的提高，费率上升幅度增加。同样以济南为例，当保障水平从 90% 上升到 95% 需支付的保费高于从 85% 上升到 90% 所需要支付的保费。一个可能的原因是农业保险本身是一种具有高风险特征的保险。在多种不确定性的叠加作用下，农户收入维持在较低水平更“容易”。从另一个角度反映出了保险公司承保农作物收入保险面临赔付风险大的情况。

表2 保险净费率厘定结果

城市\保障水平	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%
济南	5.65%	3.51%	1.87%	0.86%	0.27%	0.08%	0.01%
青岛	6.42%	4.20%	2.67%	1.42%	0.71%	0.31%	0.12%
淄博	7.02%	4.87%	3.19%	1.82%	1.09%	0.49%	0.27%
枣庄	6.51%	4.55%	2.67%	1.54%	0.74%	0.31%	0.12%
东营	7.09%	5.05%	3.37%	2.09%	1.19%	0.60%	0.33%

城市\保障水平	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%
烟台	5.93%	3.74%	2.14%	1.05%	0.39%	0.12%	0.03%
潍坊	6.79%	4.63%	2.98%	1.76%	0.93%	0.47%	0.19%
济宁	6.55%	4.46%	2.95%	1.62%	0.82%	0.40%	0.15%
泰安	6.74%	4.59%	3.04%	1.75%	0.95%	0.42%	0.17%
威海	7.07%	4.99%	3.38%	2.10%	1.10%	0.57%	0.27%
日照	5.99%	3.66%	1.99%	0.87%	0.32%	0.08%	0.01%
临沂	6.81%	4.59%	3.00%	1.78%	0.94%	0.47%	0.19%
德州	5.92%	3.81%	2.16%	1.05%	0.40%	0.12%	0.02%
聊城	6.39%	4.22%	2.49%	1.33%	0.61%	0.22%	0.05%
滨州	6.85%	4.76%	3.10%	1.84%	0.95%	0.49%	0.20%
菏泽	6.87%	4.93%	3.20%	1.90%	1.10%	0.58%	0.28%

从山东省16个地市的收入保险费率的差异可以说明,如果测定收入保险费率时选择较小地块的产量数据作为费率测算的基础,可能能够更好反映收入保险所保障的产量风险的真实情况。因为测算费率中使用的数据为市级的年单产数据,忽略了较小地区的单产波动情况。丰富的农作物单产数据是制约我国农作物收入保险设计的重要因素。

#### 四、结论及建议

本研究通过分析产量与价格之间的关系,结合山东省各省市

大豆的数据,探索了农作物收入保险费率厘定的关键影响因素,并提出了相应的政策建议。研究结论和具体建议如下:

第一,农作物收入保险同时覆盖价格波动和产量下降的双重风险,更贴合农民对稳定收入的现实需求,较传统单一风险保险更具优势,应当进一步推广完善。

第二,产量与价格的相关性显著影响收入保险的费率。研究发现负相关性可明显降低费率,而正相关性则导致费率大幅提高。这提示我们在设计保险产品时,应合理利用产量与价格的风险对冲特性,降低保费成本,增强保险的吸引力。

第三,Copula方法在捕捉产量与价格的非线性关系上明显优于传统线性方法,有助于更准确地厘定保险费率,建议推广该方法的应用。

第四,实证研究表明,山东省不同地区的费率差异较大,保险保障水平越高,费率升高越快。因此,需要加强县乡村级的小区域数据采集,更好地反映区域差异与真实风险,提升费率测算的精确性。

第五,应加快建立与农业现代化发展相适应的多层次农业保险体系,政府应加大政策引导力度,尤其针对教育程度较低和年龄较大的农户开展有针对性的保险知识培训,提高农户参保意识与风险管理能力。

#### 参考文献

- [1] 丁梦洁. 我国农作物收入保险费率测算及检验[D]. 厦门大学, 2019.
- [2] FU L, PAN H, QIN T. Analysis of willingness to pay for forest insurance and its influencing factors: From the perspective of heterogeneous forestry operators[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 769-783.
- [3] Lisha F U, Tao Q I N, Sangui W. Effect of agricultural insurance on production factor allocation and its mechanism: From the perspective of facilitating modern agriculture development[J]. Resources Science, 2022, 44(10): 1980-1993.
- [4] 王子剑, 周勇, 曾凡平. 相依样本下半参数变系数期望分位数风险度量模型统计推断[J]. 中国科学: 数学, 2021.
- [5] 李东洋, 李国龙, 邱世善. 农业气象灾害成因及其风险探究[J]. 农业科学, 2018, 1(3).
- [6] 朱新华, 陆思璇. 风险认知, 抗险能力与农户宅基地退出[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 698-706.
- [7] 中文刘, 冶通宋. 延迟退休视角下居民储蓄率的影响因素研究[J]. 财经与管理, 2021, 5(4): 20-25.
- [8] 吴宇哲, 许智钊. 休养生息制度背景下的耕地保护转型研究[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 9-22.
- [9] 沈镭, 钟帅, 何利, 等. 复式记账下的自然资源核算与资产负债表编制框架研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(10): 1675-1685.
- [10] Nayanatara S N, Billava N, Ashalata K V. Agriculture Insurance's Outreach Constrained by Procedural Delays and Norms: Reflections from North Karnataka, India[J]. Research on World Agricultural Economy, 2020, 1(1): 39-49.
- [11] Jun Z, Weina Z. Impact of agricultural insurance on green agricultural production in China: Based on the mediation effect of agricultural technology progress[J]. Resources Science, 2023, 45(12): 2414-2432.
- [12] Yvette Zhang Y. A density - ratio model of crop yield distributions[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2017, 99(5): 1327-1343.
- [13] Goodwin B K, Roberts M C, Coble K H. Measurement of price risk in revenue insurance: implications of distributional assumptions[J]. Journal of Agricultural and Resource Economics, 2000: 195-214.
- [14] Pakyari R, Balakrishnan N. A general purpose approximate goodness-of-fit test for progressively type-II censored data[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(1): 238-244.