

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2023.06.006

王雯,陈妍,汪红梅.猕猴桃高温干旱复合天气指数保险产品设计与定价[J].中国农业气象,2023,44(6):513-522

猕猴桃高温干旱复合天气指数保险产品设计与定价*

王 雯, 陈 妍, 汪红梅**

(西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100)

摘要: 相比传统农业保险产品, 天气指数保险具有信息透明、理赔便捷、二级市场流通性强等优点, 是分散农业风险的有效手段。但农作物的受灾机理十分复杂, 在其生长过程中往往受到多重灾害的共同影响, 准确构建多个天气指数之间以及天气指数与农产品单位面积产量之间的关联关系模型, 扩大天气指数保险的承保责任, 对于减少基差风险、合理设计天气指数保险以及转移农业气象灾害风险具有重要意义。本研究基于国家气象网 1995–2018 年共 24a 逐日降水和气温数据, 以陕西眉县猕猴桃为例, 构建降水、气温和单位面积产量的三维嵌套 Copula 模型和条件混合三维 Copula 模型, 通过误差比较, 选择利用模拟精度较高的条件混合三维 Copula 模型模拟三者的关系, 并厘定复合天气指数保险的纯费率。结果表明, 在 70% 的保障水平下, 5–9 月累计降水量低于 423.2mm, 且平均日最高气温高于 26.40℃ 时进行赔付, 纯保险费率为 10.07%。本研究探索高温干旱天气对猕猴桃单位产量损失的交叉影响, 更好地阐明了高温、干旱和猕猴桃单产之间的相关关系, 能够在一定程度上降低基差风险, 完善农业天气指数保险体系, 为复合天气指数保险产品的设计提供一种新的思路和方法, 有助于天气指数保险的推广应用。

关键词: 交叉影响; Copula 函数; 蒙特卡洛模拟; 费率厘定

Product Design and Pricing of Kiwifruit High Temperature and Drought Composite Weather Index Insurance

WANG Wen, CHEN Yan, WANG Hong-mei

(School of Economics and Management, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Weather index insurance with the advantages of transparent information, convenient claim and settlement strong secondary market liquidity is an effective method to diversify agricultural risks, compared with traditional agricultural insurance products. However, the disaster mechanism of crops that are often affected by multiple hazards together during their growth process is very complex. Accurately constructing the correlation relationship model among multiple weather indices and between weather index and yield per unit area of agricultural products, expanding the underwriting liability of weather index insurance are important to reduce the basis risk, reasonably design weather index insurance and transfer the risk of agricultural weather disasters. In this study, based on the precipitation and temperature data of 24 years of day-by-day from 1995 to 2018 from the national meteorological network, a three-dimensional nested Copula model and a conditional mixed three-dimensional Copula model among precipitation, temperature and yield per unit area had been constructed for kiwifruit in Meixian county, Shaanxi province. The relationship between the three variables was simulated using the conditional mixed three-dimensional

* 收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 陕西省社科界重大理论与现实问题研究重大项目子课题“陕西农业产业高质量发展水平测度与目标框架构建”(2021ZD1055); 陕西省软科学项目“后扶贫时代陕西农村生态环境治理模式及效应研究”(2021KRM051)

** 通讯作者: 汪红梅, 博士, 教授, 研究方向为农村可持续发展, E-mail: whmeco@nwsuaf.edu.cn

第一作者联系方式: 王雯, E-mail: wangwen0301@163.com

Copula model with higher simulation accuracy by comparing the error and the pure rate of composite weather index insurance was determined. The results showed that the pure insurance rate was 10.07% at 70% coverage level for a payout under the conditions of cumulative precipitation below 423.2mm and average daily maximum temperature above 26.40℃ from May to September. This study explored the cross-influence of high temperature and drought weather on the unit yield loss of kiwifruit and better clarified the correlation among high temperature, drought and kiwifruit yields, which could reduce the basis risk to a certain extent, improve the agricultural weather index insurance system, provide a new idea and method for the design of composite weather index insurance products, and contribute to the promotion and application of weather index insurance.

Key words: Cross-influence; Copula function; Monte Carlo simulation; Rate determination

气候变化引起的极端自然灾害,始终是农业生产面临的一个主要难题。农业保险可以分散和转移农民在生产过程中遭遇的无法避免的风险,从而提高农户抵御自然灾害等风险的能力并保障其收入水平。但传统农业保险存在管理成本高、信息不对称等问题,一定程度上影响了农户对农业保险的需求,需要开发创新型保险来解决这些问题,天气指数保险因此受到重视。天气指数保险以气象站观测的气象数据作为赔付依据,数据获得的整个流程简单透明、客观公正,理赔迅速且交易成本低,可以有效提高小农户抵抗风险的能力,是许多保险公司以及学者重点研究的对象^[1]。至 2021 年 6 月,中国代表性的农业天气指数保险试点已达 100 多处,保险标的从小麦、玉米等粮食作物推广到水果、茶叶等经济作物,从种植业发展到渔业、蜂业等养殖行业^[2-3]。陕西省眉县是中国最主要的猕猴桃生产基地之一,但气候条件的不断变化、极端天气事件的频繁发生,导致猕猴桃的越冬期冻害、高温热害等气象灾害发生频率显著增加,猕猴桃的产量和质量都受到较大影响。现有的猕猴桃保险产品,以成本保险为主,每公顷保额仅 30000 元,不到产值的 20%,保障水平极低,且存在保险责任与猕猴桃种植面临的风险不匹配、定价不够合理等问题,研发猕猴桃复合天气指数保险产品是转移猕猴桃灾害风险的有效路径。猕猴桃高温干旱复合天气指数保险可以有效减少保险市场的道德风险、逆向选择和管理成本等,一定程度上降低基差风险,提高农户投保以及保险公司承保的积极性,推进天气指数保险在陕西试点工作的开展^[4]。

关于天气指数保险产品的设计和定价问题,国内外学者展开了积极的探索和研究。秦涛等^[4]通过构建线性回归模型模拟核桃减产率与干旱指数的关

系,厘定云南省及各州(市)的保险纯费率,为费率厘定、设计产品赔偿方案提供理论依据。Bokusheva^[5]以哈萨克斯坦谷物生产农场为例,分别采用 Copula 函数和线性回归模型两种方法对单一天气因素和农作物产量的关系进行了估计,发现天气因素与农作物产量之间的关系会随时间变化, Copula 估计比线性相关的估计更可靠。储小俊等^[6-7]分别通过 Copula 函数构造单一天气指数与单位产量之间的相关关系并计算纯费率。但经过更深入的研究, Bokusheva 等^[8-9]证明了用单一天气指数很难有效补偿农场极端产量损失,且选择错误的或数量不足的天气变量来构建指数时会产生可变基差风险,进而导致天气指数和产量的相关性不充分。因此,部分学者开始尝试设计复合天气指数保险,如杨太明等针对小麦关键生育期的主要风险确定了 5 个天气指数,并在安徽省宿州市试验应用^[10]。王月琴等^[11]利用数据优化匹配方法,分别定量评估了干旱指数和暴雨指数对山西省沁县谷子产量的影响。但是以上研究均未评估各天气指数对作物产量损失可能存在的交叉影响。

评估交叉影响的方法还未出现在天气指数保险产品设计的现有研究报道中,但在水文研究中已有使用,主要包括直接对三维 Copula 函数进行参数估计、通过二维 Copula 函数不断嵌套和条件混合三维 Copula 模型三种方法。王颖等^[12]分别采用三种三维 Copula 模型对多支流干流年最大流量进行研究,通过对比三种模型的残差和均方根误差(RMSE),最终选择条件混合三维 Copula 模型进行建模。因此,本研究借鉴水文研究中的方法,分别构建三维嵌套 Copula 模型和条件混合三维 Copula 模型,研究多种天气因素对农作物单位面积产量(单产)的交叉影响,比较其模拟精度,并选择精度较高的模型

进行猕猴桃复合天气指数保险的纯费率厘定，以期转移猕猴桃生长过程中的高温干旱风险提供有效途径。

1 资料与方法

1.1 数据来源

1995–2018 年气温和降水的日值数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)，1995–2018 年陕西眉县猕猴桃种植面积和产量数据来源于历年《陕西统计年鉴》。

1.2 研究方法

1.2.1 Copula 方法

根据 Sklar 定理,对于 N 个随机变量的联合分布,可以将其分解为这 N 个变量各自的边缘分布和一个 Copula 函数,从而将变量的随机性和耦合性分离开来,其中,随机变量各自的随机性由边缘分布进行描述,随机变量之间的耦合特性由 Copula 函数进行描述。因此,可以通过分别求解 Copula 函数与边缘分布函数的方式来降低计算难度。Sklar 首次利用 Copula 函数研究随机变量间的非线性相关结构,并证明 Copula 函数的存在性与唯一性^[13]。

(1) 二维 Copula 函数

Copula 函数是定义域为[0, 1]均匀分布的多维联合分布函数。设降水和气温两个气象因子分别为 x 和 y,农作物单产为 z。若 F 为一个二维变量的联合分布函数,那么存在一个二维 Copula 函数 C 可以将边缘分布和联合分布“连接”起来,使得

$$F(x, y) = C[F(x), F(y)] \tag{1}$$

式中, F(x)、F(y)分别为降水和气温的边缘分布函数。

其中, Copula 函数的密度函数为

$$c(u_1, u_2) = \frac{\partial^2 C(u_1, u_2)}{\partial u_1 \partial u_2} \tag{2}$$

式中, $u_1=F(x)$, $u_2=F(y)$, $C(u_1, u_2)$ 为 Copula 的分布函数。

Copula 函数(又称连接函数)最初主要应用于金融衍生品领域,后来随着 Copula 理论的不断完善发展,已广泛应用于水文、环境和风险评估等领域,近年被一些学者应用到天气指数保险产品设计上。研究中使用最多的 Copula 函数分为椭圆 Copula 和阿基米德 Copula (Archimedean Copula)。椭圆 Copula 包括高斯 Copula 和 t-Copula; 最基本的阿基米德函数有 Frank Copula 函数、Gumbel Copula 函数以及 Clayton Copula 函数,具体函数形式如表 1 所示。其中,阿基米德函数由于其构造简单且能体现变量之间的尾部相关性问题受到学者们的广泛关注。

由于高维 Copula 结构的复杂性,学者将高维 Copula 函数转变为二维函数进行建模。在利用阿基米德函数研究多维问题相关性中,直接对多维 Copula 函数进行参数估计,只能基于所有变量之间的相关性相同假设,这种假设显然与实际不符^[14]。阿基米德函数对双变量的拟合效果很好,但解决高维相关性问题的存在较大的局限性,因此,本研究构建更为灵活的嵌套 Copula 模型和条件混合三维 Copula 模型,可以综合几种 Copula 函数的特点,实现对变量间相关性更为精确的描述。

(2) 三维 Copula 模型

由于直接估计三维 Copula 模型的参数有一定难度,文献中常采用二维 Copula 不断嵌套的方式得到三维联合分布。王颖等提出了基于条件混合的三维 Copula 分布模型,利用边缘分布的积分值来确定三维 Copula 参数^[12]。本研究分别采用这两种方法并比较其预测精度。

① 三维嵌套 Copula 模型

由图 1 可以看出,三维嵌套 Copula 模型采用的

表 1 Archimedean Copula 函数类型及形式
Table 1 Types and forms of Archimedean Copula functions

| 类型 Type | 函数形式 Functional form | 生成元 Generator |
|----------------|---|--|
| Frank Copula | $C_{\alpha}^{\text{Frank}}(u_1, u_2) = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\alpha u_1} - 1)(e^{-\alpha u_2} - 1)}{e^{-\alpha} - 1} \right]$ | $-\ln \frac{e^{-\alpha t} - 1}{e^{-\alpha} - 1}$ |
| Gumbel Copula | $C_{\alpha}^{\text{Gumbel}}(u_1, u_2) = \exp \left\{ - \left[(-\ln u_1)^{\alpha} + (-\ln u_2)^{\alpha} \right]^{1/\alpha} \right\}$ | $(-\ln t)^{\alpha}$ |
| Clayton Copula | $C_{\alpha}^{\text{Clayton}}(u_1, u_2) = \left[u_1^{\alpha} + u_2^{\alpha} \right]^{-1/\alpha}$ | $\frac{1}{\alpha} (t^{-\alpha} - 1)$ |

是简单的逐步叠加的方法。图 1 中节点 u_1 、 u_2 由 Copula 函数 C_1 来连接, 节点 u_3 和 $C_1(u_1, u_2)$ 由 Copula 函数 C_2 来连接。对于两种气象因子和农作物单产三个变量, 按照本研究的研究思路来确定顺序, 由两种气象因子构造第一个 Copula 函数 (式 3), 然后连接第一个 Copula 函数与第三个变量即农作物单产 z 构造第二个 Copula 函数 (式 4)。

$$C_1[u_1, u_2] \quad (3)$$

$$C_2\{C_1[u_1, u_2], u_3\} \quad (4)$$

式中, $u_1=F(x)$ 为降水的边缘分布函数, $u_2=F(y)$ 为气温的边缘分布函数, $u_3=F(z)$ 为农作物单产的边缘分布函数。

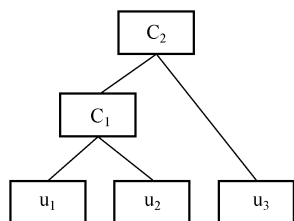


图 1 三维嵌套 Copula 模型结构

Fig. 1 Structure of 3D Nested Copula Model

② 条件混合三维 Copula 模型

条件混合三维 Copula 模型是一种将二维 Copula 拓展到三维的方法, 是在建立二维 Copula 函数的基础上, 利用条件分布来构造三维联合分布函数。该模型可以利用边缘分布的积分值来确定三维 Copula 参数, 解决三维 Copula 的参数估计困难的问题, 估计过程相对简单^[12]。气象因子一 (降水) 的边缘分布函数为 $F(x)$, 气象因子二 (气温) 的边缘分布函数为 $F(y)$, 农作物单产的边缘分布函数为 $F(z)$, 通过 Copula 方法分别拟合降水与农作物单产和气温与农作物单产的二维 Copula 联合分布, 即

$$C_{xz}[F(x), F(z)], C_{yz}[F(y), F(z)] \quad (5)$$

由条件概率公式得到其条件分布, 即

$$F_{x|z}(x|z) = P(x \leq X|Z = z) = \frac{\partial C_{xz}[F(x), F(z)]}{\partial F(z)} \quad (6)$$

$$F_{y|z}(y|z) = P(y \leq Y|Z = z) = \frac{\partial C_{yz}[F(y), F(z)]}{\partial F(z)} \quad (7)$$

再利用 Copula 方法计算式 (6)、式 (7) 的二维 Copula 联合分布, 即

$$C_{xy}[F_{x|z}(x|z), F_{y|z}(y|z)] \quad (8)$$

由条件混合法得三变量降水 x 、气温 y 、农作物

单产 z 的联合分布表达式, 即

$$F_{xyz}(x, y, z) = \int_{-\infty}^y C_{xy}[F_{x|z}(x|z), F_{y|z}(y|z)] F_y(dy) \quad (9)$$

1.2.2 保险费率及阈值

(1) 纯费率 R 的计算

$$R = \int_0^{\alpha z_0} \frac{(\alpha z_0 - z)}{\alpha z_0} \lambda(z) dz \quad (10)$$

式中, $\alpha \in [0, 1]$ 为保障水平, z_0 为目标单产 (设为单产平均值), $\lambda(z) = dF(z)/dz$ 为农作物单产 z 的概率密度分布函数。

(2) 阈值设定

降水和气温阈值可以由以下公式计算得到。

$$u_1 = C_{xz}^{-1}(t) \quad (11)$$

$$u_1^0 = E(u_1|z_0) = E[C_{xz}^{-1}(t)|z_0] \quad (12)$$

$$x_0 = F^{-1}(u_1^0) \quad (13)$$

式中, u_1 、 u_3 分别为降水和农作物单产的分布函数, t 为随机生成的服从 $[0, 1]$ 均匀分布的数, u_1^0 为农作物期望单产对应的降水分布函数值, C_{xz}^{-1} 为降水和农作物单产的 Copula 函数 C_{xz} 的偏导数的反函数, x_0 为降水阈值; 同理可计算得到气温阈值。

1.3 数据处理

气象数据的处理、单产数据的去趋势处理、归一化、概率分布函数拟合、三维 Copula 模型构建、蒙特卡洛模拟均采用 R 语言编程实现, 使用 Excel 和 R 作图。

2 结果与分析

2.1 猕猴桃生长关键期高温干旱气象因子选择

猕猴桃的物候期可分为果树萌芽期 (3 月中旬–4 月中旬)、果树展叶期 (4 月中旬–5 月底)、开花期 (5–6 月)、果实发育期 (6 月–9 月底)、果实成熟期 (9 月底–10 月)、落叶期 (11 月中旬) 及果树休眠期。5 月, 猕猴桃新梢生长迅速, 同时进入了坐果期, 是猕猴桃果实生长关键时期, 对养分 (如氮、磷、钾等) 消耗很大。猕猴桃果实一年中有两次生长高峰, 第 1 次是坐果后到 7 月中旬, 此期猕猴桃发育最为迅速, 生长量可占全年总生长量的 70%; 8 月中旬, 猕猴桃果实进入第 2 次生长高峰, 直到采果。5–9 月是猕猴桃生长的关键时期, 因此本研究选择这一时段设计天气指数保险。

陕西眉县是猕猴桃的优质生产区, 具有优质猕猴桃生长所需的光、温、水等气候资源条件。但猕猴桃对气候变化非常敏感, 其生产过程中极易受到

高温和干旱的影响。猕猴桃开花期一般为 5 月, 平均气温以 12~16℃ 最适宜, 温度过高会导致果树开花提前。果实发育和成熟期为 6~10 月, 其中, 最热月(7 月)平均气温应为 21~26℃, 温度过高, 猕猴桃生长接近停滞。果实快速生长的时期需要的水量较多, 最优降水量为 250~300mm, 降水量少于 150mm 会影响果实生长^[15]。实地调查结果显示, 陕西眉县猕猴桃的产量以及品质曾多次遭受高温和干旱天气影响, 进而导致农户收入下降^[16]。此外, 研究表明, 降水与气温之间存在一定的相关关系。Clausius-Clapeyron(CC)关系指出气温每升高 1℃, 大气的水汽储存能力增加 7%, 为研究降水与气温之间的相关关系奠定了物理基础^[17]。刘哲等对西江流域的降水-气温相依结构进行研究, 并构建 Copula 联合函数量化分析降水和气温的相关性, 为研究降水与气温之间的相关关系奠定了理论基础^[18]。因此, 本研究选择高温干旱灾害(涉及的气象因子包括气温和降水)对猕猴桃单产的交叉影响进行分析。

2.2 猕猴桃年气象产量序列获取

气象产量通过对单产序列进行去趋势处理获取。研究认为, 经济变量是一种趋势缓慢变动的变量, 通过 HP 滤波法研究经济变量时, 可以将变量看作是高频部分与低频部分的叠加。本研究采用 HP 滤波法对陕西省眉县 1995~2018 年猕猴桃单产进行去趋势处理, 如图 2 所示。将猕猴桃的单产分离为趋势产量和气象产量两部分, 趋势产量代表农业技术进步等因素对产量的贡献, 经过趋势处理后的单

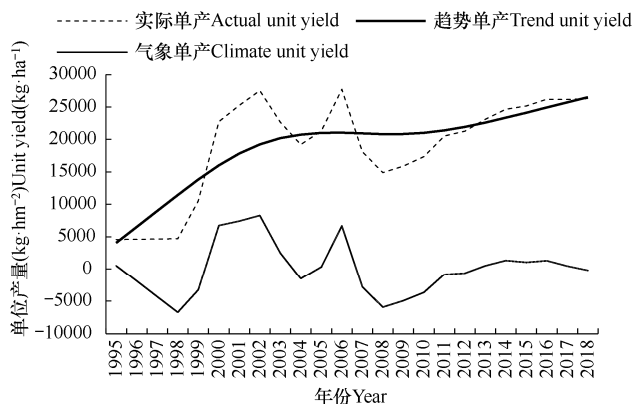


图 2 1995~2018 年陕西省眉县猕猴桃单产变化过程的 HP 滤波法去趋势结果

Fig. 2 Detrend chart of HP filtering method for the variation process of kiwifruit yields in Meixian county, Shaanxi province, 1995-2018

产序列剩余项视为受气象因子影响的产量分量即气象产量。

2.3 气象因子和气象单产序列分布函数拟合

2.3.1 气象因子分布函数拟合

对陕西眉县 1995~2018 年共 24a 的日降水量与日平均最高气温数据进行整理, 选取 24a 内 5~9 月的数据, 构建能反映高温干旱灾害情况的天气指数。Bokusheva 使用每月累计降水量和日平均气温设计干旱指数^[8]。Leblois 等将简单指数的结果与更复杂指数的结果相比较, 提出在样本内评估中, 最好的指数是生长期的简单累计降水^[19]。在文献研究的基础上, 分别将 5~9 月累计降水量和平均日最高气温作为干旱和高温指数, 并对其进行归一化处理。

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (14)$$

式中, x 为累计降水量和平均日最高气温, x_{\max} 为最大值, x_{\min} 为最小值, x^* 为归一化值。

采用 R4.2.1 绘制标准化后的累计降水量和平均日最高气温的直方图, 综合考虑国内外现有研究, 选取常用的正态分布、逻辑分布、韦伯分布对两个天气指数进行概率分布拟合(图 3), 通过 KS 检验确定最优参数分布模型, 两指数最优分布结果统计如表 2 所示。

根据拟合优度检验结果, 选择正态分布描述陕西省眉县累计降水量的分布, 选择韦伯分布描述眉县平均日最高气温分布。根据正态分布的拟合结果, 累计降水量的分布函数为

$$F(x) = \frac{1}{0.2248\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-0.5382)^2}{2 \times 0.2248^2}} dx \quad (15)$$

式中, x 为标准化后的累计降水量。

根据韦伯分布的拟合结果, 眉县平均日最高气温的分布函数为

$$F(y) = 1 - e^{-(y/1.7027)^{0.4291}} \quad (16)$$

式中, y 为标准化后的平均日最高气温。

2.3.2 气象单产序列分布函数拟合

利用 HP 滤波法将猕猴桃单产进行分离得到趋势单产和气象单产后, 通过归一化对气象单产进行标准化处理; 对标准化后的序列进行分布函数拟合, 拟合方法同气象因子的边际分布函数拟合方法, 拟合优度检验结果如表 3 所示。

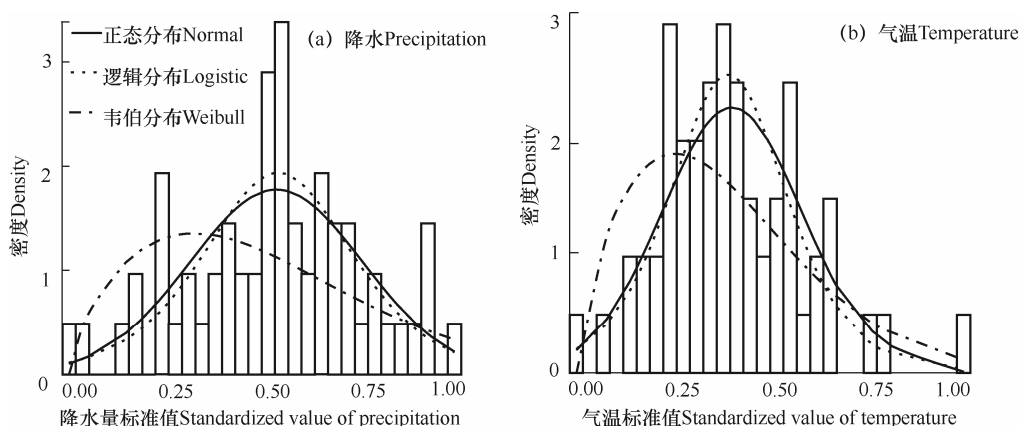


图 3 陕西省眉县 5-9 月累计降水量 (a) 和平均日最高气温 (b) 标准化值分布的 3 种函数拟合结果 (基于 1995-2018 年数据)

Fig. 3 Results of fitting three functions for the distribution of standardized values of cumulative precipitation(a) and average daily high temperature(b) in May-September in Meixian county, Shaanxi province(by data during 1995-2018)

表 2 陕西省眉县 5-9 月累计降水量和平均日最高气温的拟合优度检验结果

Table 2 Goodness-of-fit test results for cumulative precipitation and average daily high temperature in May-September in Meixian county, Shaanxi province

| 分布 Distribution | KS 检验 KS test | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------|--|---------|
| | 累计降水量 Cumulative precipitation | | 平均日最高气温 Average daily high temperature | |
| | P 值 P-value | 排名 Rank | P 值 P-value | 排名 Rank |
| 逻辑分布 Logistic distribution | 1.366×10^{-14} | 2 | 1.367×10^{-13} | 3 |
| 正态分布 Normal distribution | 1.998×10^{-15} | 1 | 1.377×10^{-14} | 2 |
| 韦伯分布 Weibull distribution | 2.241×10^{-9} | 3 | 2.220×10^{-16} | 1 |

表 3 1995-2018 年陕西省眉县气象单产标准化值 3 种函数拟合优度的检验结果

Table 3 Test results about the goodness by fit of three functions for standardized values of climate unit yield in Meixian county, Shaanxi province, 1995-2018

| 分布 Distribution | KS 检验 KS test | |
|----------------------------|------------------------|---------|
| | P 值 P-value | 排名 Rank |
| 逻辑分布 Logistic distribution | 4.504×10^{-6} | 1 |
| 正态分布 Normal distribution | 4.504×10^{-4} | 3 |
| 韦伯分布 Weibull distribution | 4.673×10^{-6} | 2 |

根据拟合优度检验结果,选择逻辑分布来拟合陕西省眉县猕猴桃气象单产的分布,由逻辑分布的拟合结果可得眉县猕猴桃气象单产的分布函数为

$$F(z) = [1 + e^{-(z-0.4314)/0.1517}]^{-1} \quad (17)$$

式中, z 为标准化后的猕猴桃气象单产。

2.4 构建复合天气指数与猕猴桃气象单产三维 Copula 模型

2.4.1 三维嵌套 Copula 模型

(1) 构建复合天气指数

构建复合天气指数需要先找到降水与气温之间的相关关系。通过降水和气温的散点图(图 4)可以

发现,累计降水量与平均日最高气温呈负相关关系。降水与气温的 3 大相关性系数均表示两者的相关性较强(表 4),且相关系数检验的概率 P 值远小于 0.01,达到极显著水平。

因此,分别采用二维 Clayton、Gumbel、Frank Copula 模型构建降水(累计降水量)与气温(平均日最高气温)的非线性相关关系,即构建复合天气指数,通过极大似然估计法确定其参数值,并检验其拟合度优劣。采用赤池信息量准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC),值最小准则法检验拟合度优劣。据此,可以判断拟合最优的 Copula 函数为 Frank Copula

函数,其参数 θ 为-3.94,Kendall 秩相关系数 τ 为-0.38 (表 5)。

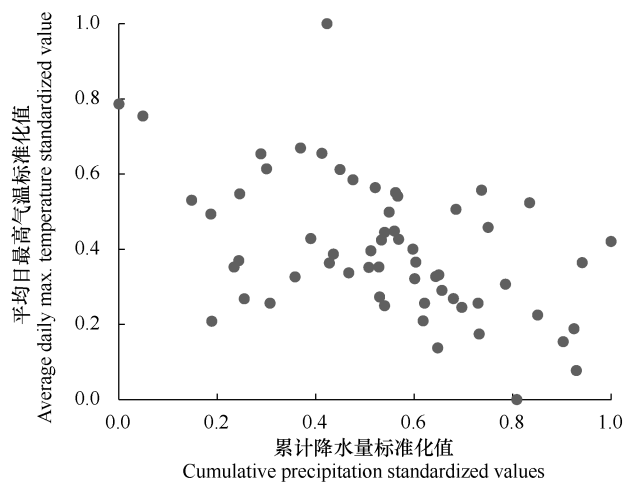


图 4 累计降水量与平均日最高气温的散点图

Fig. 4 Scatter plot of cumulative precipitation and average daily high temperature

表 4 降水与气温的皮尔森、肯德尔和斯皮尔曼相关系数 (R)
Table 4 Values of the three main correlation coefficients (R) of Pearson, Kendall and Spearman for precipitation and temperature

| R | 皮尔森 | 肯德尔 | 斯皮尔曼 |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Pearson | Kendall | Spearman |
| 数值 Number | -0.4954 | -0.3414 | -0.4684 |
| P 值 P-value | 5.705×10^{-5} | 1.170×10^{-4} | 1.603×10^{-4} |

表 5 眉县降水与气温的 Copula 拟合优度评价指标计算结果
Table 5 Calculation results of the evaluation index of the goodness of fit of cumulative precipitation and average daily high temperature Copula in Meixian county

| Copula 函数 | AIC 值 | BIC 值 |
|-----------------|-----------|-----------|
| Copula function | AIC value | BIC value |
| Clayton Copula | -3.48 | -2.30 |
| Gumbel Copula | -5.46 | -4.29 |
| Frank Copula | -5.98 | -4.81 |

(2) 构建复合天气指数 (连接降水和气温的 Copula 函数 C_1) 与单产之间的联合分布

分别对 Clayton Copula 等三种常用的 Archimedean Copula 函数构建的复合天气指数和猕猴桃气象单产之间的联合分布函数进行参数估计及拟合优度检验,可以判断最优 Copula 函数为 Gumbel Copula 函数,其参数 θ 为-1.03,Kendall 秩相关系数

τ 为-0.23 (表 6)。

表 6 眉县复合天气指数与猕猴桃气象单产的 Copula 拟合优度评价指标计算结果

Table 6 Calculation results of the evaluation index of the goodness of fit between the composite weather index and climate unit yield of kiwifruit in Meixian county

| Copula 函数 | AIC 值 | BIC 值 |
|-----------------|-----------|-----------|
| Copula function | AIC value | BIC value |
| Clayton Copula | 1.95 | 3.13 |
| Gumbel Copula | 1.94 | 3.12 |
| Frank Copula | 2.00 | 3.18 |

(3) 蒙特卡洛模拟

蒙特卡洛模拟是一种用来模拟大量数据的统计学方法,该模拟从已知概率分布进行随机抽样,并通过随机抽样得到近似解,随着随机抽样数值增多,得到正确结果的概率变大。由 Copula 函数性质可知,随机变量 v 对 u 的条件分布函数 $C_u(v)=\partial C(u,v)/\partial u$ 在 $v \in [0, 1]$ 内单调非减,令 $t=C_u(v)=\partial C(u,v)/\partial u$,则 t 服从 $[0, 1]$ 均匀分布。因此,可以先得到随机数 u 和 t ,然后根据条件分布函数 $C_u(v)$ 的反函数求得另外一个随机数 v ,由此构造随机数对 $(u, v)^{[20]}$ 。

构造随机序列的具体步骤如下:首先,生成服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机序列 u_1 和 t ;其次,根据连接降水和气温的 Copula 函数 C_1 以及连接复合天气指数和单产的 Copula 函数 C_2 ,计算得到 $u_2、u_3$ 。其中, $u_2=C_1^{-1}u_1(t)$, $u_3=C_2^{-1}C_1(t)$;最后,分别通过降水、气温和猕猴桃气象单产的边缘分布函数计算降水、气温和单产随机序列的原函数值,即 $x=F^{-1}(u_1)$, $y=F^{-1}(u_2)$, $z=F^{-1}(u_3)$,并将其作为新的降水、气温和单产数据序列。

2.4.2 条件混合三维 Copula 模型

(1) 构建条件混合三维 Copula 模型

分别求得降水与单产、气温与单产之间的联合分布函数。由于 AIC 和 BIC 均达到了最小值,两者均选取 Frank Copula 模型 (表 7);基于条件混合法,利用式 (6)、式 (7) 分别求得降水与气象单产、气温与气象单产的条件分布;最后基于条件概率公式,通过式 (9) 构建三维联合分布函数。

(2) 蒙特卡洛模拟

首先,生成服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机序列 u_3 和 t ;

表 7 降水（累计降水量）、气温（平均日最高气温）与气象单产的 Copula 拟合优度评价指标计算结果

Table 7 Calculation results of evaluation indexes of Copula goodness of fit between cumulative precipitation and climate unit yield, average daily high temperature and climate unit yield

| 降水与气象单产 Precipitation and yield | AIC 值 AIC value | BIC 值 BIC value | 气温与气象单产 Temperature and yield | AIC 值 AIC value | BIC 值 BIC value |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Clayton Copula | 1.48 | 2.66 | Clayton Copula | 1.81 | 2.99 |
| Gumbel Copula | 1.95 | 3.13 | Gumbel Copula | 1.56 | 2.74 |
| Frank Copula | 1.30 | 2.48 | Frank Copula | 0.76 | 1.94 |

其次，根据连接降水和气象单产的 Copula 函数 C_{xz} ，计算得 $u_1 = C_{xz}^{-1} u_3(t)$ ，同理可得到 u_2 值；最后，分别通过降水、气温和猕猴桃气象单产的边缘分布函数计算降水、气温和单产随机序列的原函数值，即 $x = F^{-1}(u_1)$ ， $y = F^{-1}(u_2)$ ， $z = F^{-1}(u_3)$ ，并将其作为新的降水、气温和单产数据序列。

2.5 厘定猕猴桃天气指数保险纯费率

计算两种三维 Copula 模型的气象单产模拟序列与猕猴桃气象单产序列之间的均方根误差 (RMSE)、归一化均方根误差 (NMSE) 及平均绝对误差 (MAE)，并比较三者误差程度。由表 8 可知，条件混合三维 Copula 模型的模拟结果的 RMSE 为 207.5213，NMSE 为 137460.2，MAE 为 169.8439，均优于三维嵌套 Copula 模型。因此，条件混合三维 Copula 模型能更充分地模拟气象因子与单产之间的非线性变化规律。

表 8 两种三维 Copula 模型误差结果对比

Table 8 Comparison of error results of two 3D Copula models

| | 三维嵌套 Copula 模型 3D nested Copula model | 条件混合三维 Copula 模型 Conditional mixed 3D Copula model |
|------|--|---|
| RMSE | 323.0277 | 207.5213 |
| NMSE | 171551.1 | 137460.2 |
| MAE | 312.2423 | 169.8439 |

注：RMSE 为均方根误差，NMSE 为归一化均方根误差，MAE 为平均绝对误差。

Note: RMSE is root mean square error, NMSE is normalized root mean square error, MAE is mean absolute error.

基于条件混合三维 Copula 模型进行蒙特卡洛模拟所得的降水、气温及单产数据，厘定纯费率。根据式 (10) 得出，在 70% 的保障水平下，纯保险费率为 10.07%；根据式 (11)–式 (13) 计算可得，此时的 5–9 月累计降水量阈值为 423.2mm，同理可得平均日最高气温阈值为 26.40℃。复合天气指数保险

的定价不仅考虑了降水和气温两个影响猕猴桃产量的因素，还考虑到两者对产量的交叉影响，能够更有效地应对农户遇到的气象灾害风险。

3 结论与讨论

3.1 结论

基于 Copula 函数构建的复合天气指数对陕西省眉县猕猴桃天气指数保险进行费率厘定。首先，构建降水、气温及单产之间的三维嵌套 Copula 模型和条件混合三维 Copula 模型；其次，分别通过蒙特卡洛模拟法随机产生模拟单产、降水和气温的样本序列，并通过均方根误差、归一化均方根误差和平均绝对误差比较两种模型的模拟精度；最后，利用模拟精度较高的条件混合三维 Copula 模型随机产生的样本序列厘定纯费率。得出如下结论：

(1) 对猕猴桃生长过程的各天气因素进行分析，确定眉县猕猴桃生长关键时期的主要气象灾害为高温和干旱，并据此构建高温指数和干旱指数。

(2) 条件混合三维 Copula 模型对眉县气象因子与猕猴桃产量数据关系的拟合效果优于三维嵌套 Copula 模型。

(3) 利用蒙特卡洛模拟随机产生的数据，计算得到猕猴桃高温干旱复合天气指数保险产品 70% 的保障水平下，纯保险费率为 10.07%；在此条件下的阈值为 5–9 月累计降水量低于 423.2mm，且平均日最高气温高于 26.40℃。

3.2 讨论

农作物受灾机理十分复杂，其生长过程往往不是受单一气象灾害影响，而是受多重灾害的综合影响^[1]。目前，气象灾害对农作物产量影响的研究已得到广泛关注^[1-11]，但此类研究多趋于探讨气象因子与农作物产量的相关性，且多是单因素、线性的^[3]，难以满足多因素非线性研究的需求。因此，本研究在确定天气指数时，综合考虑了关键生长阶段高温

和干旱对猕猴桃产量的影响,并通过 Copula 函数建立各变量之间的非线性关系,深入研究高温和干旱对猕猴桃产量损失的交叉影响,能够在一定程度上降低基差风险,完善农业天气指数保险体系,为复合天气指数保险产品设计的理论研究提供一种新思路和方法。

另外,各种农作物的特性不同,其生长过程中遭受的气象灾害也不同。由于部分客观数据与主观能力的制约,仅研究了两个气象因子与产量的相关关系,还需要进一步探究农作物各个生长期各天气因素对农作物产量的综合影响。

参考文献 References

- [1] 杨晓娟,张仁和,路海东,等.基于 CERES-Maize 模型的玉米水分关键期干旱指数天气保险:以陕西长武为例[J].中国农业气象,2020,41(10):655-667.
Yang X J,Zhang R H,Lu H D,et al.Drought index insurance of maize in water critical period based on CERES-Maize model:a case study of Changwu,Shaanxi[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(10): 655-667. (in Chinese)
- [2] 李政,陈盛伟,牛浩.农业天气指数保险的业务难题、角色定位与发展思路[J].农村经济,2022(2):100-107.
Li Z,Chen S W,Niu H.Business difficulties, role positioning and development ideas of agricultural weather index insurance[J].Rural Economy, 2022(2):100-107.(in Chinese)
- [3] 刘瑞娜,杨太明,陈金龙,等.安徽河蟹养殖高温热害天气指数模型设计与实践[J].中国农业气象,2020,41(5):320-327.
Liu R N,Yang T M,Chen J L,et al.Design and application on weather indices model for high temperature disaster of Chinese hairy crab in Anhui[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(5):320-327.(in Chinese)
- [4] 秦涛,朱彩霞.云南核桃干旱气象指数保险产品设计与实践[J].中国农业气象,2021,42(12):1057-1067.
Qin T,Zhu C X.Design of Yunnan walnut drought weather index insurance product[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2021,42(12):1057-1067.(in Chinese)
- [5] Bokusheva R.Measuring dependence in joint distributions of yield and weather variables[J].Agricultural Finance Review,2011,71(1):120-141.
- [6] 储小俊,曹杰.基于 Copula 方法的天气指数保险产品设计与南通棉花降水指数保险为例[J].生态经济,2014,30(10):34-37.
Chu X J,Cao J.The designing for weather index insurance based on Copula method:taking Nantong cotton precipitation index insurance as an example[J].Ecological Economy, 2014,30(10):34-37.(in Chinese)
- [7] 陈雅子,申双和.江苏省水稻高温热害保险的天气指数研制[J].江苏农业科学,2016,44(10):461-464.
Chen Y Z,Shen S H.Development of weather index for rice high temperature and heat damage insurance in Jiangsu province[J].Jiangsu Agricultural Sciences,2016,44(10):461-464.(in Chinese)
- [8] Bokusheva R.Using Copulas for rating weather index insurance contracts[J].Journal of Applied Statistics,2018, 45(13):2328-2356.
- [9] Boyd M,Porth B,Porth L,et al.The design of weather index insurance using principal component regression and partial least squares regression:the case of forage crops[J].North American Actuarial Journal,2020,24(3):355-369.
- [10] 杨太明,刘布春,孙喜波,等.安徽省冬小麦种植保险天气指数设计与应用[J].中国农业气象,2013,34(2):229-235.
Yang T M,Liu B C,Sun X B,et al.Design and application of the weather indices of winter wheat planting insurance in Anhui province[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2013,34(2):229-235.(in Chinese)
- [11] 王月琴,赵思健,聂谦.山西沁县谷子综合天气指数保险研究[J].保险研究,2019(4):15-26.
Wang Y Q,Zhao S J,Nie Q.A study on synthetic weather index insurance for millet in Qinxian, Shanxi province[J]. Insurance Studies,2019(4):15-26.(in Chinese)
- [12] 王颖,于忱,王红瑞,等.基于条件混合三维 Copula 函数的多支流干流年最大流量模型研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(1):64-77.
Wang Y,Yu C,Wang H R,et al.Study of flood coincidence probability for multi-tributary based on mixed conditional 3D-Copula function[J].Journal of Basic Science and Engineering,2021,29(1):64-77.(in Chinese)
- [13] Sklar A.Random variables,distribution functions,and Copulas-a personal look backward and forward[J].IMS Lecture Notes-Monograph Series,1996,28:1-14.
- [14] 赵渊,刘庆尧,邝俊威,等.电网可靠性评估中相关性变量的非参数 R 藤 Copula 模型[J].中国电机工程学报,2020, 40(3):803-812.
Zhao Y,Liu Q Y,Kuang J W,et al.A nonparametric regular vine Copula model for multidimensional dependent variables

- in power system reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 803-812. (in Chinese)
- [15] 何鹏, 涂美艳, 高文波, 等. 四川省猕猴桃生态气候适宜性分析及精细区划研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(36): 124-132.
- He P, Tu M Y, Gao W B, et al. Analyzing and zoning of eco-climate suitability of kiwifruit in Sichuan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(36): 124-132. (in Chinese)
- [16] 王景红, 梁轶, 柏秦凤, 等. 陕西猕猴桃高温干旱灾害风险区划研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(7): 105-110.
- Wang J H, Liang Y, Bai Q F, et al. Study on risk zoning of high temperature and drought disaster for kiwifruit in Shaanxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(7): 105-110. (in Chinese)
- [17] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 2002, 419: 224-232.
- [18] 刘哲, 黄强, 杨元园, 等. 西江流域降水气温关系变异诊断及驱动力分析[J]. 水力发电学报, 2020, 39(10): 57-71.
- Liu Z, Huang Q, Yang Y Y, et al. Diagnosis and driving force analysis of variations in precipitation-temperature relation of Xijiang River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(10): 57-71. (in Chinese)
- [19] Leblois A, Quirion P, Alhassane A, et al. Weather index drought insurance: an ex ante evaluation for millet growers in Niger[J]. Environmental & Resource Economics, 2014, 57(4): 527-551.
- [20] 柏满迎, 孙禄杰. 三种 Copula-VaR 计算方法与传统 VaR 方法的比较[J]. 数量经济技术经济研究, 2007(2): 154-160.
- Bai M Y, Sun L J. The comparison between three Copula-VaR approaches and traditional VaR methods[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2007(2): 154-160. (in Chinese)