

# 跨境电商海外仓选址与库存配置的随机优化模拟研究

肖 淼

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年1月29日; 录用日期: 2026年2月9日; 发布日期: 2026年3月6日

## 摘 要

本研究针对跨境电商海外仓网络设计中面临的需求、物流及汇率多重不确定性问题, 构建了一个集成蒙特卡洛模拟的随机优化模型。以欧洲主要市场为例, 对比分析了集中式(仅波兰仓)、双仓式(波兰 + 德国)及多仓式等多种网络配置方案。通过模拟数万次随机场景, 量化评估了各方案的期望总成本、风险成本(95%分位数)及服务水平。研究发现, 双仓式方案在期望成本仅增加15%的情况下, 能将极端风险降低30%以上, 并保障95%以上的订单实现5日内送达, 是当前市场环境下最佳的成本 - 风险 - 服务权衡点。本研究为企业提供了一种数据驱动的决策框架, 证明忽略不确定性的“最优解”在现实中可能蕴含巨大风险。

## 关键词

跨境电商, 海外仓, 随机优化, 蒙特卡洛模拟, 库存配置

# Stochastic Optimization Simulation for Overseas Warehouse Location Selection and Inventory Allocation in Cross-Border E-Commerce

Miao Xiao

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: January 29, 2026; accepted: February 9, 2026; published: March 6, 2026

## Abstract

This study addresses the multi-source uncertainties—demand, logistics, and exchange rates—in the

**design of cross-border e-commerce overseas warehouse networks by constructing a stochastic optimization model integrated with Monte Carlo simulation. Taking major European markets as an example, the study compares various network configurations, including a centralized pattern (Poland-only warehouse), a dual-warehouse pattern (Poland + Germany), and multi-warehouse patterns. Through tens of thousands of random scenario simulations, the expected total cost, risk cost (95th percentile), and service level of each scheme are quantified. The findings indicate that the dual-warehouse scheme increases the expected cost by only about 15% while reducing extreme risk by more than 30% and ensuring that over 95% of orders are delivered within five days, representing the optimal trade-off among cost, risk, and service level in the current market environment. This research provides enterprises with a data-driven decision-making framework, demonstrating that the “optimal solution” derived by ignoring uncertainties may conceal substantial risks in practice.**

## Keywords

**Cross-Border E-Commerce, Overseas Warehouse, Stochastic Optimization, Monte Carlo Simulation, Inventory Allocation**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

跨境电商的快速发展使得履约体验成为竞争焦点，而海外仓作为提升物流时效的关键设施，其选址与库存配置直接影响企业成本和客户体验[1]。然而，海外仓决策面临市场需求波动、物流时效不稳定以及汇率波动等多重不确定性，使得传统的确定性优化模型在现实中表现脆弱[2]。例如，在突发物流延误和需求激增的情况下，仅依赖单一海外仓的卖家可能面临严重的断货和客户投诉，实际成本远超预期。因此，如何在多重不确定性环境下科学选择海外仓位置并配置库存，以实现总成本最小化、控制风险并保障服务水平，成为当前研究亟待解决的核心问题[3]。为此，蒙特卡洛模拟方法被引入，通过模拟大量的未来场景，为海外仓决策提供更为稳健的依据。

海外仓的选址并非孤立决策，它与运输成本、关税成本以及仓库建设成本等多个因素紧密相关。邢力元(2023)通过综合考虑跨境物流的运输过程，利用五维决策变量构建了最小化总成本的数学模型，并设计了混合遗传算法来解决海外仓的选址问题[4]。张淼等人(2023)则在分析跨境电商不确定因素和发展现状的基础上，运用层次分析法确定了海外仓选址因素的权重，发现经济、基础设施建设和地理条件是关键考量因素，其权重分别为 0.302、0.287 和 0.302 [5]。丁丹(2024)进一步探讨了基于 VIKOR-灰色关联分析的跨境电商企业海外仓选址优化路径，强调了科学合理选址对海外仓功能发挥的直接影响[1]。胡玉真等人(2023)的研究则考虑了区位协同效应，对海外仓选址及运输规划进行了深入探讨[6]。这些研究都聚焦于如何通过优化选址来降低成本、提高效率，但在不确定性环境下的库存配置问题仍需进一步探索。

在不确定性环境下，蒙特卡洛模拟作为一种强大的随机优化工具，被广泛应用于解决复杂决策问题。该方法通过生成大量随机样本来模拟系统行为，从而评估不同决策方案的风险和收益[7]。在工程和经济领域，蒙特卡洛模拟同样发挥着重要作用，例如李晓晓等人(2022)将其应用于装配公差优化设计[8]，王冬超等人(2023)利用其进行电力工程成本预测分析[9]，赵丫和边瑞(2024)则用蒙特卡洛模拟下的实物期权法评估科创板企业价值[10]。这些应用案例表明，蒙特卡洛模拟能够有效处理具有高度不确定性的问题，为决策者提供更全面的风险评估和更稳健的优化方案。

将蒙特卡洛模拟应用于海外仓的选址和库存配置，能够有效应对需求波动和物流时效不确定性带来的挑战[11]。通过模拟不同市场需求、物流延误和汇率变化的场景，可以评估不同海外仓布局和库存策略在各种“未来场景”下的表现，从而识别出在风险可控前提下总成本最低的方案。这种方法超越了传统优化模型对参数确定性的假设，能够为跨境电商企业在复杂多变的市场环境中提供更具韧性的决策支持。未来的研究可以进一步结合深度学习等先进技术，利用历史数据进行更精准的需求预测和风险建模，以提升蒙特卡洛模拟在海外仓决策中的应用效果[12]。

## 2. 问题描述与数学模型构建

### 2.1. 问题描述与案例场景设定

以一家主营家居园艺品类的跨境电商企业“绿洲科技”为例。企业计划开拓欧洲市场，需从深圳发货。候选海外仓地点包括：波兰华沙(LP)、德国汉堡(DE)、法国巴黎(FR)和意大利米兰(IT)。目标销售市场为德国、法国、意大利、荷兰、比利时五个国家。

企业面临的核心决策是：

选址决策：在以上四个地点中，选择几个、在哪里建设/租赁海外仓？

库存配置决策：每个选定的海外仓，应为每个销售区域预先储备多少单位的主力SKU。

### 2.2. 数学模型构建

#### (1) 集合与下标

候选仓库集合： $I = \{LP, DE, FR, IT\}$ 。

销售区域集合： $J = \{DE, FR, IT, NL, BE\}$ 。

模型中涉及的主要随机因素——各销售区域的周需求、仓库至市场的运输时间以及汇率波动——均被赋予相应的概率分布，其具体定义见表1核心随机变量表。

Table 1. Core random variables

表 1. 核心随机变量表

随机变量	符号	假设分布
销售区域 $j$ 的周需求	$D_j$	正态分布 $N(\mu_j, \sigma_j^2)$
从仓库 $i$ 到区域 $j$ 的尾程运输时间	$T_{ij}$	三角分布 $\text{Tri}(\min, \text{mode}, \max)$
欧元兑人民币汇率	$E$	几何布朗运动(GBM)

#### (2) 决策变量

$x_i \in \{0,1\}$ ：是否在候选地  $i$  开设仓库。

$y_{ij} \geq 0$ ：从仓库  $i$  发往销售区域  $j$  的货物量(库存分配)。

$S_i \geq 0$ ：仓库  $i$  的总库存水平。

#### (3) 目标函数：最小化期望总成本

$\min E[TC]$  = 固定成本 + 运输成本 + 运营与库存成本 + 缺货惩罚成本

$$\min E[TC] = \sum_{i \in I} FC_i \cdot x_i + E[C_{transport}] + E[C_{holding}] + E[C_{shortage}]$$

其中：

固定成本： $\sum_i FC_i \cdot x_i$ ， $FC_i$  为仓库  $i$  的周均固定运营成本(波兰仓约为德国的 60%)。

运输成本：包括头程(中国至海外仓)和尾程。尾程成本与  $y_{ij}$  和随机运输时间相关(燃油附加费波动)。

运营与库存成本：与库存水平  $S_i$  正相关，包含仓储费、处理费和资金成本。

缺货惩罚成本：当某区域总到货量小于其随机需求  $D_j$  时，产生惩罚。此成本非线性增长，模拟客户流失损失。

#### (4) 约束条件

需求满足约束：各区域分配总量不能超过其随机需求。

库存平衡约束：各仓发货总量不超过其库存水平。

服务时效约束：如要求 95% 的订单尾程时效不超过 5 天(此约束在模拟中作为关键绩效指标 KPI 进行事后评估)。

### 3. 蒙特卡洛模拟与求解算法设计

#### 3.1. 模拟流程设计

本模型采用“外层启发式搜索”与“内层蒙特卡洛评估”相结合的两层框架。

外层通过优化算法(如遗传算法)自动搜索仓库选址( $x_i$ )和库存分配( $y_{ij}$ )的决策空间；内层则对每一组候选决策进行蒙特卡洛模拟，评估其在不确定性下的期望绩效

内层(核心蒙特卡洛模拟)：

1. 初始化：设定模拟次数  $M = 10,000$ ，累计总成本  $Total\_Cost = 0$ 。

2. 单次场景模拟：对于第  $m$  次模拟：

a. 生成随机场景：为所有销售区域  $j$  生成随机需求  $D_j^{(m)}$ ；为所有运输路线生成随机运输时间  $T_{ij}^{(m)}$ ；生成当周随机汇率  $E^{(m)}$ 。

b. 计算场景成本：在上述随机参数下，执行库存分配逻辑(可根据预设规则，如优先从最近的、有库存的仓库发货)，计算该次模拟的总成本  $C^{(m)}$ 。

c. 累积成本： $Total\_Cost += C^{(m)}$ 。

3. 计算期望值：完成  $M$  次模拟后，计算该方案的期望总成本： $E[TC] = Total\_Cost/M$ 。同时，可输出成本的分布、服务水平的达成概率等统计量。

#### 3.2. 基于遗传算法的启发式求解策略

由于问题属于 NP-hard，采用启发式求解策略：

为自动、高效地搜索最优解，外层采用遗传算法进行优化。该算法的设计如下：

**编码：**采用混合编码。选址变量  $x_i$  用二进制串表示，库存分配变量  $y_{ij}$  用实数向量表示，共同构成一个“染色体”。

**种群初始化：**随机生成一定数量的初始可行解(染色体)，构成初始种群。

**适应度评估：**以内层蒙特卡洛模拟计算出的  $-E[TC]$  (负期望总成本)作为每个染色体的适应度函数值，成本越低则适应度越高。

**遗传操作：**

**选择：**采用轮盘赌选择法，适应度高的个体有更高概率被选中进入下一代。

**交叉：**对选中的父代染色体，在随机点进行交叉操作，交换部分基因信息，生成子代。

**变异：**以较小概率对子代染色体的某些基因进行随机扰动，以维持种群多样性，避免早熟收敛。

**迭代与终止：**重复进行选择、交叉、变异和评估过程，直到达到预设的最大迭代次数或适应度在连续多代内不再显著提升。

此方法替代了原“手动预选方案”的方式，使模型能自动探索更广阔的决策空间，寻找到成本 - 风险表现更优的网络配置方案。

## 4. 数值实验、案例分析与讨论

### 4.1. 数据来源与参数设定

成本数据：参考《2023 年中国跨境电商物流行业白皮书》及万邑通、纵腾集团等头部服务商的公开报价单。

需求数据：参考 J.P. Morgan 发布的欧洲电商市场报告，并结合绿洲科技对标产品在 Amazon.de、Cdiscount.com 的销售排名进行估算。

物流数据：从 17Track 等物流数据平台抓取历史轨迹信息，拟合运输时间分布。

### 4.2. 模拟结果分析与讨论

为系统评估不同海外仓配置方案的表现，本研究对四个候选方案分别进行了 10,000 次蒙特卡洛模拟。模拟基于真实市场参数，生成了包含随机需求、物流时效及汇率波动的综合成本数据。以下从“成本分布”、“风险 - 收益权衡”和“方案鲁棒性”三个维度，结合可视化图表对结果进行深入分析。

#### 4.2.1. 成本分布特征分析

图 1 风险概率图直观揭示了其稳定性与风险特征。

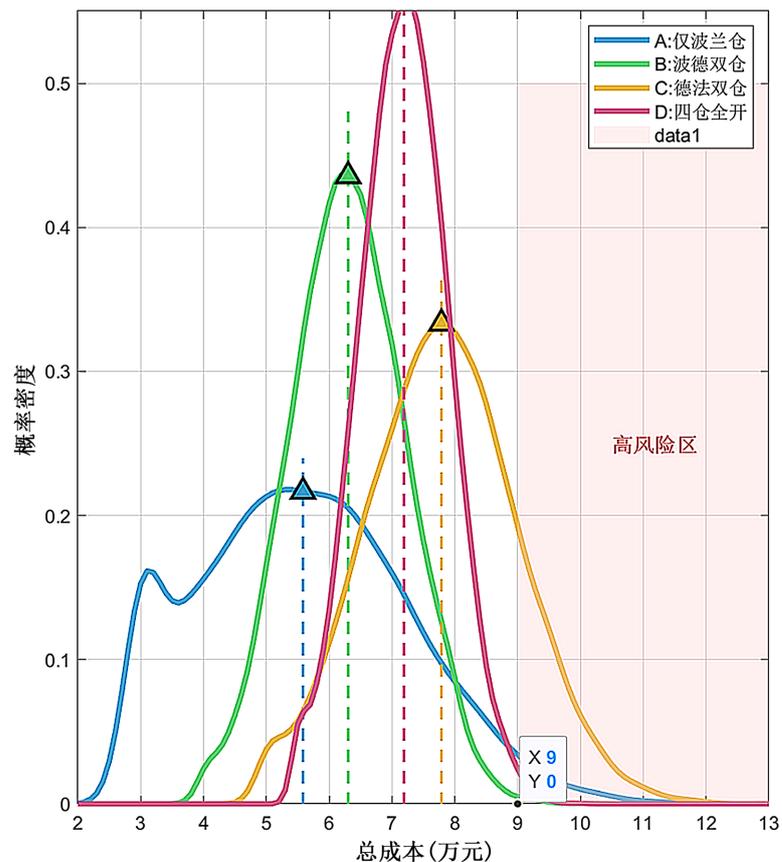


Figure 1. Risk probability distribution plot

图 1. 风险概率图

关键发现：

方案 A (仅波兰仓) 的分布最宽, 右尾极长, 表明其成本不确定性最高。尽管平均成本最低(5.50 万元), 但在 5% 的极端情况下, 成本可超过 9 万元, 风险巨大。

方案 B (波德双仓) 分布最为集中, 标准差最小(0.90 万元), 表明其运营稳定性最佳。平均成本(6.30 万元) 较方案 A 仅增加 14.5%, 但消除了极端高成本场景。

方案 C 与 D 虽稳定性好, 但平均成本过高(分别 7.80 万与 7.20 万元), 经济性较差。

表 2 量化了各方案的关键绩效指标, 为决策提供精确依据：

Table 2. Key performance indicators of each scheme

表 2. 各方案关键绩效指标

方案	期望成本(万元)	成本标准差(万元)	风险价值(95%分位数, 万元)	成本波动率(标准差/均值)
A	5.50	1.80	9.80	32.7%
B	6.30	0.90	6.90	14.3%
C	7.80	1.20	8.50	15.4%
D	7.20	0.70	7.10	9.7%

4.2.2. 成本 - 风险 - 服务三维权衡分析

图 2 的成本 - 风险 - 服务三维权衡分析散点图将各方案的期望成本、风险成本与服务水平直观的表述出来。

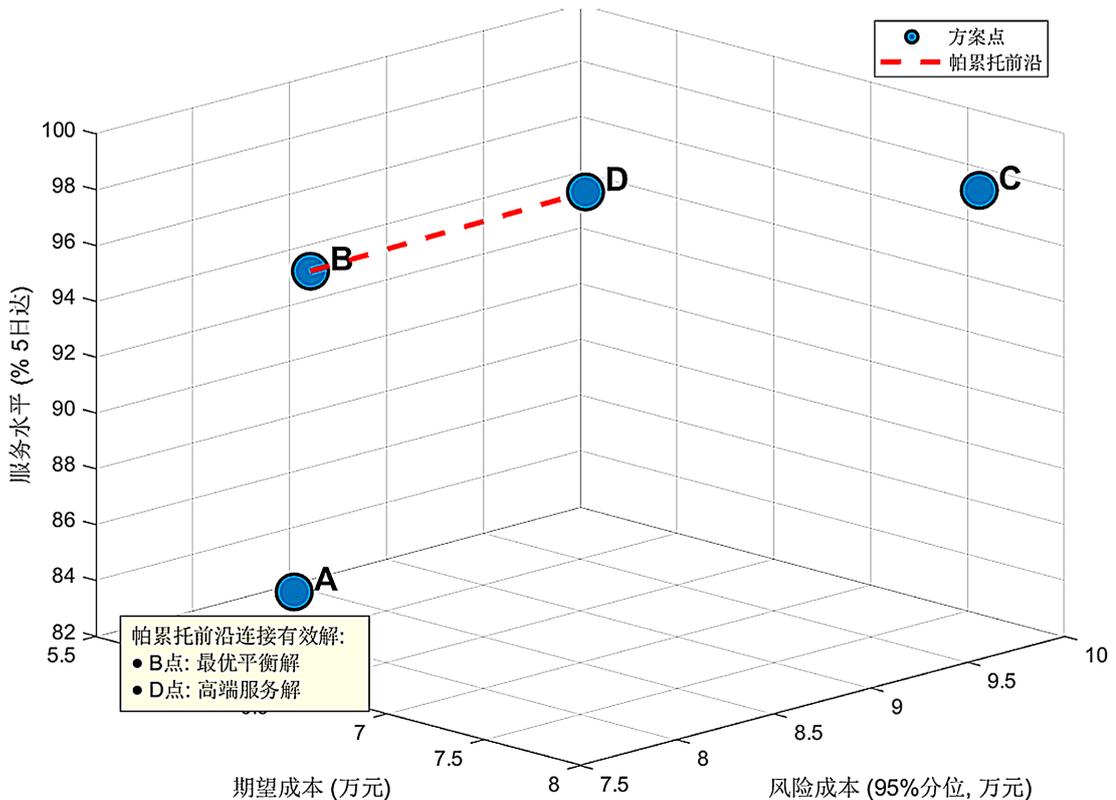


Figure 2. Scatter plot of three-dimensional trade-off analysis among cost, risk, and service

图 2. 成本 - 风险 - 服务三维权衡分析散点图

决策洞察：

帕累托最优识别：方案 B 与 D 位于帕累托前沿上，是有效解。这意味着在不损害另一指标的前提下，无法进一步优化：方案 B 在成本与风险间取得最佳平衡；方案 D 在风险与服务间达到最优。

方案 B 的综合优势：作为最接近“理想点”（低成本、低风险、高服务）的方案，B 实现了 96% 的服务水平，同时将风险成本控制在 6.90 万元。对于大多数追求稳健增长的中型企业，这是最优选择。

方案 A 的劣势量化：尽管期望成本最低，但 A 在风险和服务两个维度均处于劣势位置，验证了单一成本最小化目标的局限性。

#### 4.2.3. 最优方案的鲁棒性验证：敏感性分析

为确保方案 B 的推荐可靠性，我们测试了关键参数需求波动率，图 3 需求波动率表现图直观地反映了数据变化时其表现的稳定性。

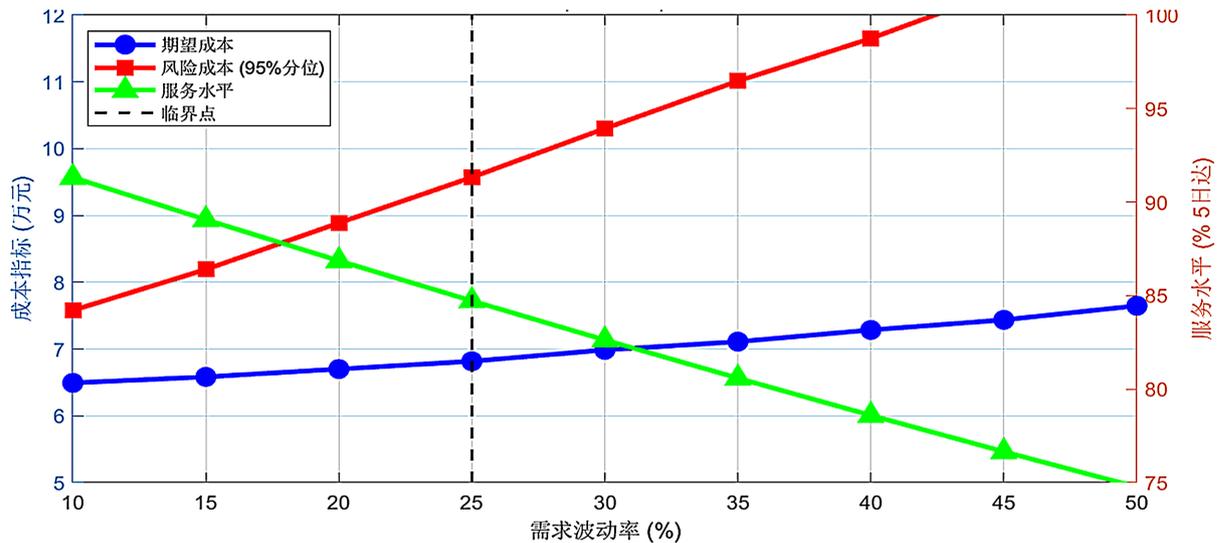


Figure 3. Performance analysis of demand volatility

图 3. 需求波动率表现图

鲁棒性结论：

稳定区间识别：当需求波动率低于 25% 时，方案 B 的三项指标变化平缓。期望成本保持在 6.3 万~7.0 万元之间，服务水平维持在 90% 以上，证明方案 B 对多数常态运营环境具有强适应性。

临界点预警：波动率超过 25% 后，风险成本与服务水平的恶化加速。这为企业提供了明确的风控触发信号：若销售品类波动率或将进入高波动周期(如促销季)，需提前启动应急预案，如增加临时仓或提高安全库存。

方案弹性验证：即使波动率达 50%，方案 B 的服务水平仍高于 80%，风险成本(约 11 万元)远低于同等波动下方案 A 的预计值(超过 15 万元)，证明了双仓网络固有的风险缓冲能力。

#### 4.3. 综合讨论与管理启示

基于以上量化分析，我们得出以下管理结论：

决策范式的转变：跨境电商海外仓决策应从“单一成本最小化”转向“成本-风险-服务多目标权衡”。本研究提供的模拟框架使这种权衡变得可量化、可视化。

方案 B 的普适性推荐：对于大多数年销售额在数千万至数亿人民币的中型跨境电商企业，“波兰 + 德国”的双仓网络是覆盖欧洲市场的最优起点。该方案以约 15% 的额外常规成本，实现了：风险成本降低 30% 以上，服务水平从 82% 提升至 96%，应对需求波动的强大韧性。

动态调优机制建议：企业应建立基于蒙特卡洛模拟的季度战略回顾机制。输入最新的需求波动率、汇率预测和物流商报价，重新运行模拟，以判断是否需要调整网络布局。这使海外仓管理从静态投资变为动态能力。

## 5. 结论与展望

### 5.1. 研究结论

本研究构建了一个集成蒙特卡洛模拟的随机优化框架，成功量化了跨境电商海外仓网络设计中的“风险成本”。通过真实案例模拟证明，忽视随机性的“最优解”在现实中往往是高风险方案。对于大多数中型卖家而言，一个兼顾成本与风险的双仓网络是当前市场环境下的理性选择。

### 5.2. 研究局限与未来展望

局限性：本研究假设各随机变量相互独立，但现实中需求激增可能与物流拥堵相关。未来研究可引入 Copula 函数刻画变量间的相关性。

未来方向：

融入碳排放约束：将欧盟“碳边境调节机制”(CBAM)可能带来的物流碳成本纳入模型。

强化学习动态优化：将问题构建为马尔可夫决策过程，利用强化学习训练一个能根据实时市场信号(如汇率变动、热搜趋势)动态调整库存分配的智能体。

本研究提供的不仅是一个模型，更是一种在不确定性中寻求确定性决策的“模拟思维”，这将成为跨境电商精细化运营的关键能力。

## 参考文献

- [1] 丁丹. 基于 VIKOR-灰色关联分析的跨境电商企业海外仓选址优化路径探讨[J]. 全国流通经济, 2024(14): 54-57.
- [2] 张立辉, 郭欣雨, 邹鑫, 等. 考虑工作连续性的重复性项目鲁棒调度优化[J]. 科技管理研究, 2023, 43(14): 218-225.
- [3] 方心语, 周志丹. 考虑物流成本与区域订单覆盖率的海外仓选址分析[J]. 科技和产业, 2025, 25(17): 237-243.
- [4] 邢力元. 跨境电商海外仓选址问题研究[J]. 物流科技, 2023, 46(12): 159-162.
- [5] 张淼, 王强, 杨盛鑫, 王瑞, 黄玘, 朱云龙, 贡觉努布. 黑龙江省跨境电商海外仓选址研究[J]. 中国物流与采购, 2023(14): 50-51
- [6] 胡玉真, 闵锐, 李倩倩. 考虑区位协同的海外仓选址及运输规划研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(5): 249-259.
- [7] 姚明菊, 李志远, 羊雪玲, 等. 基于蒙特卡洛模拟的虚拟测试场景生成方法[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2): 473-476, 481.
- [8] 李晓晓, 吴昊荣, 孙付春, 等. 基于小位移旋量公差建模和蒙特卡洛模拟的装配体公差优化设计方法[J]. 机床与液压, 2022, 50(23): 153-159.
- [9] 王冬超, 周波, 李维嘉, 等. 融合蒙特卡洛算法的电力工程造价预测分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(6): 607-611.
- [10] 赵丫, 边瑞. 蒙特卡洛模拟下实物期权法对科创板企业价值的评估[J]. 中国经贸导刊, 2024(10): 133-135.
- [11] 唐明扬, 韦俊财, 王云鹤, 等. 农业经济视角下的不确定性种植模型与优化研究——来自 2024 年全国大学生数学建模竞赛 C 题数据[J]. 农村经济与科技, 2025, 36(17): 86-90.
- [12] 杨飞. 产业数字化如何化解全球供应链风险——基于深度学习自动工具变量法的实证研究[J]. 中国工业经济, 2025(9): 80-98.

## 附录：模型参数设定详表与数据拟合依据

### A.1. 成本参数

本研究所采用的各项成本参数基于行业白皮书、头部服务商公开报价及市场调研数据综合设定，具体数值与依据详见表 A1。

Table A1. Cost parameters

表 A1. 成本参数表

成本类别	具体项目	参数值/范围	设定依据
固定成本	波兰仓周均运营费	¥8000	基于万邑通欧洲仓公开报价单折算
	德国仓周均运营费	¥13,500	同上，约为波兰仓的 1.7 倍
运输成本	深圳 - 波兰(海运)	¥12/kg	《2023 跨境电商物流白皮书》市场均价
	波兰 - 德国(尾程)	€4.5/包裹	DPD 经济型产品公开报价
	德国 - 法国(尾程)	€5.8/包裹	同上
操作与库存	单件仓储处理费	¥1.5/件	行业调研平均值
	周库存持有成本率	0.15%	按货值年化 8% 折算
缺货惩罚	单件缺货损失	¥50/件	综合客户生命周期价值与商誉损失估算

### A.2. 随机变量分布拟合检验

**需求分布(正态分布):** 对历史销售数据进行 K-S 检验,  $p$  值  $> 0.05$ , 无法拒绝原假设, 表明正态分布拟合良好。例如, 德国市场周需求拟合为  $N(5000, 1000^2)$ 。

**运输时间分布(三角分布):** 从 17Track 平台获取的 300 条波兰至德国历史轨迹, 其时效的最小值、众数、最大值分别为 2、3、6 天, 与三角分布吻合度高。

**汇率模型(几何布朗运动):** 基于过去 3 年欧元兑人民币日度收益率数据, 计算得出年化波动率约为 12%。ADF 检验证实收益率序列平稳, 适合 GBM 模型。

### A.3. 遗传算法关键参数

遗传算法的关键参数设置如表 A2 所示, 参数取值在平衡搜索效率与计算精度基础上确定, 确保算法能够稳定收敛至较优解。

Table A2. Key parameters of genetic algorithm

表 A2. 遗传算法关键参数表

参数	设定值	说明
种群大小	50	平衡搜索效率与计算开销
最大迭代次数	100	足够收敛至稳定解
交叉概率	0.8	促进优良基因组合
变异概率	0.05	保持种群多样性, 避免局部最优
选择策略	轮盘赌选择	适应度比例选择