

杨晓娟,孙靖博,刘璐,等. 陕西黄土高原丘陵区苹果干旱天气指数保险研究[J]. 陕西气象,2024(5):64-70.

文章编号:1006-4354(2024)05-0064-07

陕西黄土高原丘陵区苹果干旱天气指数保险研究

杨晓娟¹,孙靖博²,刘璐³,刘晓迎⁴,吉文娟⁵,刘园¹,陈迪¹,
韩锐¹,刘布春¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;

2. 东北农业大学资源与环境学院,哈尔滨 150030;

3. 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心,西安 710016;

4. 河南省气象服务中心,郑州 450003;5. 云南省气候中心,昆明 650034)

摘要:陕西苹果在中国乃至世界占有重要地位,但却面临着严重的干旱风险。天气指数保险可有效转移气象灾害风险。基于大田试验数据,模拟水分对苹果产量的影响;利用陕西黄土高原丘陵区苹果基地县1981—2020年苹果生育期降水量数据构建苹果干旱指数,建立各基地县苹果干旱损失模型;使用EasyFit软件筛选各基地县干旱指数最优分布模型,模拟干旱发生概率;利用纯费率精算方法厘定各基地县苹果干旱指数保险费率,设计干旱指数保险赔付方案。结果显示:供水量(x)与苹果产量(y)间呈显著的二次曲线关系,即 $y = -0.0031x^2 + 7.8156x + 7681.1$ ($R^2 = 0.96$),基于此函数构建的各基地县苹果干旱损失模型决定系数均达0.99以上。苹果干旱指数最优分布模型为Lognormal、Normal、Logistic、Gamma的基地县分别为4、1、3、1个。各基地县苹果干旱纯费率范围为1.22%~2.12%,最低在洛川,最高在宝塔区。各基地县的赔付方案为基于苹果干旱指数的线性赔付,起赔点为各基地县干旱指数平均值。研究有效利用已有试验数据,建立灾害损失模型,为天气指数保险的研究提供了一种新思路;同时,县级费率的厘定和赔付方案的设计提高了农业保险为苹果产业服务的精确性和效率,为陕西黄土高原丘陵区苹果保险提供了科学支撑。

关键词:苹果;干旱指数;分布模型;保险费率;陕西黄土高原丘陵区

中图分类号:S661.1:S42

文献标识码:A

陕西是苹果生产大省,2021年产量为 1.24246×10^4 t,占全国苹果总产量的27.03%,位列全国第一。陕西苹果种植区生态气候优势明显,气象因子符合苹果优势产区指标需求,但大陆季风气候特征明显,地形地貌复杂,气候脆弱,气象灾害较重。干旱灾害是影响陕西苹果产业效益的主要气象灾害之一。农业保险能有效地转移和分散农业天气灾害风险,是一种高效的灾害补偿

方式。2019年,财政部等4部委共同发布《关于加快农业保险高质量发展的指导意见》,明确指出要“拓宽农业保险服务领域,稳步推广指数保险等产品”,为天气指数农业保险在我国的研究和发展提供了强有力的政策支持。天气指数农业保险是以特定的农业气象指标作为触发机制,如果超出预定标准,保险人就要负责赔偿的农业保险模式,它与大灾后实际的农作物受损状况无关,能有效

收稿日期:2023-07-07

作者简介:杨晓娟(1980—),女,陕西岐山人,汉族,博士,副研究员,主要从事农业气象灾害损失与保险研究。

通信作者:刘布春(1968—),女,内蒙古巴彦淖尔人,汉族,博士,研究员,主要从事农业气象灾害风险研究。

基金项目:国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项(2017YFC1502800);中国农业科学院科技创新工程;秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2022G-11)

避免传统农业保险道德风险、逆选择、勘察定损及理赔成本高的缺陷,成为近年来研究和应用的热点。

加拿大、印度、马拉维、摩洛哥、尼加拉瓜和墨西哥等国家的天气指数保险研究和应用相对比较成功和广泛^[1-12]。这些国家的天气指数保险产品多以降水和温度为气象因子。马拉维玉米^[7],摩洛哥小麦^[8],印度花生和蓖麻^[9],赞比亚棉花^[10]和加拿大饲料作物^[11]的降水指数天气保险以及哈萨克斯坦小麦温度指数保险^[12],都是值得借鉴的案例。我国传统农业保险业务的弊端促使新型农业保险产品的开发。政府相关文件逐步出台给农业保险的研究和应用提供了强有力的支持。从二十一世纪初,中国农业部门、气象部门、科研院所和高校等展开了农业天气指数保险研究,从起初的政策建议逐步发展到详细理论研究和产品设计研究与应用^[13-28]。因区域、标的和气象灾害的差异,天气指数保险产品具有“一站一式”,“一品一式”的特征。当前,我国天气指数农业保险正处于试点和投资迅速增长的阶段。据不完全统计,截止2021年6月,中国人民保险集团股份有限公司、国元农业保险股份有限公司、安华农业保险股份有限公司、安信农业保险股份有限公司、中国再保险(集团)股份有限公司和中航安盟财产保险有限公司等多家保险公司推进了天气指数农业保险产品在中国的试点和应用,为我国农业保险的发展开辟了新的道路。我国代表性的农业天气指数保险试点已达100多处,遍及上海、浙江、山东、四川、陕西等20多个省份,产品设计对象主要包括玉米、小麦、水稻等主粮作物,水果、烟叶、茶叶、黄瓜等经济作物,河蟹、牛羊等养殖类产品,如浙江柑橘冻害和水稻暴雨天气指数保险^[16-19]、安徽冬小麦种植干旱、倒春寒、干热风、阴雨等多个小麦关键生育期天气指数保险以及水稻高温热害天气指数保险^[21-22],海南芒果寒害天气指数保险^[23],江西早稻高温天气指数保险^[24],宁夏枸杞炭疽病天气指数保险^[26],陕西长武玉米降水指数保险^[27-28],甘肃庆阳苹果花期冻害指数保险^[29]等,但陕西苹果天气指数保险产品的研究和应用还较少。基于陕西苹果在我国和世界上的重要地位以及面临的干旱灾害风险,考虑到天气指数保险产

品的优势以及在我国发展的现状和趋势,开展陕西苹果干旱指数保险的研究尤为必要。同时,由于陕西苹果产区地貌的复杂性,以及县域经济的繁荣发展和保险业对时空尺度精细化需求的提高,亟需县级尺度的苹果保险费率及赔付方案。本研究在建立苹果水分模型的基础上,利用陕西黄土高原丘陵区苹果基地县1981—2020年苹果生育期降水量数据,构建了基于县级尺度的苹果干旱损失模型,利用纯费率精算方法厘定了陕西黄土高原丘陵区县级苹果干旱费率,并制定了相应的保险赔付模式,这将进一步提高农业保险为苹果产业服务的精确性和效率。

1 材料与方法

1.1 数据信息提取

利用资料查询和分析方法,筛选出了西北农林科技大学徐巧硕学位论文《黄土高原丘陵区干旱山地苹果树需水规律研究》^[30]。该研究在陕西黄土高原丘陵区开展了不同供水量对苹果产量影响的试验。对其中的试验信息和数据进行分析和加工。该试验相关信息如下。

1.1.1 试验材料 试验于2015年在陕西省榆林苹果试验站米脂党塔山地苹果科技示范基地进行,该基地位于 $37^{\circ}46'59''N$, $110^{\circ}5'26''E$,海拔为957 m。土壤为黄绵土,田间持水量为23.55%,0~100 cm土层平均土壤容重为 1.35 g/cm^3 ,有机质含量为 6.34 g/kg ,全氮和碱解氮的含量分别为 0.58 g/kg 和 34.73 mg/kg ,速效磷和速效钾的含量分别为 7.92 mg/kg 和 101.95 mg/kg 。试验苹果树定植于2010年春,株行距 $4\text{ m}\times 5\text{ m}$,主栽品种红富士,树势健壮,生长良好,长势一致,管理水平一致。

1.1.2 试验设计与结果 试验采取随机区组设计,1个单株为1小区,用土埂围出 $4\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的框,土埂高度为20 cm,防止灌入的水流失;紧贴土框边安装高30~50 cm烤漆三角铁斜架,上盖彩钢皮防止雨水进入。本文引用的试验处理共6个,每个处理以果树根系集中分布层(0~60 cm土层)的贮水量为标准,通过灌水形成不同处理。每个处理重复3次。灌水方式为漫灌,每隔7天根据当时0~60 cm土层的贮水量状况进行一次

灌溉补水。供水量和产量见表 1。

表 1 陕西黄土高原丘陵区苹果田间试验的供水量与产量

田间持水量/%	供水量/mm	产量/(kg/hm ²)
30~40	64.62	8 319.9
40~50	286.67	9 230.9
50~60	479.06	11 148.1
60~70	813.83	11 695.3
70~80	1 223.89	12 760.0
80~90	1 688.05	11 933.1

1.2 研究区域与数据来源

主要研究区域为陕西黄土高原丘陵区苹果基地县,相应气象观测站 1981—2020 年苹果生长季(3—10月)逐日降水数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),研究区域包含米脂、安塞、富县、黄陵、洛川、宝塔区、延川、延长和宜川。

1.3 干旱指数构建

基于供水量与苹果减产率的关系,选取苹果生育期(3—10月)的降水因子,构建苹果干旱指数。干旱指数(I)取 3 月 1 日—10 月 31 日降水累积值

$$I = \sum_{i=3\text{月}1\text{日}}^{10\text{月}31\text{日}} P_i \quad (1)$$

其中, I 为苹果干旱指数(单位:mm), P_i 为日降水量(单位:mm)

1.4 干旱概率分布

EasyFit 支持 50 多种分布模型,能方便快速地分析数据分布类型,通过 Anderson-Darling、Kolmogorov-Smirnov 和 Chi-Squared 方法进行拟合优度检验,筛选出最佳拟合模型;同时,能利用拟合模型计算概率密度和累积概率。利用 EasyFit 对 1981—2020 年陕西黄土高原丘陵区苹果基地县干旱指数进行分布筛选和拟合。

假定干旱指数的累积概率密度为 $F(I)$, 设置一定的干旱指数值 I_0 、 I_1 和 I_2 ($I_1 < I_2$), 干旱指数大于 I_0 的概率(P)为

$$P(I > I_0) = 1 - F(I_0), \quad (2)$$

干旱指数小于 I_0 的概率为

$$P(I < I_0) = F(I_0), \quad (3)$$

干旱指数在 $I_1 \sim I_2$ 区间的概率为

$$P(I_1 < I < I_2) = F(I_2) - F(I_1). \quad (4)$$

1.5 保险纯费率厘定

保险纯费率等于保险损失的期望值,即纯保费占保险金额的比例,纯保险费率 R 计算公式为^[17]

$$R = E[L_y] = \sum (L_r \times P). \quad (5)$$

式中, L_y 为产量损失, $E[L_y]$ 为产量损失的期望值, L_r 为苹果干旱减产率序列, P 为苹果干旱概率序列。

1.6 保险赔付设计

赔付保额参考陕西省苹果政策性农业保险保额。根据干旱指数和苹果减产率构建的干旱损失模型,设计陕西黄土高原丘陵区苹果干旱指数保险赔付方案,计算公式为

$$Q = A \times \frac{I_{\text{trig}} - I}{I_{\text{trig}} - I_{\text{exit}}}. \quad (6)$$

式中, Q 表示保险责任内赔偿金额, A 表示保险金额(Q 、 A 单位为元/hm²), I_{trig} 表示触发值(1981—2020年苹果干旱指数平均值), I_{exit} 表示退出值(1981—2020年苹果干旱指数最低值)。

2 结果与分析

2.1 苹果供水量和产量模型

从西北农林科技大学徐巧硕士论文《黄土高原丘陵区干旱山地苹果树需水规律研究》中提取苹果供水量(x)和产量(y)数据,绘制两者的散点图(图 1),并进行趋势拟合,两者呈现出二次曲线关系(图 2),其拟合方程为

$$y = -0.0031x^2 + 7.8156x + 7681.1 (R^2 = 0.96), \quad (7)$$

其结果显示,供水量的增加会提高苹果产量,但到一定程度后,则会抑制产量。

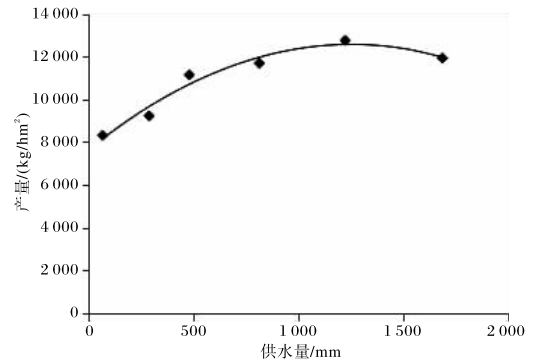


图 1 陕西黄土高原丘陵区苹果田间试验供水量与产量散点图

2.2 苹果干旱损失模型

根据苹果供水量和产量模拟函数(式 7)建立各基地县苹果干旱指数和产量的模拟方程。以米脂为例,1981—2020 年苹果干旱指数在 227~609 mm 之间,平均值为 403 mm。以 403 mm 为干旱临界点,对应的产量设定为苹果干旱减产率计算的基准点,分别计算干旱指数 380 mm,350 mm,320 mm,290 mm,260 mm,230 mm 和 200 mm 对应的产量,即为干旱处理对应的产量。基于干旱指数和对应减产率构建苹果干旱损失模型(表 2),各基地县模型为线性函数,决定系数均在 0.99 以上。

表 2 陕西黄土高原丘陵区苹果基地县干旱损失模型

基地县	模型函数	R^2
米脂	$-0.0575I + 23.014$	0.999 1
安塞	$-0.0512I + 25.26$	0.998 4
富县	$-0.0475I + 24.851$	0.998 7
黄陵	$-0.0476I + 25.075$	0.998 5
洛川	$-0.0457I + 24.996$	0.998 4
宝塔区	$-0.0486I + 24.916$	0.998 7
延川	$-0.0527I + 24.139$	0.999 0
延长	$-0.0519I + 24.556$	0.998 7
宜川	$-0.0495I + 24.395$	0.999 1

注:模型函数中的变量 I 为干旱指数。

2.3 苹果干旱指数分布

利用 Easyfit 进行陕西黄土高原丘陵区苹果基地县 1981—2020 年苹果干旱指数概率分布的筛选和拟合。表 3 列出了陕西黄土高原丘陵区苹果基地县 1981—2020 年苹果生育期的最优分布模型和各自的参数。各基地县苹果干旱指数的最优分布模型不尽相同,米脂苹果干旱指数最优分布为 Normal,安塞等 3 个基地县苹果干旱指数最优分布为 Logistic,黄陵等 4 个基地县苹果干旱

指数最优分布模型为 Lognormal,富县苹果干旱指数最优分布为 Gamma。

2.4 苹果干旱指数保险

2.4.1 苹果干旱指数保险纯费率 一般将农作物减产率[5.0%,15.0%)、[15.0%,25.0%)、[25.0%,35.0%) 和 $\geq 35\%$ 分别划分为轻灾、中灾、重灾和巨灾^[31],结合苹果干旱损失模型(表 2),得到相应灾害等级的干旱指数 I 的阈值,将其指定为轻旱、中旱、重旱和特旱的分级阈值。基于 1981—2020 年苹果干旱指数的最优分布模型(表 3),根据式(2)~式(4)计算各干旱等级发生的概率。

表 3 陕西黄土高原丘陵区苹果基地县干旱指数最优分布模型及参数

基地县	最优分布模型	参数	
米脂	Normal	$\sigma=86.91$	$\mu=403.18$
安塞	Logistic	$\sigma=58.75$	$\mu=498.93$
富县	Gamma	$\alpha=20.04$	$\beta=26.31$
黄陵	Lognormal	$\sigma=62.76$	$\mu=499.46$
洛川	Logistic	$\sigma=59.90$	$\mu=558.09$
宝塔区	Lognormal	$\sigma=0.25$	$\mu=6.22$
延川	Logistic	$\sigma=62.49$	$\mu=460.93$
延长	Lognormal	$\sigma=0.25$	$\mu=6.14$
宜川	Lognormal	$\sigma=0.21$	$\mu=6.18$

注: σ 为尺度参数; μ 为位置参数; α 为形状参数; β 为反尺度参数。

通过确定苹果生育期干旱风险概率及其造成损失的大小,可以实现苹果干旱保险纯费率的厘定。各基地县苹果不同等级干旱发生概率,结合对应的减产率数据,根据式(5)厘定陕西黄土高原丘陵区苹果基地县干旱指数保险纯费率(表 4)。各基地县的苹果干旱纯费率范围为 1.22%~2.12%,最低在洛川,最高在宝塔区。

表 4 陕西黄土高原丘陵区苹果基地县干旱纯费率

基地县	米脂	安塞	富县	黄陵	宜川	洛川	宝塔区	延川	延长
费率/%	1.51	1.56	1.77	1.64	1.50	1.22	2.12	1.83	2.06

2.4.2 苹果干旱指数保险赔付方案 根据式(6)设计陕西黄土高原丘陵区苹果基地县干旱指数保

险赔付方案(表 5)。基于陕西省现行苹果政策性农业保险保额,每公顷苹果的保额设定为 30 000

元。各基地县是以干旱指数 I 为变量的线性赔付函数,函数加深的数字为触发值,即每个苹果基地县 1981—2020 年苹果干旱指数的平均值,实际干旱指数低于这个数值时即启动赔付,赔付公式的分母为触发值(1981—2020 年苹果干旱指数平均值)与退出值(1981—2020 年苹果干旱指数最低值)的差。以洛川为例,苹果干旱指数小于 558 mm 时,启动赔付。

表 5 陕西黄土高原丘陵区苹果基地县干旱指数保险赔付方案

基地县	赔偿金额公式/(元/hm ²)
米脂	$30\,000 \times (403 - I) / 176$
安塞	$30\,000 \times (499 - I) / 259$
富县	$30\,000 \times (527 - I) / 210$
黄陵	$30\,000 \times (531 - I) / 225$
宜川	$30\,000 \times (496 - I) / 196$
洛川	$30\,000 \times (558 - I) / 228$
宝塔区	$30\,000 \times (516 - I) / 221$
延川	$30\,000 \times (461 - I) / 211$
延长	$30\,000 \times (477 - I) / 227$

注: I 表示干旱指数。

3 结语与讨论

(1) 天气指数和作物灾害损失关系模型是天气指数农业保险设计的难点和核心,其精确性影响到天气指数保险的基差风险。以往天气指数和作物灾害损失模型的构建主要基于统计模型、作物机理模型和天气灾害试验,但统计模型存在样本量不足和气候变量生物学意义不明确的问题,并且很难分离出特定阶段单因子气象灾害对作物生长和产量造成的损失。作物机理模型将植物营养、生理生化、气象和土壤等相关知识整合进模型,用数学模型描述生理生态、物理和化学等复杂过程,模拟植物对各种营养元素、气象因子和环境条件等的响应,能在一定程度上克服统计模型的不足^[6, 32],但机理模型开发难度大,种类不齐全。天气灾害试验能在控制条件下,分离出单个因子对产量的影响,在结果上具有合理性和科学性,却费时费力费成本。随着科技的发展,数据库中有

着海量的试验数据,通过“挖掘”和“加工”实现数据的“增值”,可以节约成本和时间,这为天气指数和作物灾害损失定量关系模型的构建指出了一个新的途径。本研究根据陕西黄土高原丘陵区苹果干旱损失模型建立的试验需求,在查询数据库和资料分析的基础上,对前人试验研究成果进行二次开发,提取苹果产量和水分数据,设计干旱指数,建立干旱指数和苹果损失定量关系模型,这种方式可为其它天气指数保险的研究提供技术和方法参考。

(2) 分布模型的选择影响到费率厘定的精度。保险费率厘定是估计参保者期望损失、确定损失发生概率和损失大小的过程。王克以新疆莎车、沙雅和阿克苏的棉花为例,专门分析了分布模型对农业保险费率厘定的影响,结果显示:不同分布模型厘定的保险费率有明显的差别,与最优分布模型 Logistic 厘定的保险费率相比,在莎车县,用 Normal 分布厘定出的保险费率大约高出 0.4%,偏态分布正态化约高出 1.7%,Weibull 分布大约高出 1.6%,Kernel 核密度则大约低了 0.9%;在沙雅县,这一水平大约分别为高 0.8%、低 0.3%、高 8% 和 0.9%;阿克苏市分别为高 0.7%、低 0.2%、高 7.2% 和高 1.0%^[31]。本研究利用 Easyfit 筛选出陕西黄土高原丘陵区基地县苹果干旱指数的最优分布模型,有效的提高了费率厘定的精度。优选 Lognormal、Normal、Logistic、Gamma 的基地县个数依次是 4、1、3、1。各基地县的苹果干旱纯费率范围为 1.22%~2.12%,最低在洛川,最高在宝塔区。县级尺度的费率厘定提高了农业保险为苹果产业服务的精确性和效率。在费率厘定的基础上,制定了陕西黄土高原丘陵区基地县苹果干旱指数保险赔付模式,为陕西黄土高原丘陵区基地县苹果保险提供了科技支撑。

(3) 本研究有一定的不足之处,苹果供水与产量模拟试验的研究品种为红富士,试验地点在米脂,米脂地处陕北,土壤特征、气象条件等与其它苹果基地县有一定的差异,因此建立的模型有待更多品种的验证,这对于提高保险指数的准确度有重要意义。

参考文献:

- [1] SKEES Jerry, HAZELL Peter, MIRANDA Mario. New approaches to public/private crop yield insurance[R]. Washington, D C: The World Bank, 1999.
- [2] LINNEROOTH-BAYER Joanne, MECHLER Reinhard. Disaster safety nets for developing countries: extending public-private partnerships[J]. *Environmental Hazards*, 2007, 7(1): 54-61.
- [3] BARNETT Barry, MAHUL Olivier. Weather index insurance for agriculture and rural areas in lower-income countries[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2007, 89(5): 1241-1247.
- [4] FUCHS Alan, WOLFF Hendrik. Concept and unintended consequences of weather index insurance: the case of Mexico[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2010, 93(2): 505-511.
- [5] PETERSON Nicole. Developing climate adaptation: the intersection of climate research and development programmes in index insurance[J]. *Development and Change*, 2012, 43(2): 557-584.
- [6] LEBLOIS Antoine, QUIRION Philippe. Agricultural insurances based on meteorological indices: realizations, methods and research challenges[J]. *Meteorological Applications*, 2013, 20(1): 1-9.
- [7] HESS Ulrich, SYROKA Joanna. Weather-based insurance in Southern Africa: the case of Malawi[M]. Washington D C: The World Bank, 2005.
- [8] STOPPA Andrea. Design and use of weather derivatives in agricultural policies: the case of rainfall index insurance in Morocco[C]. Capri (Italy): International Conference "Agricultural Policy Reform and the WTO: Where are we heading", 2003.
- [9] GINÉ Xavier, MENAND Lev, TOWNSEND Robert, et al. The Oxford Handbook of the Indian Economy[M]. Oxford: Oxford University Press, 2012, 167-194.
- [10] BLACK Emily, TARNAVSKY Elena, MAIDMENT Ross, et al. The use of remotely sensed rainfall for managing drought risk: a case study of weather index insurance in Zambia[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 342.
- [11] ALEXA Simpson. An analysis of rainfall weather index insurance: the case of forage crops in Canada [D]. Manitoba: The University of Manitoba, 2016.
- [12] CONRADT Sarah, FINGER Robert, SPÖRRI Martina. Flexible weather index-based insurance design[J]. *Climate Risk Management*, 2015, 10: 106-117.
- [13] 刘布春,梅旭荣. 农业保险的理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [14] 陈盛伟. 农业气象指数保险在发展中国家的应用及在我国的探索[J]. *保险研究*,2010(3):82-88.
- [15] 杨晓娟,刘布春,刘园. 中国农业保险近10年来的实践与研究进展[J]. *中国农业科技导报*,2012,14(2): 22-30.
- [16] 姜伟平,吴利红,倪沪平,等. 柑橘冻害保险气象理赔指数设计[J]. *中国农业科学*,2009,42(4): 1339-1347.
- [17] 姜伟平,吴利红,陈华江,等. 柑橘气象指数保险合同费率厘定分析及设计[J]. *中国农业科学*, 2010,43(9): 1904-1911.
- [18] 姜伟平,吴利红,姚益平. 水稻暴雨灾害保险气象理赔指数设计[J]. *中国农业科学*,2010,43(3): 632-639.
- [19] 吴利红,姜伟平,姚益平,等. 水稻农业气象指数保险产品的设计:以浙江省为例[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(23):4942-4950.
- [20] YIN J M, MIAO Q L, KONG P. Products design of weather-based index insurance for Nanfeng citrus freezing injury[J]. *Advanced Materials Research*, 2012,518: 5411-5416.
- [21] 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.
- [22] 杨太明,孙喜波,刘布春,等. 安徽省水稻高温热害保险天气指数模型设计[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(2): 220-226.
- [23] 王春乙,张亚杰,张京红,等. 海南省芒果寒害气象指数保险费率厘定及保险合同设计研究[J]. *气象与环境科学*, 2016, 39(1): 108-113.
- [24] 孙擎,杨再强,殷剑敏,等. 江西早稻高温逼熟气象灾害指数保险费率的厘定[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(5): 561-566.
- [25] 刘凯文,刘可群,邓爱娟,等. 基于开花期地域差

- 异的中稻高温热害天气指数保险设计[J]. 中国农业气象, 2017, 38(10): 679-688.
- [26] 曹雯, 武万里, 杨太明, 等. 宁夏枸杞炭疽病害天气指数保险研究[J]. 干旱气象, 2019, 37(5): 857-865.
- [27] 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.
- [28] 杨晓娟, 刘布春, 刘园, 等. 陕西长武玉米降水指数保险设计[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 899-907.
- [29] 秦拓, 张天峰, 曹彦超, 等. 庆阳市苹果花期冻害指数保险设计[J]. 陕西气象, 2023(2): 69-73.
- [30] 徐巧. 黄土高原丘陵区干旱山地苹果树需水规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [31] 王克. 农作物单产分布对农业保险费率厘定的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [32] JONES J, HOOGENBOOM G, PORTER C, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3): 235-265.