

Research on the Construction of Human Impact Benefit Index and Its Application in Insurance Based on the Physical-Financial Coupling Model

Fang Guo¹ Jiayi Cheng² Xuyi Lv¹ Xuechuan Liu¹ Xiaoya Wang¹

1. Liaocheng Meteorological Bureau, Liaocheng, Shandong, 252000, China

2. Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan, 650500, China

Abstract

Against the backdrop of global climate change and increasing frequency of extreme weather events, weather modification stands out as a crucial technological approach to harness cloud water resources and mitigate meteorological disasters, demonstrating significant strategic value. While China ranks among the world's top in weather modification operations, persistent challenges like uncertain operational effectiveness evaluation and economic benefits that are hard to quantify have constrained its marketization and sustainable development. This study establishes a quantitative framework integrating meteorological physical effects with financial risk management, innovatively proposing the Artificial Weather Modification Benefit Index (AIWEI). It develops a three-tier technical framework: "physical effect assessment → benefit equivalence conversion → financial index generation," combining multi-source observational data with cloud numerical modeling to convert physical effects like rainfall enhancement into standardized tradable indices. The research provides operational benefit assurance, mitigates fiscal fund risks, and drives the transformation of weather modification from traditional public services to a collaborative model integrating public services and market mechanisms.

Keywords

Weather Modification; Operational Effect Evaluation; Benefit Index (AIWEI); Index Insurance; Numerical Simulation; Risk Management

基于物理-金融耦合模型的人影效益指数构建及保险应用研究

郭芳¹ 程佳怡² 吕绪祎¹ 刘学川¹ 王晓亚¹

1. 聊城市气象局, 中国·山东聊城 252000

2. 云南师范大学, 中国·云南昆明 650500

摘要

在全球气候变化与极端天气频发背景下,人工影响天气作为开发云水资源、防御气象灾害的重要技术手段,战略价值突出。我国人工影响天气作业规模居世界前列,但长期面临作业效果评估不确定、经济效益难以显性化等问题,制约其市场化与可持续发展。本研究构建气象物理效应与金融风险管理相衔接的量化体系,创新性提出人工影响天气效益指数(AIWEI),建立“物理效应评估—效益当量转化—金融指数生成”三层技术框架,融合多源观测数据与云解析数值模式,将增雨等物理效果量化为标准可交易指数。研究可为作业效益提供保障、分散财政资金风险,推动人工影响天气由传统公共服务向公共服务与市场机制协同发展转型。

关键词

人工影响天气; 作业效果评估; 效益指数(AIWEI); 指数保险; 数值模拟; 风险管理

1 引言

1.1 研究背景与意义

全球气候变化导致极端干旱事件频发,对粮食安全构成严峻挑战。以2025年夏季为例,山东省聊城市遭遇严重

旱情,最大受旱面积达37万亩,对夏播作物构成直接威胁^[1]。在此背景下,人工影响天气作为主动抗旱的科技手段,其作业需求与日俱增。我国已建立起世界最大规模的人影业务体系,但长久以来,如何科学、定量地回答“作业是否有效、效益几何”这一核心问题,始终是制约行业发展的瓶颈^[2]。

1.2 国内外研究现状

人影效果评估方面:国际通行方法主要围绕物理检验、统计检验和数值模拟检验三大类展开^[4]。国内业务实践在此

【作者简介】郭芳(1979—),女,本科,工程师,从事人工影响天气,气象服务与应用气象研究。

基础上,已形成从作业条件识别、合理性分析到效果检验的规范化业务流程^[5]。尤其在数值模拟方面,耦合催化模块的中尺度模式已成为定量评估作业潜力和分离“有/无”催化效果的重要工具^[6]。

气象金融与指数保险方面:基于气温、降水量等自然气象指数的金融衍生品与农业保险已形成较为成熟的市场与理论体系^[7]。其核心优势在于以客观指数触发赔付,规避了传统保险定损难、道德风险高的问题。但这一模式始终未延伸至对“人工催化效果”这一兼具科学不确定性和公共产品属性的特殊标的进行开发。

研究缺口:当前“气象物理”与“金融工程”的研究呈平行发展态势,缺乏一个权威、可信的“转译器”将规范化的科学评估结果转化为金融合约的基础变量。本研究旨在填补这一空白。

1.3 研究内容与技术路线

本文核心研究内容包括:

构建 AIWEI 指数:依据国家人影效果评估业务指南,建立“物理效应评估—效益当量转化—金融指数生成”的三层量化理论框架。

设计金融应用模型:基于 AIWEI,设计指数保险产品,详述其合约结构、定价模型(融合历史成功率与天气可实现度)与风险管理机制。

典型案例模拟验证:以 2025 年夏季山东省聊城市抗旱增雨作业为背景,完整模拟 AIWEI 指数的计算与保险应用流程,验证体系的可行性与实用性。

2 人影作业效益指数 (AIWEI) 构建的理论与方法

2.1 核心概念与构建原则

人影作业效益指数 (Artificial Influence Weather Effect Index, AIWEI) 是一个基于规范化的业务评估流程,旨在客观、定量反映单次或批次人影作业所产生的、可归因于人工催化干预的净物理效益的标准化数值。其构建遵循三大原则:科学性(基于物理机制与公认模型)、客观性(依赖可观测数据与透明算法)和业务可衔接性(流程与国家现行人影效果评估业务规范兼容)。

2.2 基于业务规范的三层量化框架

第一层:物理效应评估层

本层目标是采用业务指南推荐的“数值模拟检验”作为核心方法,剥离自然降水与催化贡献。

数据输入:

输入要素包括:1)全要素作业信息(依据《人工影响天气作业信息格式规范》获取的作业时间、位置、催化剂量等);

2)多源观测数据(聊城市及周边雷达、卫星、自动气象站、探空资料);

3)数值模式初始场与边界条件。

核心方法——有/无催化对比模拟:采用耦合了碘化银

(AgI)催化模块的 WRF 中尺度数值模式,针对同一目标天气过程,分别进行控制试验(CTRL,无催化)和催化试验(EXP,有催化)的模拟。两个试验除催化模块开关外,初始场、边界条件及物理参数化方案完全一致。

关键参数提取——面雨量增量(ΔR):对比分析两个试验的输出结果,计算目标区域(如聊城市受旱的冠县、临清等地)在作业影响时段内的格点降水差异。核心评估参数为面雨量增量:

$$\Delta R = R_{EXP} - R_{CTRL}$$

其中, R_{EXP} 与 R_{CTRL} 分别为催化与未催化情景下的区域平均面雨量。 $\Delta R > 0$ 表示正增雨效果。

第二层:效益当量转化层

本层目标是将物理参数 ΔR 转化为具有初步经济含义的标准化当量。

增雨效益当量(Water Use Effectiveness, WUE):将面雨量增量转化为水资源体积当量。公式为:

$$WUE = \Delta R * A * 10^3$$

其中, ΔR 单位为毫米, A 为预先根据催化剂扩散模型或模拟确定的“作业影响区”面积(平方公里)。

以聊城案例模拟为例,若影响区 A 为5000平方公里, ΔR 为1.3毫米,则 $WUE = 1.3 * 5000 * 10^3 = 6.5 * 10^6$ 立方米。

第三层:金融指数生成层

本层目标是将效益当量标准化为无量纲、可交易的金融指数。

指数定义: $AIWEI = WUE / WUE_{std}$ 。

其中, WUE_{std} 为标准化基准值。该基准值可根据区域历史作业评估结果设定,例如设定为对应一次“典型成功作业”(如 $\Delta R = 1.0$ 毫米)所产生的效益当量。在聊城案例中,若取 WUE_{std} 为对应 $\Delta R = 1.0$ 毫米的当量($5.0 * 10^6$ 立方米),则计算得 $AIWEI = 6.5 / 5.0 = 1.3$ 。

指数特性:AIWEI是一个相对值, $AIWEI > 1$ 表示作业效果优于历史基准水平。此设计避免了直接货币化带来的价格波动干扰,使指数更稳定、更适用于金融合约。

3 基于 AIWEI 的指数保险产品的设计

3.1 产品基本结构与运作机制

参与方:投保人(作业委托方,如聊城市农业农村局)、保险人(保险公司/再保险公司)。

保险标的:特定人影作业的预期效益,以 AIWEI 指数衡量。

触发与赔付机制:

触发值($AIWEI_T$):在保险合同中事先约定。可基于作业成本、预期效益或历史平均水平设定。例如,设定 $AIWEI_T = 1.0$,即要求作业效果至少达到历史基准水平。

赔付函数:采用线性赔付结构。赔付额= $\text{Max}(0, (AIWEI_{Actual} - AIWEI_T) / AIWEI_T) * \text{保险金额}$ 。其中, $AIWEI_{Actual}$ 为作业后按第二章流程计算的最终指数值。该设计

意味着仅当作业效果未达约定标准时，才按比例进行赔付，实现了对财政资金的“效果保障”。

3.2 定价模型：融合技术成功率与天气可实现度

保险费率 (P) 是核心，本研究提出混合定价模型：

$$P = P_{base} * f(\lambda)$$

基础费率 (P_{base})：反映人影作业固有的技术不确定性。 $P_{base} = (1 - S_{hist}) * L$ 。其中， S_{hist} 为基于历史同类作业通过回溯模拟计算的 AIWEI 达标率 ($AIWEI_{Actual} \geq AIWEI_T$ 的概率)； L 为保险人目标赔付率。

天气可实现度调整因子 ($f(\lambda)$)：反映本次作业具体天气条件的优劣。作业前，利用数值模式集合预报评估自然降水潜力 $R_{CTRL_forecast}$ 。定义实现度因子

$$\lambda = (R_{CTRL_forecast} - R_{threshold}) / R_{threshold}$$

其中 $R_{threshold}$ 为该类作业所需的最低自然云水条件气候阈值。 λ 的概率分布可通过历史预报与实况分析得到， $f(\lambda)$ 为基于该分布的调整函数 (λ 越小， $f(\lambda)$ 越大，费率越高)。

3.3 保险人的风险对冲策略

为管理 AIWEI 指数的聚合风险，保险人可采取：

再保险：向国际再保险市场分保，转移极端损失风险。

发行巨灾债券：设计与区域性 AIWEI 指数篮子 (如“黄淮海夏旱增雨指数”) 挂钩的巨灾债券，将风险证券化，转移至资本市场。

利用传统天气衍生品对冲：分析 AIWEI 指数与区域自然降水量指数之间的相关性，通过交易降水量期货、期权等工具，对冲部分基础天气风险。

4 案例模拟：以 2025 年山东聊城市抗旱增雨为例

4.1 案例背景与数据基础

旱情背景：2025 年 6 月上中旬，聊城市出现持续高温少雨天气，全市最大受旱面积达 37 万亩，夏播作物出苗与生长受到严重威胁 [1]。

作业能力：山东省“人工影响天气水资源保障工程”已在聊城落地实施，具备实施大规模飞机及地面火箭增雨作业的能力。

模拟设定：假设针对一次过境的具备增雨潜力的天气系统，聊城市人影办组织实施了一次联合增雨作业。目标区域设定为受旱严重的冠县、临清等区县，总面积约 5000 平方公里。

4.2 AIWEI 指数计算模拟

物理效应评估模拟：利用 WRF 模式进行“有/无”作业对比模拟。控制试验 (CTRL) 能合理再现当日实际观测到的弱降水过程 (模拟面雨量 $R_{CTRL} = 0.8$ 毫米)。催化试验 (EXP) 模拟显示，在催化作用下，目标区域降水增强，模拟面雨量 $R_{EXP} = 2.1$ 毫米。

效益当量与指数计算：

计算得面雨量增量： $\Delta R = 2.1 - 0.8 = 1.3$ 毫米。

增雨效益当量： $WUE = 1.3 * 5000 * 10^3 = 6.5 * 10^6$ 立方米。

采用区域历史基准 WUE_{std} (对应 $\Delta R=1.0$ 毫米，即 $5.0 * 10^6$ 立方米)，最终得到 $AIWEI_{Actual} = 1.3$ 。

4.3 保险合同结算模拟

假设投保人 (聊城市农业农村局) 为此次作业投保，保单约定：保险金额为作业成本 (假设为 C) 的 150%，触发值 $AIWEI_T = 1.0$ 。

情景 1 (实际模拟结果)：

$AIWEI_{Actual} = 1.3 > 1.0$ ，未触发赔付。作业效果显著，保障了抗旱目标，财政资金使用效率高。

情景 2 (假设效果不佳)：若模拟得

$AIWEI_{Actual} = 0.7$ ，则触发赔付。

赔付额 $= ((1.0 - 0.7) / 1.0) * 1.5C = 0.45C$ 。

投保人可回收 45% 的作业成本，显著平滑了财政支出波动，对冲了作业效果不达预期的风险。

4.4 讨论

本模拟展示了 AIWEI 指数如何将一次复杂的气象作业效果，转化为清晰、客观的金融合约结算依据。聊城市作为气象为农服务效益评价试点，其已有的效益定量评估工作基础，与 AIWEI 指数的经济转化逻辑高度契合，证明了本地化应用的可行性。

5 结语

本研究以国家人影效果评估业务规范为科学基石，构建了人工影响天气效益指数 (AIWEI) 的三层量化框架，并创新性地将其应用于指数保险产品的设计。通过对山东聊城市 2025 年抗旱增雨作业的模拟，验证了从物理评估到金融结算的全链条可行性。该体系的核心价值在于，通过金融工程手段，为人影作业固有的科学不确定性提供了市场化风险分散工具，能够提升公共财政资金使用的韧性和效率。

未来研究可在以下方向深化：1) 发展融合物理检验、统计检验结果的 AIWEI 集合评估算法，提升指数稳健性；2) 利用机器学习技术，开发基于实时数据的 AIWEI 快速估算模型，满足保险快速定损需求；3) 探索区块链技术用于指数计算数据、流程与结果的全链存证，确保其不可篡改与可追溯性。

参考文献

- [1] 聊城市气象局. 聊城市 2025 年 6 月农业气象服务专报[R]. 2025.
- [2] 中国气象局人工影响天气中心. 人工增雨 (雪) 作业效果评估业务指南 (2022 版) [Z]. 2022.
- [3] 张岳恒, 等. 农业气象指数保险研究进展[J]. 气象, 2018, 44(7): 845-856.
- [4] World Meteorological Organization (WMO). WMO Statement on the Status of Weather Modification Research and Operations[R]. WMO, 2021.
- [5] 李集明, 等. 人工增雨效果统计检验方法研究进展[J]. 气象科技进展, 2015, 5(3): 6-13.