

华北山区农作物种植结构的时空分布研究

廖雪娇, 王梦丹*, 唐耀平

湖南科技学院理学院, 湖南 永州

收稿日期: 2025年1月26日; 录用日期: 2025年2月19日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

在我国的华北山区, 耕地类型多样且分布零散、农作物种植种类多, 因此合理选种与优化种植可提升管理效率, 减少各种不确定因素可能造成的种植风险。建立以农作物种植的时空限制为约束条件, 销售利润为目标函数的线性规划模型, 利用此模型, 可得出不同销售情况下各地域的时空演变趋势和最佳种植方案, 实现各类作物种植结构最优化, 可为山区农业可持续性发展提供方向, 对实现农业资源可持续利用具有重要意义。

关键词

时空演变趋势, 农作物种植结构, 线性规划模型

Research on the Temporal and Spatial Distribution of Crop Planting Structures in Mountainous Areas of North China

Xuejiao Liao, Mengdan Wang*, Yaoping Tang

School of Science, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou Hunan

Received: Jan. 26th, 2025; accepted: Feb. 19th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

In the mountainous areas of North China, there are diverse types of cultivated land that are scattered, and a wide variety of crops are planted. Therefore, rational selection of seeds and optimization of planting can improve management efficiency and reduce planting risks that may be caused by various uncertain factors. A linear programming model is established with the temporal and spatial constraints of crop planting as the constraint conditions and sales profit as the objective function.

*通讯作者。

By using this model, the temporal and spatial evolution trends of different regions under different sales situations and the optimal planting plan can be obtained, realizing the optimization of the planting structure of various crops. This can provide a direction for the sustainable development of mountainous agriculture and is of great significance for the sustainable utilization of agricultural resources.

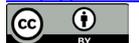
Keywords

Temporal and Spatial Evolution Trend, Crop Planting Structure, Linear Programming Model

Copyright © 2025 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

农业是我国的立国之本、民生之源。我国华北地区的农村山区面积广大，山地农业在全国农业中有着重要的地位[1]，山地丘陵区粮食作物的种植对保障我国粮食安全具有十分重要的作用，如何在有限的土地资源充分发挥农作物的种植潜力仍存在很多挑战。由于华北山区耕地类型多样且分布零散，农作物种植种类也相当丰富。因此，选择适宜的农作物，优化种植策略，有利于方便田间管理，提高生产效益，减少各种不确定因素可能造成的种植风险。所以根据乡村的实际情况，传统的种植方式在面对自然因素及社会因素的影响下难以充分利用土地资源，而有效地利用农作物种植的空间格局和空间动态变化，因地制宜地利用自然资源进行农业生产的需求十分重要[2]。农作物种植结构是农作物收入与土地资源开发利用的基础，农业土地利用的变化是不同尺度下自然、社会和经济因素共同驱动的结果，作物种植面积变化是作物选择行为的直接反映。随着对精确、及时地获取作物种植信息的需求愈发强烈，目前，已经有大量的研究应用于农作物的种植结构分布中。例如：刘珍环[3]等综合运用时序变化趋势、空间集聚分析等方法分析近 30 年中国农作物种植结构时空变化；为考虑因子交互作用对种植结构空间分异，张红梅[4]等以 1 km² 地理网格为研究单元，运用分区统计法、空间自相关分析法及地理探测器法分析黑龙江省典型县耕地种植结构空间分异特征；Massey 等[5]通过分析 MODIS NDVI 时间序列曲线下不同农作物的特征，运用决策树分类方法成功地获取了美国本土农作物的空间分布和种植面积数据；Grifths [6]等研究者结合了 Sentinel-2 和 Landsat 的数据集，通过应用随机森林算法，成功地绘制了德国农作物的空间分布图。鉴于此，针对华北山区的独特地理特征，合理地规划农作物的种植结构能够实现农业生产利益的最大化，也避免了由于单一物种造成的暂时性失业(农闲失业)情况，同时有利于农户的风险规避[7]，解决农民生计问题。本文以山西省大同市灵丘县车河村 1201 亩露天耕地为研究区，当地农民根据农作物的生长规律采取“小而全”的多样化种植经营方式[8]，从一个曾经的贫困小山村，如今发展成为面貌一新的美丽乡村，现已成为国家乡村振兴计划的先进典例。利用 2024 年“高教杯”全国大学生数学建模大赛 C 题中附件给出的耕地和农作物的基本情况和 2023 年的农作物种植和相关统计数据，通过建立线性规划模型，求解预测出未来几年的最优农作物种植方案，为当地农作物种植结构调整优化提供参考。

2. 区域地块种植结构分布可视化

本文主要研究华北某乡村不同类型山区的农作物种植，以给出最优种植方案。赛题的附件中给出了此地区现有耕地和农作物的基本情况，例如：该乡村现有露天耕地 1201 亩，分散为 34 个地块，包括平

旱地、梯田、山坡地和水浇地四个类型，另有 16 个普通大棚和 4 个智慧大棚，每个大棚耕地面积为 0.6 亩；因其独特的地理位置，常年温度偏低，大多数耕地每年只能种植一季农作物；而大棚通过人工调节温度、光照和湿度等环境因素，能够在不适宜的季节提供适宜的生长条件，从而实现两季种植等等。本文分析整理了这些农作物信息，为了更直观化，用关系图表示了各类型不同农作物的种植条件(如图 1)。

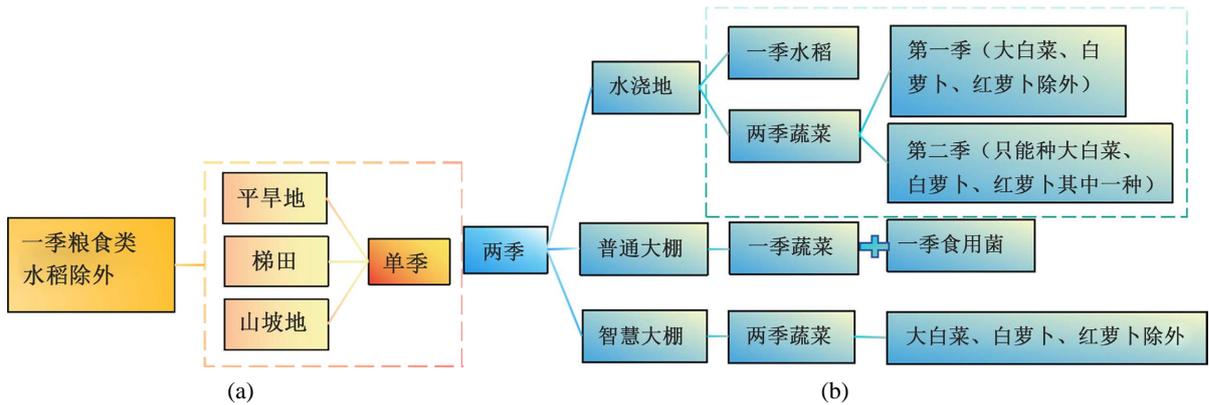


Figure 1. Planting conditions of different crops
图 1. 不同农作物的种植条件

为明确华北某山区 34 个大小不一的干旱地、梯田、山坡地、水浇地、普通大棚和智慧大棚在该村的时空分布情况，满足农作物每季的种植地不能太分散以及各农作物在单个地块(含大棚)种植的面积不宜太小的要求，本文首先对各区域的面积占比关系利用树状图进行可视化(如图 2)。为减少外界因素影响简化模型，假设该村产量稳定，即 2024 年至 2030 年的预期销售量均与 2023 年产量持平，将收集的数据预处理，得到了未来预期销售量中单位利润排在前十的农作物及其预期销售量(如图 3)。

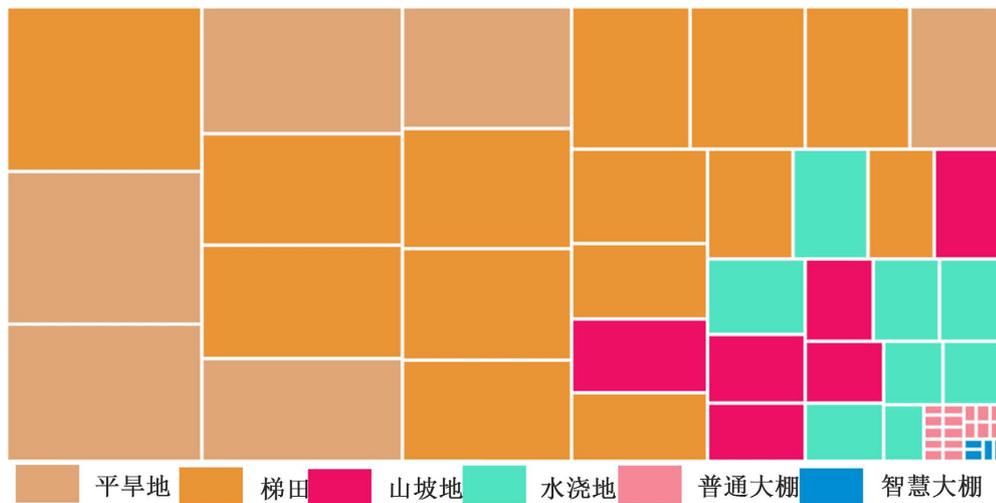


Figure 2. Distribution of plot types in mountainous areas of north China villages
图 2. 华北乡村山区各地块类型的分布

进一步，我们将销量较多的部分农作物数据进行整理，计算得到了其预期销售量及其不同季度的销售单价(如表 1)。

农作物利润

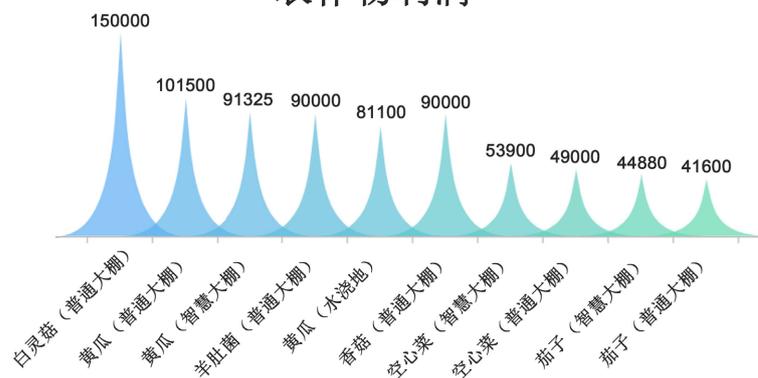


Figure 3. Top 10 crops in unit profit and their profits

图 3. 单位利润前十位的农作物及其利润

Table 1. Expected future sales volume and unit selling price

表 1. 未来预期销售量及销售单价

农作物名称	预期销售量	销售单价	农作物名称	预期销售量	销售单价
黄豆	57,000	3.25	黑豆	21,850	7.5
红豆	22,400	8.25	绿豆	33,040	7
爬豆	9875	6.75	小麦	170,840	3.5
玉米	132,750	3	谷子	71,400	6.75
高粱	30,000	6	黍子	12,500	7.5
荞麦	1500	40	南瓜	35,100	1.5
红薯	36,000	3.25	筱麦	14,000	5.5
大麦	10,000	3.5	水稻	21,000	5.5
缸豆	36,480	8 或 9.6	刀豆	26,880	6.75 或 8.1
芸豆	6480	6.5 或 7.8	土豆	30,000	3.75 或 4.5
西红柿	36,210	6.25 或 7.5	茄子	38,400	5.5 或 6.6
菠菜	900	5.75 或 6.9	青椒	1200	5.25 或 6.8
菜花	2400	5.5 或 6.6	包菜	2700	6.5 或 7.8
油麦菜	4500	5 或 6	小青菜	32,000	5.75 或 6.9
黄瓜	2100	7 或 7.05	生菜	600	5.25 或 6.3
辣椒	1200	7.25 或 8.7	空心菜	3600	4.5 或 5.4
黄心菜	1800	4.5 或 5.4	芹菜	1800	4 或 4.8
大白菜	60,000	2.5	白萝卜	12,500	2.5
红萝卜	6000	3.25	榆黄菇	9000	57.5
香菇	7200	19	白灵菇	18,000	16
羊肚菌	4200	100			

3. 最优种植结构分布模型

由于该村每季的总产量超过相应预期销售量时，超过的部分无法正常销售，会造成浪费。所以，首

先计算每种类型地块的销售收入和其对应的种植成本，然后建立以最大化销售总利润为目标，以农作物的生长规律要求和方便田间管理等为约束条件的线性规划模型，求解即可得到种植的最优方案(如图 4)。

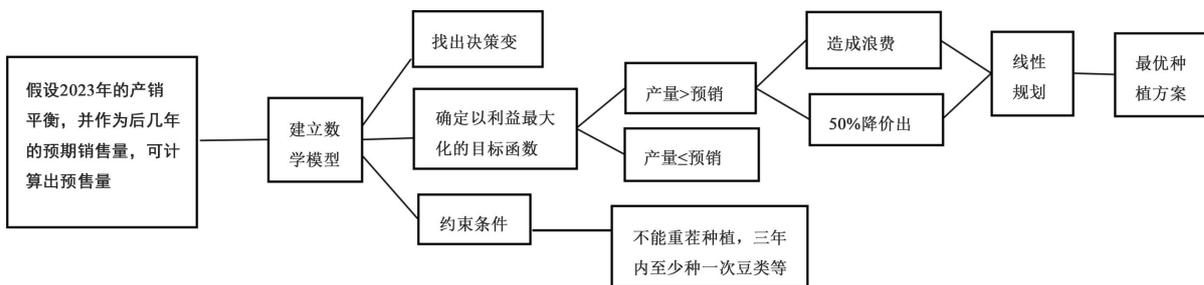


Figure 4. Flowchart for solving the optimal planting plan
图 4. 最优种植方案求解流程图

在最大化销售总利润的目标下，使得能够满足农作物的生长规律，方便耕种作业和田间管理，再建立相关模型。此规划模型需要考虑农作物的销售总利润、种植方式、农作物单个地块种植面积、农作物种植总面积、豆类植物的时间、农作物种植类型等，下面进行模型的符号说明。

1) 目标：农作物的销售总利润 Q

销售总利润是指在不同类型地块上的销售利润之和，在不考虑销售费用的情况下，农作物销售总利润等于销售收入减去销售成本，当销售总利润越大，代表该地区的农作物种植结构分布方案越好。

① 当未来的产量小于等于其销售量时，即：

$$Q = A + B + C + D + E + F$$

② 当未来的产量大于其销售量时分两种情况：

第一种情况为：滞销的产物均被浪费无法进行售卖。即：

$$Q = Y_j \cdot M_j - (a + b + c + d + e + f)$$

第二种情况为：滞销的产物均以半价进行售卖。即：

$$Q = Y_j \cdot M_j + q - (a + b + c + d + e + f)$$

式中 A, B, C, D, E, F 分别表示平旱地、梯田、山坡地、水浇地、普通大棚和智慧大棚。 M_j 表示第 j 种农作物的销售单价， Y_j 表示第 j 种农作物的实际销售量， a, b, c, d, e, f 分别表示在各类型地块上的种植成本， q 表示超出部分的销售收入。

2) 约束条件：种植方式限制

联系生活实际可知连续重茬种植会导致土壤中养分不平衡，作物根系分泌毒素，不能被同一类作物继续吸收利用，且连续种植该种农作物会让植物缺少其所必需的某种元素而导致减产。

$$A_{jt} \neq A_{j(t+1)}$$

式中 A_{jt} 表示在第 i 块平旱地上第 j 种作物在第 t 年的第一季的种植面积。同理可得其他类型的地块种植方式与平旱地一致。

3) 约束条件：农作物的单个地块种植面积的的限制

山区各类型的地块较为分散，不利于农民对农作物的田间管理，但当每种作物在单个地块的种植面积不小于该块耕地的 $\frac{2}{5}$ 时，作物的管理更方便。即：

$$A_{ijt} \geq \frac{2}{5} \sum_{i=1}^6 A_{ijt}$$

同理可知在梯田、山坡地、水浇地、普通和智慧大棚的单地块种植面积的约束与在平旱地时相似。

4) 约束条件：农作物种植总面积限制

农作物种植总面积指能够使用的面积，所有农作物的种植面积不能超过该村能够使用的面积。即：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{15} \sum_{i=1}^6 A_{ijt} + \sum_{j=1}^{15} \sum_{i=1}^{14} B_{ijt} + \sum_{j=1}^{15} \sum_{i=1}^6 C_{ijt} + \sum_{j=16}^{34} \sum_{i=1}^8 D_{ijt} + \sum_{j=138}^{41} \sum_{i=1}^{16} E_{ijt} + \sum_{j=17}^{34} \sum_{i=1}^4 A_{ijt} = R \\ R \leq S \end{cases}$$

式中 S 表示该乡村的 1210 亩耕地， R 表示所有地块上农作物的种植面积。

5) 约束条件：豆类植物的种植时间限制

为了确保大豆的健康生长和高产，土壤养分的恢复和病虫害防范，种植后的地块需间隔三年以上方可再次种植。即：

$$\sum_{t=T}^{T+2} \sum_{j \in \text{豆类}} X_{ijt} \geq 1 \quad (X \in \{a, b, c, d, e, f\})$$

式中 T 取 2024 年和 2027 年。

6) 约束条件：农作物种植类型限制

在平旱地、梯田、山坡地和水浇地每年种植一季粮食作物(水稻除外)，在水浇地每年种植一季水稻或两季蔬菜；普通大棚适宜每年种植一季蔬菜和一季食用菌，智慧大棚适宜每年种植两季蔬菜。

下面建立以农作物销售总利润为目标函数，以种植方式、农作物单个地块种植面积、农作物种植总面积、豆类植物的时间、农作物种植类型为约束条件的线性规划模型。

$$\begin{aligned} & \text{目标函数: } \max Q \\ & \begin{cases} A_{ijt} \neq A_{ijt+1} \\ B_{ijt} \neq B_{ijt+1} \\ C_{ijt} \neq C_{ijt+1} \\ D_{ijt} \neq D_{ijt+1} \\ E_{ijt} \neq E_{ijt+1} \\ F_{ijt} \neq F_{ijt+1} \\ A_{ijt} \geq \frac{2}{5} \sum_{i=1}^6 A_{ijt} \\ B_{ijt} \geq \frac{2}{5} \sum_{i=1}^{14} B_{ijt} \\ C_{ijt} \geq \frac{2}{5} \sum_{i=1}^6 C_{ijt} \\ D_{ijt} \geq \frac{2}{5} \sum_{i=1}^8 D_{ijt} \\ E_{ijt} \geq \frac{2}{5} \sum_{i=1}^{16} E_{ijt} \\ F_{ijt} \geq \frac{2}{5} \sum_{i=1}^4 F_{ijt} \\ R \leq S \\ \sum_{t=T}^{T+2} \sum_{j \in \text{豆类}} X_{ijt} \geq 1 \quad (X \in \{a, b, c, d, e, f\}) \end{cases} \\ & \text{s.t.} \end{aligned}$$

在满足约束条件下，找到满足目标函数的最大值，由此可得到 2024 年至 2030 年的最优种植方案。

4. 线性规划模型求解

作物最优种植面积优化模型可以使用 Excel 中规划求解功能求解。规划求解的计算原理主要是依靠单纯形法[9]。通常，Excel 中提供的“规划求解”优化工具也可用于求解一定限制条件下目标单元的最大值、最小值及其相应的可变单元(决策变量)值，其中对非线性问题的求解采用广义简约梯度法，对线性规划问题的求解采用单纯形法。

在求解研究农业种植结构中，采用线性规划方法求出的最优方案，既能满足诸多约束条件并且收益最大，又能提高计划工作的科学性且简便容易实现。近年来我国在自然资源调查和农业综合区划方面开展了大量工作，为运用线性规划方法来研究农业生产结构问题提供可靠的基础[10]。

通常，各类农作物的种类可分为粮食类、蔬菜类和食用菌类，所以我们分别整理统计出这三类农作物的情况。通过计算机程序求解，得到粮食类：蔬菜类：食用菌类农作物的利润占比情况为 36.44:46.72:17.29，各类农作物的利润占比如图 5 所示；粮食类：蔬菜类：食用菌类农作物的种植面积情况为 79:1:20，各类作物种植面积占比如图 6 所示。

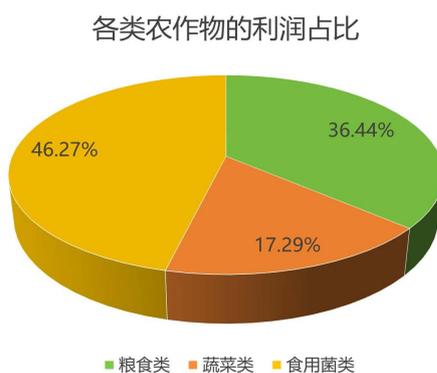


Figure 5. Profit proportion of different types of crops

图 5. 各类农作物的利润占比

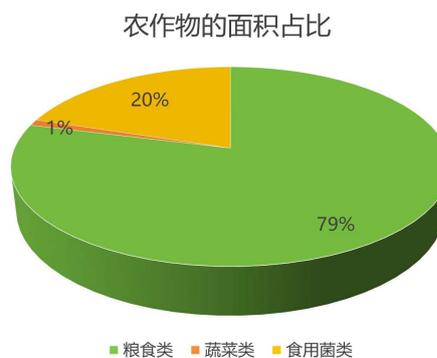


Figure 6. Area proportion of different types of crops

图 6. 各类农作物的面积占比

再利用 Excel 计算出未来 2024 年至 2030 年的最优种植方案和及其对应的年利润。当生产过剩时，若超出部分停滞浪费，最优种植方案的年平均利润为 7520795.75 元；若超出部分半价销售，最优种植方

案的年平均利润为 7956625.625 元，对比结果可得滞销浪费最优方案的年平均利润小于滞销半价销售的年平均利润。

5. 模型改进

5.1. 作物种植风险

根据实际情况，农作物的未来预期销售量时常会发生变化，亩产量往往会受气候等因素的影响，每年也会有 $\pm 10\%$ 的变化；受市场条件影响，农作物的种植成本平均每年增长 5%左右；国家不断完善体制机制，推动粮食价格保持合理水平，粮食类作物的销售价格基本稳定，蔬菜类作物销售价格有增长的趋势，食用菌的销售价格稳中有降。

综合考虑农作物预期销售量变动的风险、亩产量变动的风险、销售价格变动的风险、种植成本变动的风险、不确定因素潜在种植风险的影响，采用蒙特卡洛模拟处理农作物销售时的产量、销售价格和种植成本的波动，例如：利用蒙特卡洛随机模拟数据，得到 2024 年预期销售量变化箱线图(如图 7)。

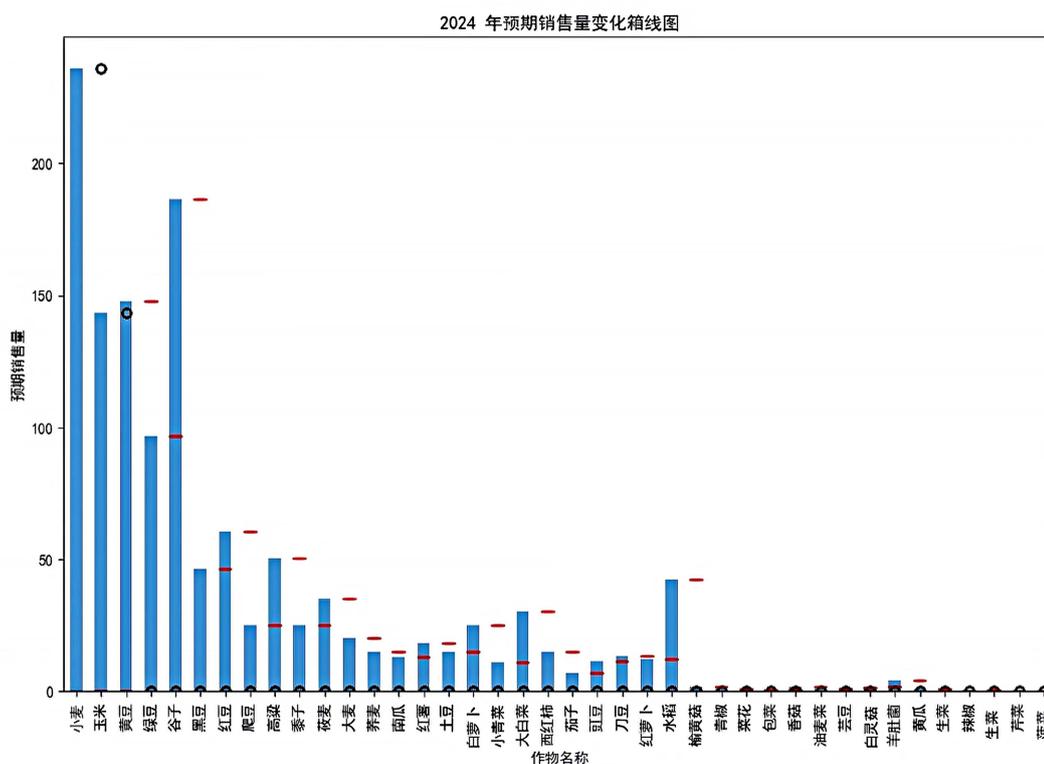


Figure 7. Box plot of expected sales volume changes in 2024

图 7. 2024 年预期销售量的变化箱线图

在与产量稳定状态下的模型约束条件一致的情况下，以不同种植风险下的最大化利润为目标，利用遗传算法求得多种情境下的最优种植方案的年平均利润为 8071476.25 元。

5.2. 农作物之间的替代性、互补性和相关性分析

从经济学和种植学角度考虑，农作物种植不仅会有种植风险，各农作物之间还可能存在一定的可替代性和互补性，预期销售量与销售价格、种植成本之间存在一定的相关性。根据作物之间的联系，合理

搭配不同的轮作顺序和间隔，调节土壤中各种养分元素的平衡、增加土壤有机质含量、改善养分利用效率等方式，农作物轮作可以有效提高土壤的肥力和健康状况，可以最大限度提高土壤养分的利用效率，不仅有助于优化农业生产方式，提高农作物产量和质量，还能够为农业可持续发展提供重要的理论和实践指导[11]。

可替代性和互补性量化：

本文用交叉价格弹性为量化可替代性以及互补性。交叉价格弹性是衡量一种商品需求对另一种商品价格变化的敏感度[12]。其计算公式为：

$$E_{xy} = \frac{\Delta Q_{xd}}{\Delta P_y} \times \frac{P_y}{Q_{xd}}$$

其中， E_{xy} 是商品 x 对商品 y 的交叉价格弹性。 ΔQ_{xd} 表示商品 x 的需求变量， ΔP_y 表示商品 y 的需求变量， P_y 表示商品 y 的价格， Q_{xd} 表示商品 x 的价格。

对收集到的所有数据中各农作物间的交叉价格弹性进行计算，结果如表 2 所示。

Table 2. The cross-price elasticity among various crops

表 2. 各农作物间的交叉价格弹性

农作物	农作物	交叉价格弹性	相关性	农作物	农作物	交叉价格弹性	相关性
黄豆	黑豆	0.8932	可替代性	黄豆	爬豆	-0.9096	互补性
水稻	香菇	0.9986	可替代性	水稻	包菜	-0.9494	互补性
榆黄菇	香菇	0.8081	可替代性	香菇	白灵菇	-0.6231	互补性
芸豆	油麦菜	0.9349	可替代性	芸豆	土豆	-0.9687	互补性
...				...			

如果 $E_{xy} > 0$ ，表示这两种商品是可替代的，且替代性强，例如黄豆和黑豆的交叉价格弹性为 0.8932；如果 $E_{xy} < 0$ ，表示这两种商品是不可替代的，例如黄豆和爬豆的交叉价格弹性为-0.9096，具有较强的互补性。

相关性分析：

为了度量两个变量 X 和 Y 之间线性相关程度的统计指标，引入皮卡尔逊相关系数，计算预期销售量与销售价格、种植成本之间的皮尔逊相关系数，公式为：

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

其中， X 代表预期销售量， Y 表示销售价格或种植成本， r 值在-1 到 1 之间，接近 1 表示强正相关，接近 -1 表示强负相关，接近 0 表示无相关性。

利用蒙特卡洛模拟得到的数据，计算预期销售量与销售价格、种植成本之间的皮尔逊相关系数(见表 3)，进而得出三者间的热力分析图(见图 8)。

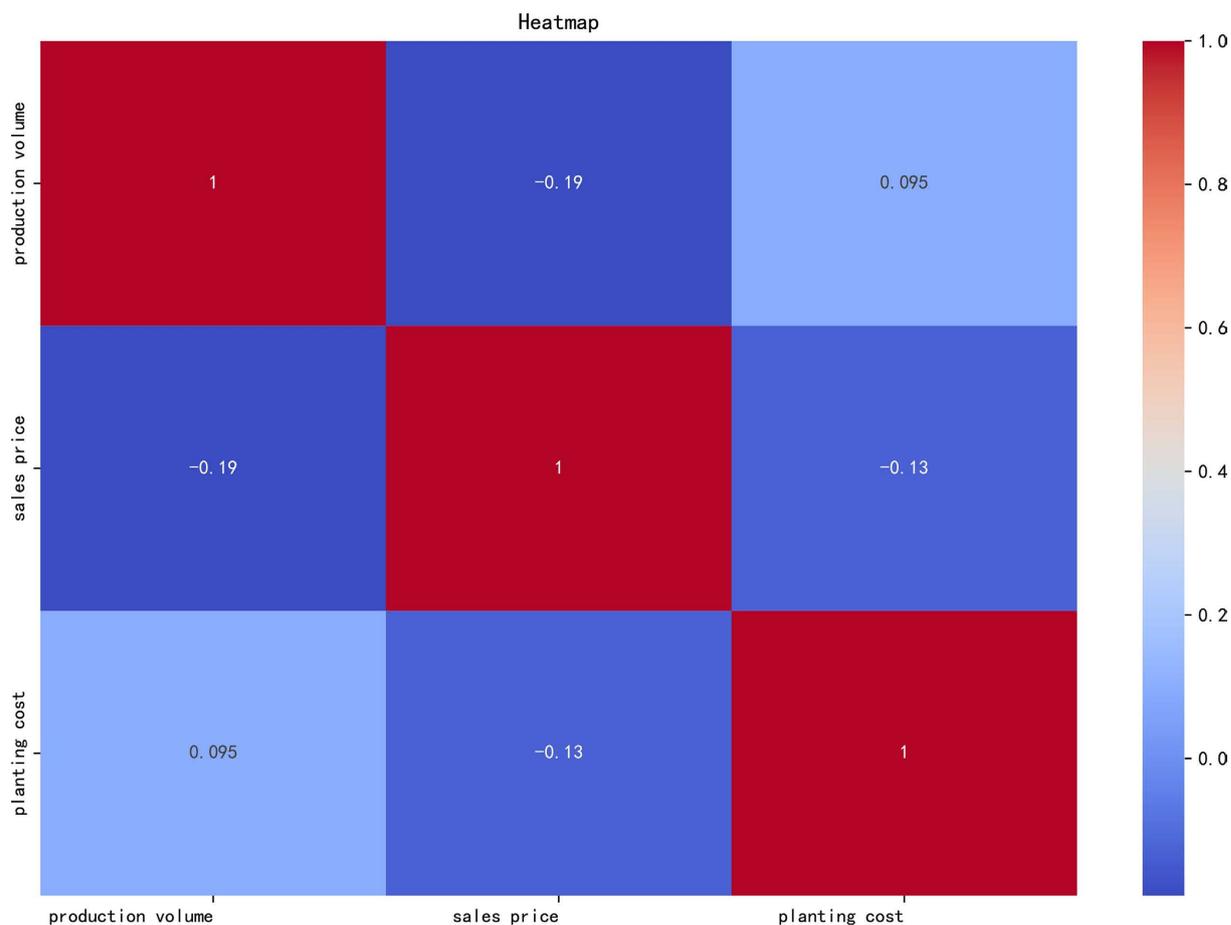
由于作物之间的相互关系，在考虑种植风险的基础上，增加作物之间的替代性、互补性和预期销售量与销售价格、种植成本之间相关性的约束条件。

替代性约束：

$$X_{ijt} + Y_{ijt} \leq H_{ijt}$$

Table 3. Correlation analysis among expected sales volume, sales price, and planting cost**表 3.** 预期销售量与销售价格、种植成本之间的相关性分析

相关性	皮卡尔逊相关系数
预期销售量和销售价格	-0.1911616628
预期销售量和种植成本	0.09450317231
销售价格和种植成本	-0.1325035091

**Figure 8.** Heatmap of the relationship between expected sales volume, sales price and planting cost**图 8.** 预期销售量与销售价格、种植成本之间的热力分析图

互补性约束:

$$X_{ijt} \cdot Y_{i,j+1,t+1} \leq H_{ijt}$$

预期销售量与销售价格为负相关:

$$Y_{jt} = Y_{jt-1} \cdot [1 + r_1 (U_{jt} - U_{jt-1})]$$

预期销售量与种植成本为正相关:

$$Y_{jt} = Y_{jt-1} \cdot [1 + r_2 (P_{jt} - P_{jt-1})]$$

销售价格和种植成本为负相关:

$$U_{jt} = U_{jt-1} \cdot [1 + r_3 (P_{jt} - P_{jt-1})]$$

r_1 表示预期销售量与销售价格的皮尔逊系数, r_2 表示预期销售量与种植成本的皮尔逊系数, r_3 表示销售价格和种植成本的皮尔逊系数, H 表示地块类型, $H \in \{A, B, C, \dots, F\}$ 。

运用线性规划求解出结果, 将两种情况下最优种植方案的利益进行对比, 如图 9 所示。

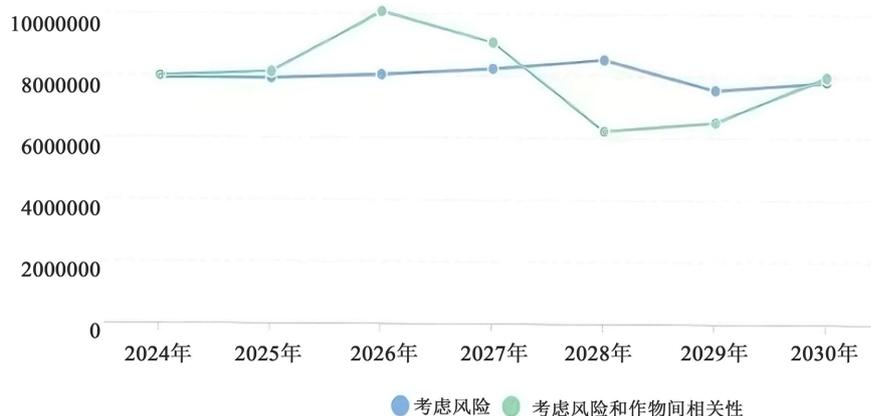


Figure 9. Comparison of profits in two cases
图 9. 两种情况下的利益对比图

对比两种情况下的利益情况, 由图 9 可知在增加对种植风险的考虑后, 未来几年的销售利润总体比较稳定; 继续增加农作物之间的相关联系等条件后, 总体利益有所上升, 最大的销售利润也有所提升。

6. 结语

本文主要以各类型地块上农作物的销售总利润为目标函数, 根据农作物的生长习性、种植区域面积限制等情况优化耕作流程和田间管理, 建立了线性规划模型, 利用 Excel 进行求解, 得到了 2024 年至 2030 年各类农作物的最优种植面积及利润。进一步地, 对模型进行改进, 考虑农作物的种植风险, 采用蒙特卡洛随机模拟, 得到未来预期销售量等情况, 运用遗传算法求得多种情境下的最优种植方案; 继而考虑农作物之间的替代性、互补性等情况, 增加线性规划模型的约束条件, 最后对比求解两种情况下种植方案的利润。本模型考虑多方面的影响因素, 符合生活实际情况, 有助于当地依据市场及政策条件进行调节, 有效规避多种风险, 实现利益最大化。

线性规划能用于系统研究资源的合理利用, 线性规划的可行方案都在各个限制因素组成的可行区域内, 只要约束条件能正确地反映农业生产实际情况, 即可保证其最佳方案是现实可行的。

基金项目

湖南省教育厅优秀青年科学研究项目“DC 复合拟凸规划近似对偶理论的研究”(项目编号: 24B0743), 湖南省普通本科高校教学改革重点研究项目“新工科背景下大学数学课程‘课程思政’教学模式研究与实践”(项目编号: 202401001372)。

参考文献

- [1] 陈蓉, 刘翠淋. 重庆市巫山县山地种植业比较优势分析[J]. 西南农业大学学报(社会科学版), 2011, 9(3): 27-31.

-
- [2] 张莉. 贵州省农作物种植结构时空演变及驱动因素研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [3] 刘珍环, 杨鹏, 吴文斌, 等. 近 30 年中国农作物种植结构时空变化分析[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 840-851.
- [4] 张红梅, 宋戈. 黑龙江省典型县耕地种植结构空间分异特征与影响因素[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 239-248.
- [5] Massey, R., Sankey, T.T., Congalton, R.G., Yadav, K., Thenkabail, P.S., Ozdogan, M., *et al.* (2017) MODIS Phenology-Derived, Multi-Year Distribution of Conterminous U.S. Crop Types. *Remote Sensing of Environment*, **198**, 490-503. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.033>
- [6] Griffiths, P., Nendel, C. and Hostert, P. (2019) Intra-Annual Reflectance Composites from Sentinel-2 and Landsat for National-Scale Crop and Land Cover Mapping. *Remote Sensing of Environment*, **220**, 135-151. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.031>
- [7] 杨志青. 西南地区县域种植多样化与种植业生产效率研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [8] 纪言言. 促进农村种植业适度规模经营的建议[J]. 热带农业工程, 2022, 46(4): 39-42.
- [9] 王瑞斌. 浅析线性规划法在汉延渠灌区作物种植结构优化中的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(28): 175.
- [10] 张雅静, 李梦晨, 洪传春. 基于多目标线性规划的河北种植业结构调整研究[J]. 中国集体经济, 2022(9): 32-33.
- [11] 姜立新, 吴岐山, 黄德强. 农作物轮作制度对土壤健康和生产力的长期影响[J]. 河北农机, 2024(15): 85-87.
- [12] 胡睿乐, 赵梦涛. 基于需求交叉价格弹性的天然气市场地位分析[J]. 煤气与热力, 2020, 40(7): 37-39+46.