

基于模拟退火算法的作物种植策略优化研究

摘要

乡村振兴和发展乡村经济需要因地制宜、因时制宜。本文结合华北山区乡村的实际情况，通过合理利用有限的耕地资源、科学地选择适宜的农作物、优化种植方案、降低种植风险，从而实现乡村经济的可持续发展。

针对问题一，本文基于农作物的预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格的稳定性假设，构建种植策略的优化模型。以不同农作物（特定年份、季度和地块）的种植面积为决策变量，目标函数为农作物 7 年总种植收益最大；约束条件包括地块面积、农作物生长规律等限制。本文利用模拟退火算法求解复杂优化模型，得到 2024-2030 年农作物最优种植方案。结果表明：在情况(1)的条件下，农作物产业总盈利为 **29199874.51** 元；在情况(2)的条件下，农作物产业总盈利为 **39424371.125** 元。

针对问题二，本文进一步综合考虑预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格的年增长率的不确定性和潜在种植风险因素。假设各增长率服从均匀分布并随时间随机变化以满足年增长率的不确定性。本文通过线性加权综合评价模型评估和量化各农作物受自然灾害影响的情况，并通过市场波动风险量化市场对农作物的影响。在保持约束条件和决策变量不变的前提下，对优化模型的目标函数进行调整，建立了问题二的优化模型，并基于模拟退火算法求解出了 2024-2030 年期间农作物的最优种植方案，以应对不确定性并最大化农业收益。结果表明：当 2024-2030 年取到最优种植策略时，农作物产业总盈利为 **43265328.1** 元。

针对问题三，本文在问题二的基础上，进一步综合考虑农作物之间的可替代性与互补性，并通过 Spearman 相关性分析描述预期销售量、销售价格和种植成本之间的相关关系，并通过多项式回归拟合三者之间的函数关系。基于问题二中各增长率服从均匀分布的假设，利用不同农作物的销售价格和种植成本的模拟数据预测预期销售量，作为新的模拟数据。在作物可替代性和互补性条件下，通过对农作物的优化选择，获得更优的种植方案。结果表明：当 2024-2030 年取到最优种植策略时，总盈利为 **50485667.3** 元。问题三的收益高于问题二，表明在考虑可替代性和互补性的情况下，作物之间的协同有助于进一步优化种植策略，提高整体收益。

在灵敏度分析中，本文对农作物销售单价进行 5% 左右的波动，结果表明：当单价在 0% 至 5% 范围内波动，总收益在初期显著增长后，后期逐渐趋于平稳；当单价在 0% 至 -5% 范围内波动，总收益在初期快速下降后，后期逐渐趋于稳定。结果表明，销售单价波动会引起销售量的变化，进而影响收益，符合经济规律。

本文构建的农作物种植方案优化模型具备普适性，适用于不同农业区域，通过调整参数可提供定制化的种植方案，促进可持续农业发展，具有现实意义。

关键词：最优种植策略；模拟退火算法；复杂优化；可替代性与互补性

一、问题背景与重述

1.1 问题背景

乡村振兴应根据当地实际情况和时代发展需求量身定制。合理地利用有限的耕地资源对乡村经济的可持续发展具有重要价值。通过科学地选择适宜的作物、优化种植策略，可以有效提高田间管理效率，还能有效降低种植过程中因不确定性带来的风险。该乡村位于华北山区，气候寒冷且种植季节较短，大部分耕地每年仅能种植一季作物。全村共有 1201 亩耕地，分布在 34 块不同类型的地块上，包括平旱地、梯田、山坡地和水浇地，此外村内还有普通大棚和智慧大棚，不同地块（大棚）以及蔬菜存在不同种植约束。为促进轮作和保持土壤肥力，每个地块（大棚）三年内至少需种植一次豆类作物。种植方案还应考虑便利的耕作和田间管理，每季作物的种植地不宜过于分散，且每块地的种植面积不宜过小。

1.2 问题重述

问题一的重述：假设未来农作物的预期销售量、种植成本、亩产量和销售价格相对稳定。若每季的总产量超过相应的预期销售量，则超过部分不能正常销售。针对两种情况，分别给出乡村 2024–2030 年的最优种植方案：(1)超过预期销售量的部分滞销，造成浪费。(2)超过预期销售量的部分按原价格的 50% 降价销售。

问题二的重述：考虑小麦和玉米预期销售量年均增长 5%–10%，其他农作物预期销售量变化 $\pm 5\%$ ；所有农作物每年亩产量变化 $\pm 10\%$ ；种植成本年均增长 5%；粮食销售价格相对稳定，蔬菜销售价格年均增长 5%，食用菌销售价格年均下降 1%–5%。给出综合考虑不确定性及潜在风险的乡村 2024–2030 年最优种植方案。

问题三的重述：在问题二的基础上，综合考虑农作物间的可替代性与互补性，以及销售量、销售价格和种植成本之间的具体关系，给出更优的种植策略，通过模拟数据进行求解，给出该乡村 2024–2030 年农作物的最优种植方案，并与问题二的结果进行对比分析。

二、问题分析

2.1 问题一的分析

问题一基于农作物的预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格相对于 2023 年相关数据的稳定性假设，本文建立优化模型，优化模型的决策变量为不同农作物在特定年份、季节及地块的种植面积，目标函数为考虑实际总产量超出或未超出预期销售量的两种情况下的最大农作物种植收益，其中，实际总产量超出预期销售量时，对超出部分产量存在两种情况：滞销导致浪费的情况或超出部分按售价 50% 降价出售的情况。约束条件包括地块面积限制、农作物生长规律等。考虑使用模拟退火算法求解复杂优化模型，得到 2024–2030 年农作物最优种植方案。

2.2 问题二的分析

问题二综合考虑了不同农作物的预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格的年增长率在时间维度上的随机波动所带来的不确定性，以及气候变化和市场波动所引发的潜在种植风险。假设各增长率服从均匀分布并随时间随机变化。本文通过线性加权综合评价模型评估各农作物受自然灾害影响的情况，并通过市场波动风险量化市场对农作物的影响。在保持约束条件和决策变量不变的前提下，对优化模型的目标函数进行调整，从而提出综合考虑不确定性和潜在风险的 2024–2030 年乡村最优种植方案。

2.3 问题三的分析

问题三在问题二的基础上,进一步综合考虑农作物之间的可替代性与互补性,并通过 Spearman 相关性分析描述预期销售量、销售价格和种植成本之间的相关关系,拟合三者之间的函数关系。基于问题二中各增长率服从均匀分布的假设,利用不同农作物的销售价格和种植成本的模拟数据预测预期销售量,作为新的模拟数据。在作物可替代性和互补性条件下,利用决策分析进一步优化种植策略。最终通过对农作物的优化选择,获得更优的种植方案,并与问题二的结果进行对比,寻求更具可行性且收益更高的方案。

上述问题分析通过流程图直观展示求解各个步骤的逻辑,见图 1:

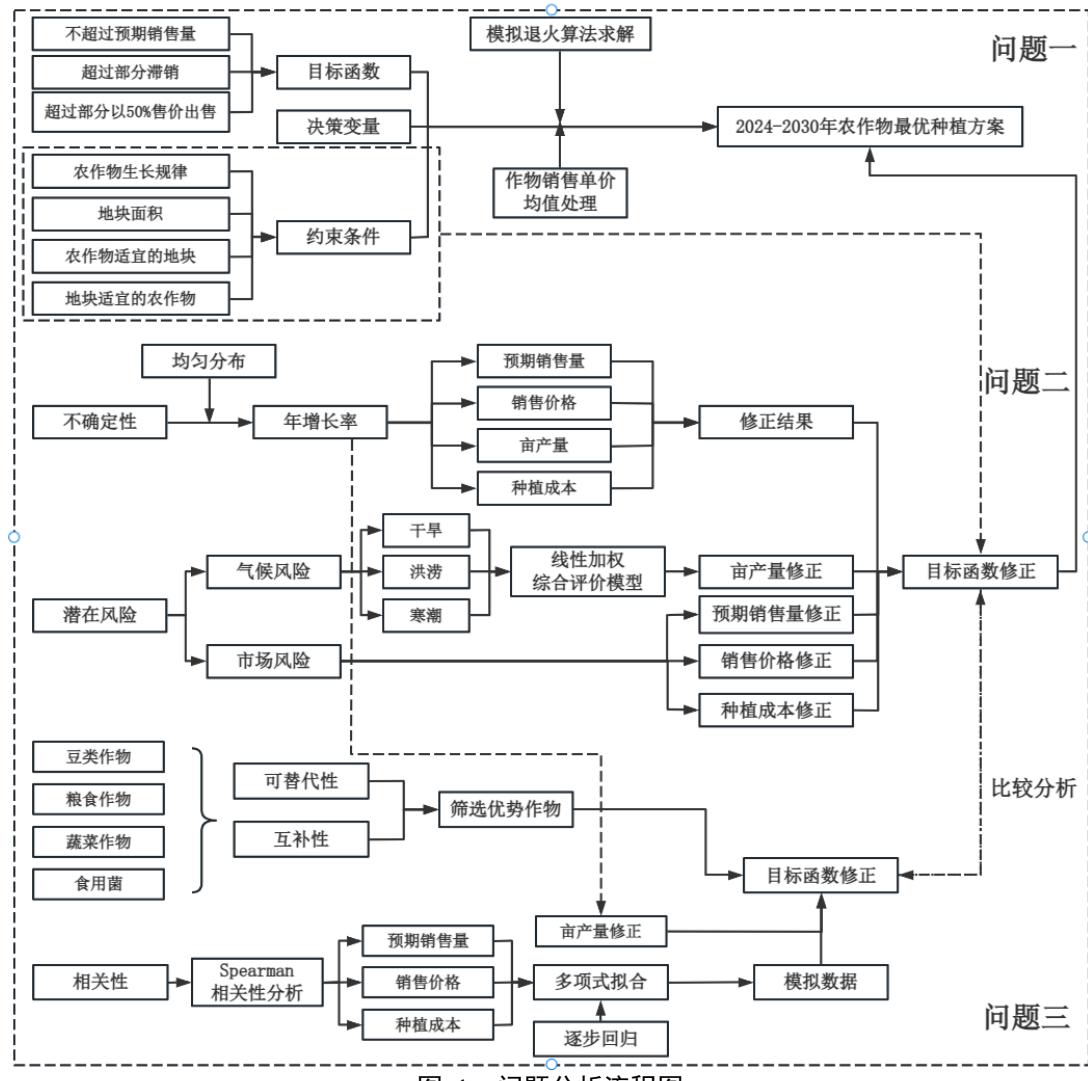


图 1 问题分析流程图

三、模型假设

- 假设每种地块最多只能合种两种作物。
 - 说明: 每种地块限制最多能种植两种作物有助于简化管理、提高土地利用效率并适应市场需求,并且满足题目中的地块可以合种的要求。
- 假设 2023 年每种作物的预期销售量等于该年该作物的亩产量。
 - 说明: 2023 年预期销售量等于亩产量假设合理,默认以预期销售量代替亩产量,可帮助制定生产和销售计划,便于后续模型的建立。

3. 假设每种作物都一年都有两季种植的可能性。默认单季种植的作物第二季种植量恒等于零。

- 说明：该假设使单季或者两季种植的作物成为可能，优化了土地利用率。默认单季种植的作物第二季种植量为零简化了种植决策的复杂性，使得决策变量更加明确，减少模型中双季变量的冗余。

4. 假设在遭受潜在气候灾害风险时，同一作物在不同地块上的亩产量的减产程度保持一致。

- 说明：模型能够更有效地预测不同地块的整体产量波动，避免了对复杂、不确定的区域性差异的过度考虑，从而优化了风险管理的应对策略。

四、符号及变量说明

符号及变量	说明	单位
i	第 i 个种植地块 ($i = 1, 2, \dots, 54$)	/
j	第 j 个种植作物 ($j = 1, 2, \dots, 41$)	/
k	种植地块第 k 季 ($k = 1, 2$)	/
t	第 t 个种植年份 ($t = 1, 2, \dots, 7$)	/
$x_{i,j,t}^{(k)}$	种植地块 i 的种植作物 j 在 t 年的第 k 季种植面积	亩
$S_j^{(k)}$	2023 年第 k 季种植作物 j 的销售单价	元/斤
$P_{i,j}^{(k)}$	2023 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的亩产量	斤
$R_j^{(k)}$	2023 年第 k 季种植作物 j 的预期销售量	元/亩
$C_{i,j}^{(k)}$	2023 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的种植成本	元
$S_{j,t}^{(k)}$	第 t 年第 k 季种植作物 j 的销售单价	元/斤
$P_{i,j,t}^{(k)}$	第 t 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的亩产量	斤
$R_{j,t}^{(k)}$	第 t 年第 k 季种植作物 j 的预期销售量	元/亩
$C_{i,j,t}^{(k)}$	第 t 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的种植成本	元
$r_{j,t}^{(k)(S)}$	第 t 年第 k 季种植作物 j 的单价年增长率	%
$r_{i,j,t}^{(k)(P)}$	第 t 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的亩产量年增长率	%
$r_{j,t}^{(k)(R)}$	第 t 年第 k 季种植作物 j 的预期销量年增长率	%
$r_{i,j,t}^{(k)(C)}$	第 t 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的成本年增长率	%
I_j	种植作物 j 的灾害适应度评分	/
ω_i	第 i 种灾害的评价权重	/
ϕ	亩产量减量	%

五、模型建立与求解

5.1 问题一模型的建立与求解

5.1.1 最优种植方案优化模型建立

(1) 基本符号说明

本文用 i 表示具体的种植地块， i 的取值为 1 至 54 中的整数，即共有 54 种不同的地块（大棚）。本文用 j 表示不同的种植作物， j 的取值为 1 至 41 中的整数，代表粮食、蔬菜和食用菌等共计 41 种的农作物。本文用 k 表示地块的种植季次， $k \in \{1, 2\}$ ， $k=1$ 表示一年单季种植或一年两季种植的第一季； $k=2$ 表示一年两季种植的第二季。 $t \in \{1, 2, \dots, 7\}$ 为种植年份，分别表示从 2024 年到 2030 年这段时间的种植年份。特别地 $t=0$ 表示 2023 年。

(2) 最优种植方案优化模型决策变量

决策变量 $x_{i,j,t}^{(k)}$ ：

$x_{i,j,t}^{(k)}$ 表示种植地块 i 的种植作物 j 在 t 年的第 k 季种植面积。此处 $k \in \{1, 2\}$ 。若为一年单季种植作物，默认 $x_{i,j,t}^{(2)} = 0$ 。

(3) 最优种植方案优化模型目标函数

考虑不同情况下的目标函数。情况 1：若某种作物每季的总产量超过相应的预期销售量，超过部分滞销，浪费。情况 2：若某种作物每季的总产量超过相应的预期销售量，超过部分按 2023 年销售价格的 50% 降价出售。

无论是情况 1 还是情况 2 其优化的目标为盈利最多，目标函数由两个部分构成，即目标函数 Z 等于最大化不超过预期销售带来的收益与超过预期销售带来的收益总和。

$$Z = \max(Z_1 - Z_2) \quad (1)$$

其中， Z_1 表示不超过预期销售量的净利润与超出预期销售量部分的净利润之和。 Z_2 表示所有农作物总种植成本。

$$Z_1 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} [\min\{\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j}^{(k)}, R_j^{(k)}\} S_j^{(k)} + \max\{\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j}^{(k)} - R_j^{(k)}, 0\} S_j^{(k)}] \quad (2)$$

其中，第一问假定各种农作物未来几年的预期销售量、种植成本、亩产量和销售价格相对于 2023 年保持稳定。 $S_j^{(k)}$ 表示 2023 年第 k 季种植作物 j 的单价； $P_{i,j}^{(k)}$ 表示 2023 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的亩产量； $R_j^{(k)}$ 表示 2023 年第 k 季种植作物 j 的预期销量。 $C_{i,j}^{(k)}$ 表示 2023 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的成本。为表示不超过预期销售量的净利润尽可能大，选取 $x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j,t}^{(k)}$ 和 $R_j^{(k)}$ 的较小值乘 $S_j^{(k)}$ 。

$$Z_2 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} C_{i,j}^{(k)} \quad (3)$$

若 $\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j}^{(k)} \leq R_j^{(k)}$ ，不存在超过预期销售带来的收益。

若 $\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j}^{(k)} > R_j^{(k)}$ ，则存在超过预期销售带来的收益，需要进行进一步计算。

给出目标函数表达式：

$$\begin{aligned} \max Z &= \max(Z_1 - Z_2) \\ \left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} [\min \{ \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j}^{(k)}, R_j^{(k)} \} S_j^{(k)} + \max \{ \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j}^{(k)} - R_j^{(k)}, 0 \} S_j^{(k)}] \\ Z_2 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} C_{i,j}^{(k)} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (4)$$

需要根据不同情况确定 $S_j^{(k)}$ ，若是情况 1（超过部分滞销，造成浪费），其 Z_1 中的 $S_j^{(k)} = 0$ ；若是情况 2（超过部分按 2023 年销售价格的 50% 降价出售），其 Z_1 中的 $S_j^{(k)} = \frac{1}{2} S_j^{(k)}$ 。

(4) 最优种植方案优化模型约束条件

1. 所有种植作物的各季度种植面积约束

对于每个地块，在每一年的每个季度，种植作物的总面积不能超过该地块的总面积 $s_i^{(k)}$ 。该约束确保所有种植活动在土地的实际可用面积范围内进行。

$$\forall i: \sum_{j=1}^{41} x_{i,j,t}^{(k)} \leq s_i^{(k)}, k = 1, 2 \quad (5)$$

2. 平旱地、梯田和山坡地第二季不种任何作物的种植约束

平旱地、梯田和山坡地第二季不种任何作物，即任意作物在平旱地、梯田和山坡地第二季种植量求和为 0，约束如下：

$$\sum_{t=1}^7 \sum_{j=1}^{41} \sum_{i=1}^{26} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \quad (6)$$

3. 平旱地、梯田和山坡地单季粮食（除水稻）的种植约束

平旱地、梯田和山坡地第一季种粮食作物（除水稻），该约束等价于平旱地、梯田和山坡地第一季不能种植水稻、蔬菜、菌类等作物，同时确保平旱地、梯田和山坡地第二季不能种植任何作物，约束如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=16}^{41} x_{i,j,t}^{(1)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{26} x_{i,j,t}^{(2)} = 0, i = 1, 2, \dots, 41 \end{array} \right. \quad (7)$$

4. 水稻的种植约束

水稻只能在水浇地第一季度种植而且水稻不能种在第二季度。该约束等价于水稻在除了水浇地以外的其他地形第一季的种植量求和为 0 及水稻在所有地块的第二季种植量求和为 0，约束如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{26} x_{i,16,t}^{(1)} = 0 \\ \sum_{i=35}^{54} x_{i,16,t}^{(1)} = 0 \\ \sum_{i=1}^{54} x_{i,16,t}^{(2)} = 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

5. 水浇地单季水稻或者两季蔬菜（除大白菜、白萝卜和红萝卜）

水浇地若种单季水稻，则自动不种植两季蔬菜；水浇地若种两季蔬菜，则自动不种植单季水稻；两者不能同时进行。此约束可以通过乘积的形式来表达：

$$\sum_{t=1}^7 \left(\sum_{i=27}^{34} x_{i,16,t}^{(1)} \sum_{j=1}^{41} x_{i,j,t}^{(2)} \right) = 0 \quad (9)$$

6. 水浇地两季蔬菜（除大白菜、白萝卜和红萝卜）的种植约束

水浇地第一季种植蔬菜（除大白菜、白萝卜和红萝卜）等价于水浇地第一季不能种植粮食、大白菜、白萝卜、红萝卜及食用菌，见式(10)；此外，水浇地第二季只能种植大白菜、白萝卜或红萝卜，见式(11)：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^7 \sum_{i=27}^{34} \sum_{j=1}^{16} x_{i,j,t}^{(1)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=27}^{34} \sum_{j=35}^{41} x_{i,j,t}^{(1)} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^7 \sum_{j=1}^{34} \sum_{i=27}^{34} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{j=38}^{41} \sum_{i=27}^{34} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=27}^{34} (x_{i,35,t}^{(2)} x_{i,36,t}^{(2)} + x_{i,35,t}^{(2)} x_{i,37,t}^{(2)} + x_{i,37,t}^{(2)} x_{i,36,t}^{(2)}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

7. 大白菜、白萝卜和红萝卜只种植在水浇地第二季的种植约束

大白菜、白萝卜和红萝卜只能在水浇地的第二季种植，为防止它们被种植在其他地块，该约束确保这些作物只出现在水浇地：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=35}^{37} x_{i,j,t}^{(1)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{26} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=35}^{41} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

8. 普通大棚第一季蔬菜（除大白菜、白萝卜和红萝卜）第二季食用菌

普通大棚第一季种蔬菜（除大白菜、白萝卜和红萝卜）等价于普通大棚第一季不能种植粮食、大白菜、白萝卜和红萝卜、食用菌。与此同时普通大棚第二季只种食用菌：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^7 \sum_{i=35}^{50} \sum_{j=1}^{16} x_{i,j,t}^{(1)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=35}^{50} \sum_{j=35}^{41} x_{i,j,t}^{(1)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=35}^{50} \sum_{j=1}^{37} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

9. 食用菌只种植在普通大棚第二季种植约束

食用菌只能在普通大棚的第二季种植，为防止它们被种植在其他地块，该约束确保食用菌只出现在普通大棚：

$$\sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{54} \sum_{j=38}^{41} x_{i,j,t}^{(1)} + \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=38}^{41} x_{i,j,t}^{(2)} + \sum_{t=1}^7 \sum_{i=38}^{41} \sum_{j=38}^{41} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \quad (14)$$

10. 智慧大棚双季蔬菜种植约束

智慧大棚每年必须种植两季蔬菜，意味着智慧大棚在第1季和第2季不能种植除蔬菜外的任何作物，给出以下约束：

$$\sum_{t=1}^7 \sum_{i=51}^{54} \sum_{j=1}^{16} (x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t}^{(2)}) = 0 \quad (15)$$

11. 重茬种植约束

对于该约束根据农作物的生长规律，每种作物在同一地块（含大棚）都不能连续重茬种植，否则会减产。

情况1：根据水浇地、普通大棚种植作物的性质。显然，不用考虑重茬约束。

情况2：智慧大棚的重茬约束。由于智慧大棚一年可种2季，所以在一年中，2季的种植作物不能相同；且智慧大棚前一年的第2季与下一年的第1季种植作物不能相同，有如下约束：

$$\begin{cases} x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t}^{(2)} \leq s_i^{(k)} (t = 1, 2, \dots, 7) \\ x_{i,j,t}^{(2)} + x_{i,j,t+1}^{(1)} \leq s_i^{(k)} (i = 51, 52, 53, 54; j = 17, 18, \dots, 34; t = 1, 2, \dots, 6) \end{cases} \quad (16)$$

情况3：平旱地、梯田和山坡地的重茬约束，上述三种地形都只能种植一季，连续两年的种植作物不能相同，有如下约束：

$$x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t+1}^{(1)} = s_i^{(1)} (i = 1, 2, \dots, 26; j = 1, 2, \dots, 41; t = 1, 2, \dots, 6) \quad (17)$$

12. 豆类作物每三年轮作约束

任意地块*i*，三年内至少种植一次豆类作物，粮食豆类作物为*j*=1,2,...,5；蔬菜豆类作物为*j*=17,18,19，有如下约束：

$$\forall i: \sum_t^{t+2} \sum_{j=1}^5 x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t}^{(2)} \geq 0; \sum_t^{t+2} \sum_{j=17}^{19} x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t}^{(2)} \geq 0 \quad (18)$$

13. 单个地块的种植面积分配约束

任意地块*i*，任意作物*j*，任意种植年份*t*，地块上的作物占比须大于阈值*n*∈[0,1]，为简便计算，考虑一个地块上最多只能种植两种作物*n*=0.5。保证每个地块上要么不种作物，要么至少种1种作物，不超过2种作物，这样尽可能保证作物不分散且满足单个地块的面积约束，用不等式相乘描述逻辑或的关系：

$$\forall i, \forall j, \forall t: \frac{x_{i,j,t}^{(k)}}{s_i^{(k)}} \left(\frac{x_{i,j,t}^{(k)}}{s_i^{(k)}} - n \right) \geq 0 \quad (19)$$

14. 种植面积非负约束

所有的决策变量（种植面积）必须非负，保证作物的实际种植量不会为负：

$$x_{i,j,t}^{(k)} \geq 0 (i = 1, 2, \dots, 54; j = 1, 2, \dots, 41; t = 1, 2, \dots, 7, k = 1, 2) \quad (20)$$

(5) 最优种植方案优化模型

综上所述，给出优化模型，见式(21):

$$\begin{aligned}
 & \max Z = \max(Z_1 - Z_2) \\
 & \left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} [\min\{\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j}^{(k)}, R_j^{(k)}\} S_j^{(k)} + \max\{\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j}^{(k)} - R_j^{(k)}, 0\} S_j^{(k)}] \\ Z_2 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} C_{i,j}^{(k)} \\ \text{s.t. } \begin{cases} \forall i: \sum_{j=1}^{41} x_{i,j,t}^{(k)} \leq s_i^{(k)}, k=1,2; \sum_{t=1}^7 \sum_{j=1}^{41} \sum_{i=1}^{26} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=16}^{41} x_{i,j,t}^{(1)} = 0, \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{26} x_{i,j,t}^{(2)} = 0, i=1,2,\dots,41 \\ \sum_{i=1}^{26} x_{i,16,t}^{(1)} = 0, \sum_{i=35}^{54} x_{i,16,t}^{(1)} = 0, \sum_{i=1}^{54} x_{i,16,t}^{(2)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 (\sum_{i=27}^{34} x_{i,16,t}^{(1)} \sum_{j=1}^{41} x_{i,j,t}^{(2)}) = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=27}^{34} \sum_{j=1}^{16} x_{i,j,t}^{(1)} = 0, \sum_{t=1}^7 \sum_{i=27}^{34} \sum_{j=35}^{41} x_{i,j,t}^{(1)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{j=1}^{34} \sum_{i=27}^{34} x_{i,j,t}^{(2)} = 0, \sum_{t=1}^7 \sum_{j=38}^{41} \sum_{i=27}^{34} x_{i,j,t}^{(2)} = 0, \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=27}^{34} (x_{i,35,t}^{(2)} x_{i,36,t}^{(2)} + x_{i,35,t}^{(2)} x_{i,37,t}^{(2)} + x_{i,37,t}^{(2)} x_{i,36,t}^{(2)}) = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=35}^{37} x_{i,j,t}^{(1)} = 0, \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{26} x_{i,j,t}^{(2)} = 0, \sum_{t=1}^7 \sum_{i=36}^{41} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=35}^{50} \sum_{j=1}^{16} x_{i,j,t}^{(1)} = 0, \sum_{t=1}^7 \sum_{i=35}^{50} \sum_{j=35}^{41} x_{i,j,t}^{(1)} = 0, \sum_{t=1}^7 \sum_{i=35}^{50} \sum_{j=1}^{37} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{54} \sum_{j=38}^{41} x_{i,j,t}^{(1)} + \sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=38}^{41} x_{i,j,t}^{(2)} + \sum_{t=1}^7 \sum_{i=38}^{41} \sum_{j=38}^{41} x_{i,j,t}^{(2)} = 0 \\ \sum_{t=1}^7 \sum_{i=51}^{54} \sum_{j=1}^{16} (x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t}^{(2)}) = 0 \\ x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t}^{(2)} \leq s_i^{(k)} (t=1,2,\dots,7) \\ x_{i,j,t}^{(2)} + x_{i,j,t+1}^{(1)} \leq s_i^{(k)} (i=51,52,53,54; j=17,18,\dots,34; t=1,2,\dots,6) \\ x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t+1}^{(1)} = s_i^{(i)} (i=1,2,\dots,26; j=1,2,\dots,41; t=1,2,\dots,6) \\ \forall i: \sum_{t=1}^{t+2} \sum_{j=1}^5 x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t}^{(2)} \geq 0; \sum_{t=1}^{t+2} \sum_{j=17}^{19} x_{i,j,t}^{(1)} + x_{i,j,t}^{(2)} \geq 0 \\ \forall i, \forall j, \forall t: \frac{x_{i,j,t}^{(k)}}{s_i^{(k)}} \left(\frac{x_{i,j,t}^{(k)}}{s_i^{(k)}} - n \right) \geq 0 \\ x_{i,j,t}^{(k)} \geq 0 (i=1,2,\dots,54; j=1,2,\dots,41; t=1,2,\dots,7, k=1,2) \end{cases} \end{array} \end{aligned} \tag{21}$$

5.1.2 最优种植方案优化模型求解

对于销售单价的处理，本研究采用了对各类农作物销售单价取均值的方式，以便用于模型的求解和分析。采取均值处理的方法能够有效平滑市场价格的波动性，减少短期异常波动对整体决策的影响，使模型更加稳定和具有应用价值。部分农作物的销售单价情况，见表 1：

表 1 各农作物的销售单价（部分）

地块类型	作物名称	平均价格(元/斤)
平旱地	小麦	3.5
梯田	黑豆	7.5
山坡地	南瓜	1.5
水浇地	白萝卜	2.5

对于预期销售量的处理，本文根据题目中第一问的假设，预期销售量保持稳定。因此，考虑在 2024 年至 2030 年期间，预期销售量与 2023 年的销售量相同。确保在不确定市场波动的情况下，能够以稳定的销售量进行分析。部分预期销售量数据，见表 2：

表 2 2024~2030 年各农作物的预期销售量（部分）

作物名称	预期销售量(斤)	作物名称	预期销售量(斤)
黄豆	57000	红豆	22400
黑豆	21850	绿豆	33040
爬豆	9875	玉米	132750
小麦	170840	谷子	71400
高粱	30000	黍子	12500

模拟退火算法^[1]基于固体退火原理，是一种基于概率的优化算法。其核心思想是从较高的初始温度开始，随着温度的逐渐下降，在解空间中进行随机搜索，并结合概率突跳特性，能够跳出局部最优解，最终找到接近全局最优解的方案。

模拟退火算法的这一特性使其特别适用于复杂的优化问题，能够在保证解的精度的同时提高求解效率，尤其是在解空间大且局部最优点较多的情况下表现尤为突出。因此，本文采用模拟退火算法求解复杂模型，能够在较短的时间内有效寻找全局最优解。

本文选择目标函数的倒数作为算法的适应度函数。

模拟退火算法具体过程^[2]详见 Step1-5：

Step1：按单双季随机生成初始解矩阵（两个三维矩阵），并计算适应度值 f_1 。

Step2：随机生成一个新解，若该解不满足约束条件，则重新生成一个新解，直到新解满足所有约束条件，并重新计算新解的适应度值 f_2 。

Step3：若 $f_1 < f_2$ ，则接受新解，否则依据 Metropolis 准则接受新解。

Step4：若达到终止温度，则进入 Step5；

否则，返回 Step2 继续迭代。

Step5：输出最佳解集和最优目标函数值。

模拟退火算法的流程图，见图 2：

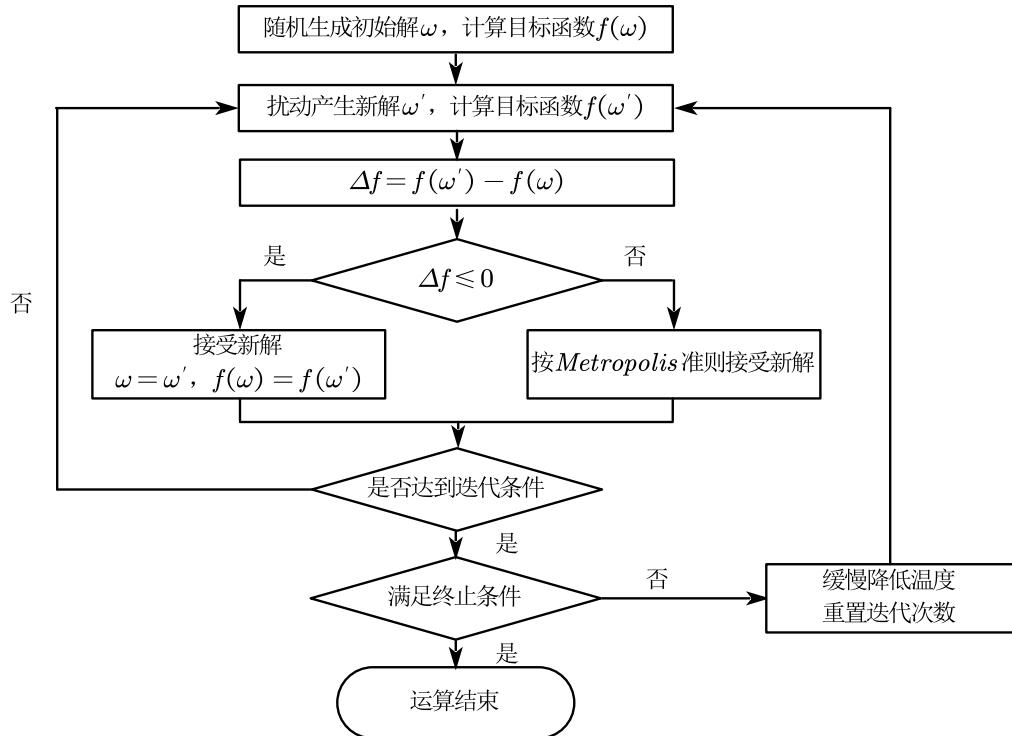


图 2 模拟退火算法流程图

模拟退火算法初始参数设置，见表 3：

表 3 模拟退火算法初始参数设置

初始温度	降温速率	终止温度	每个温度的迭代次数
1000	0.998	0.01	500

根据具体的 2 种不同情况给出模型求解结果。

情况 1：超过部分滞销，造成浪费的。经模拟退火算法求解，情况 1 的适应度迭代图，如图 3：

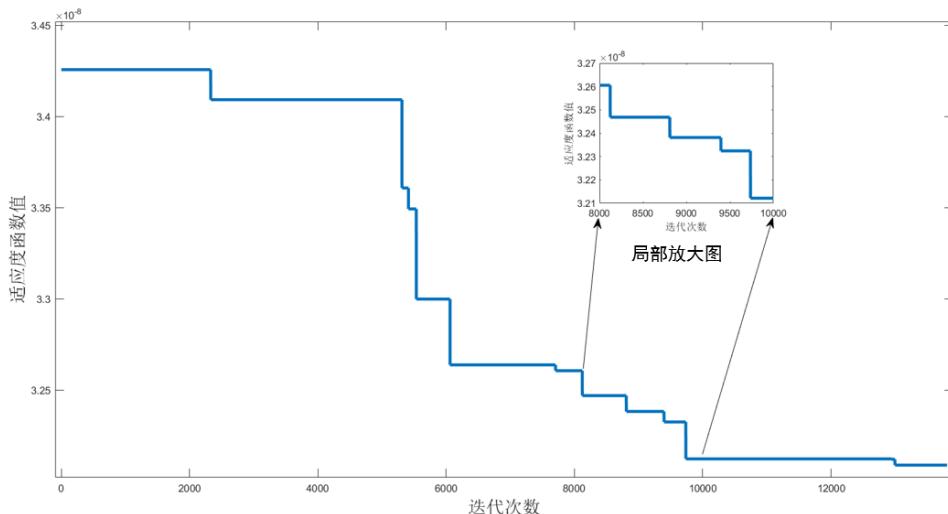


图 3 情况 1 适应度迭代图

2024 年部分耕地的最优种植方案表，见表 4：

表 4 情况 1 2024 年平旱地最优种植方案

地块名	种植的农作物	种植面积(亩)
A1	荞麦	80
A2	小麦	55
A3	黄豆	35
A4	黍子	72
A5	红薯	68
A6	小麦	55

给出情况 1 的农作物-耕地可视化，更加直观的反应最优种植方案，见图 4：

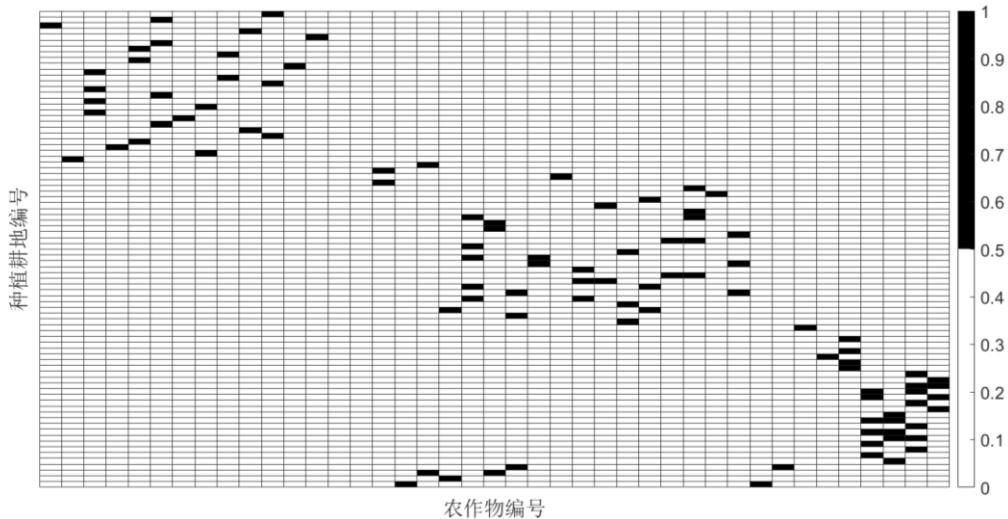


图 4 情况 1 最优种植方案可视化 (2024 年)

滞销份额浪费的情况下，种植收益最大为 **29199874.5** 元，由于滞销份额会直接浪费，因此种植要保证在不超过预期销售量的条件下，收益最大化，通过结果分析，农作物没有出现产量显著大于预期销售量的情况，例如：产量较大的黄瓜所种植的面积较少，保证有足够的耕地种植其它农作物，使得滞销量不会过多。

情况 2：超过部分按 2023 年销售价格的 50% 降价出售。经模拟退火算法求解，情况 2 的适应度迭代图，如图 5：

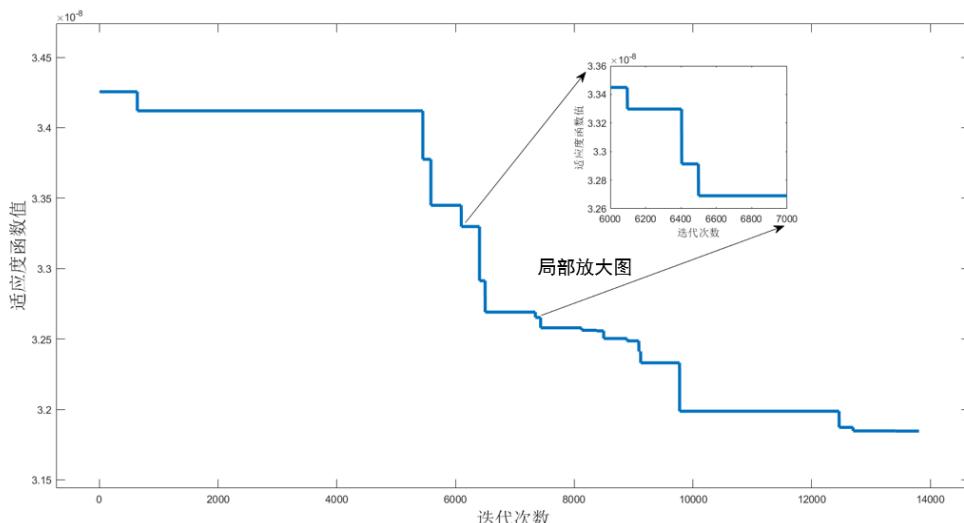


图 5 情况 2 适应度迭代图

展示 2024 年部分耕地的最优种植方案表，见表 5：

表 5 情况 2 2024 年平旱地最优种植方案

地块名	种植的农作物	种植面积(亩)
A1	大麦	80
A2	荞麦	55
A3	红豆	35
A4	荞麦	72
A5	大麦	68
A6	爬豆	55

给出情况 2 的农作物-耕地可视化，更加直观的反应最优种植方案，见图 6：

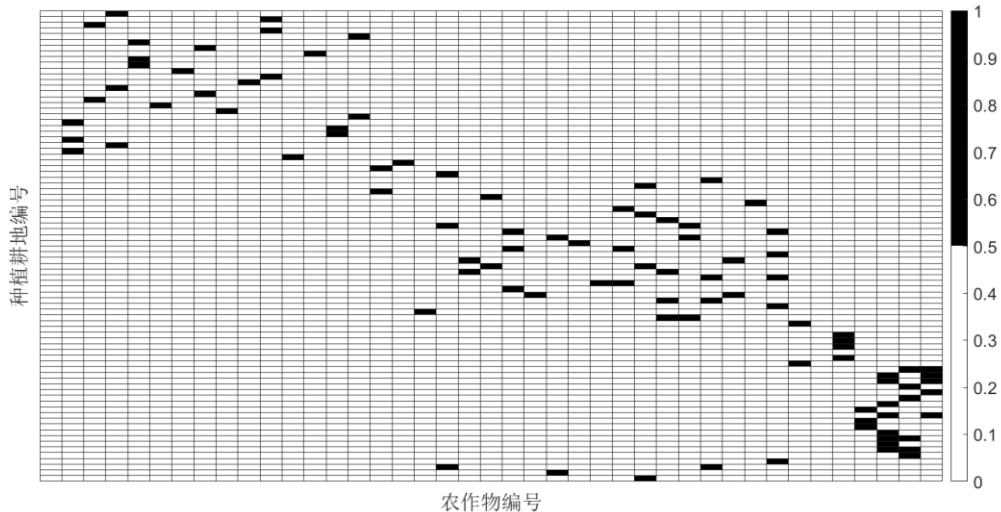


图 6 情况 2 最优种植方案可视化 (2024 年)

在滞销份额按半价出售的情况下，种植总收益最大为 **39424371.125** 元，经结果分析，由于滞销以半价售出，因此想要收益最大，要尽可能的种植产量大且售价适中的农作物，例如：要尽可能保证黄瓜种植在水浇地，因为黄瓜在水浇地的产量为 12000 斤/亩，可以用较少的耕地带来更加庞大的收益。

对问题一的情况 1 和 2 的求解的可靠性进行分析，已知 2023 年的收益为 **5919668.75** 元，现给出问题一逐年的收益情况如下：

表 6 问题 1 在情况 1 下的逐年收益表

年份	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
收益	4022563	3921356	3849658	4268423	4526157.5	4795612	3816105

表 7 问题 1 在情况 2 下的逐年收益表

年份	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
收益	5782554	6241635	5786238.1	5869523	5236452	4738587	5769382

根据表 6, 7 的数据。在情况 1 下，收益在 2024–2030 年间稳定下降，但整体变化较为平缓，表明解的可靠性较高。在情况 2 下，收益虽有波动，但总体接近或超过 2023 年水平，验证了解的稳健性。两种情况下收益变化幅度适中，未出现异常，说明解的可靠性良好，模型具备较强的可信度。

5.2 问题二模型的建立与求解

5.2.1 问题二目标函数的重构

问题二需要综合考虑各类农作物的预期销售量、亩产量、种植成本、销售价格的不确定性，以及潜在的种植风险。同时，由于问题一中假设的“上述各指标相对于2023年保持稳定”的前提已不再成立，因此需要对问题一中的目标函数进行修正，加入种植年份的变量。修改后的目标函数，见式(22)：

$$\begin{aligned} \max Z &= \max(Z_1 - Z_2) \\ \left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} [\min\{\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j,t}^{(k)}, R_{j,t}^{(k)}\} S_{j,t}^{(k)} + \max\{\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j,t}^{(k)} - R_{j,t}^{(k)}, 0\} S_{j,t}^{(k)}] \\ Z_2 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} C_{i,j,t}^{(k)} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (22)$$

其中， $S_{j,t}^{(k)}$ 表示第 t 年第 k 季种植作物 j 的单价； $P_{i,j,t}^{(k)}$ 表示第 t 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的亩产量； $R_{j,t}^{(k)}$ 表示第 t 年第 k 季种植作物 j 的预期销量。 $C_{i,j,t}^{(k)}$ 表示第 t 年第 k 季种植地块 i 的种植作物 j 的成本。

5.2.2 基于不确定性对目标函数的修正

为了更加明确地表述不确定性对于预期销售量 $R_{j,t}^{(k)}$ 、销售价格 $S_{j,t}^{(k)}$ 、亩产量 $P_{i,j,t}^{(k)}$ 、种植成本 $C_{i,j,t}^{(k)}$ 的变化。考虑引入预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格的年增长率。 $r_{j,t}^{(k)(R)}$, $r_{j,t}^{(k)(S)}$, $r_{i,j,t}^{(k)(P)}$, $r_{i,j,t}^{(k)(C)}$ 分别表示第 t 年第 k 季种植作物 j 的预期销量、销售价格的年增长率以及第 t 年第 k 季种植作物 j 在地块 i 的亩产量、种植成本。通过使用年增长率，可将每个年度的预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格的波动可以随机变量的形式表述。

(1) 预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格的年增长率的随机分布

给出均匀分布的定义：均匀分布描述的是在一个区间 $[a,b]$ 上，随机变量在该区间内的任何一个值的概率密度相同。这意味着，随机变量在 $[a,b]$ 取值的任何一个值的发生概率是均匀的。在作物销量增长率的建模中，假设年增长率在一定范围内连续取值，而没有理由认为某些区间的增长率会更集中或者偏向于某一端时，使用均匀分布是一种合理的选择。

接下来分别给出各个年增长率的分布：

1. 预期销售量年增长率的分布

根据题意，小麦和玉米预期销售量平均年增长率介于 $5\% - 10\%$ ：

$$r_{j,t}^{(k)(R)} (j = 6, 7) \sim U(5\%, 10\%) \quad (23)$$

根据题意，其他农作物预期销售量平均年增长率介于 $\pm 5\%$ 变化：

$$r_{j,t}^{(k)(R)} (j = 1, 2, \dots, 6; 8, 9, \dots, 41) \sim U(-5\%, 5\%) \quad (24)$$

2. 亩产量年增长率的分布

根据题意，所有农作物的亩产量往往会受气候等因素的影响，平均年增长率介于 $\pm 10\%$ 变化：

$$r_{i,j,t}^{(k)(P)} (j = 1, 2, \dots, 41; i = 1, 2, \dots, 54) \sim U(-10\%, 10\%) \quad (25)$$

3. 种植成本年增长率的分布

根据题意，农作物的种植成本平均每年增长5%左右。近似看作增长介于4%至6%之间波动：

$$r_{i,j,t}^{(k)(C)} (j=1,2,\dots,41; i=1,2,\dots,54) \sim U(4\%, 6\%) \quad (26)$$

4. 销售价格年增长率的分布

情况1：粮食类作物的销售价格基本稳定，即 $r_{j,t}^{(k)(S)} (j=1,2,\dots,16) = 0\%$

情况2：羊肚菌的销售价格每年下降幅度为5%： $r_{j,t}^{(k)(S)} (j=41) = -5\%$

情况3：蔬菜类作物的销售价格有增长的趋势，平均每年增长5%左右。近似看作增长介于4%至6%之间波动：

$$r_{j,t}^{(k)(S)} (j=17,18,\dots,37) \sim U(4\%, 6\%) \quad (27)$$

情况4：食用菌作物的销售价格稳中有降，大约每年可下降1%~5%：

$$r_{j,t}^{(k)(S)} (j=38,39,40) \sim U(-5\%, -1\%) \quad (28)$$

(2) 预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格的递推表示

分别给出考虑不确定性后预期销售量 $R_{j,t}^{(k)}$ 、销售价格 $S_{j,t}^{(k)}$ 、亩产量 $P_{i,j,t}^{(k)}$ 、种植成本 $C_{i,j,t}^{(k)}$ 的递推表达式：

$$\begin{cases} P_{i,j,t}^{(k)} = P_{i,j,t-1}^{(k)} (1 + r_{i,j,t}^{(k)(P)}) \\ R_{j,t}^{(k)} = R_{j,t-1}^{(k)} (1 + r_{j,t}^{(k)(R)}) \\ S_{j,t}^{(k)} = S_{j,t-1}^{(k)} (1 + r_{j,t}^{(k)(S)}) \\ C_{i,j,t}^{(k)} = C_{i,j,t-1}^{(k)} (1 + r_{i,j,t}^{(k)(C)}) \end{cases} \quad (t=1,2,\dots,7) \quad (29)$$

综上所述，基于题目中的不确定性因素，结合随机变量及其分布的选择，构建了不确定性变化的数学模型，重新定义了预期销售量、销售价格、亩产量和种植成本的计算公式，并对目标函数进行了修正。

5.2.3 基于潜在风险对目标函数的修正

在种植或农业生产中，潜在风险通常指那些可能影响作物产量、质量、成本和收益的不确定因素，例如天气变化、病虫害、市场价格波动等。这些风险可能不会立即发生，但始终存在一定的可能性，需要进行监控和预防措施。

(1) 气候变化潜在风险

由于该乡村地处华北山区，需要因地制宜发展农业，此地区的主要灾害类型有洪涝、干旱、寒潮。洪涝灾害通常会导致作物根系腐烂、营养吸收受阻，进而影响作物的正常生长，特别是对耐涝性较差的作物影响显著。干旱可能会限制作物的水分供应，导致光合作用和生长速率下降，严重影响作物的产量和质量。寒潮的突发降温会破坏作物的生理结构，尤其是对耐寒性较差的作物，可能造成严重的冻害，影响产量和收成。

将上述三种气候作为潜在风险。三种气候灾害对亩产量 $P_{i,j,t}^{(k)}$ 有直接影响，构建一个线性加权的综合评分模型，对每种植作物进行灾害评分，然后根据灾害评分的大小确定亩产量的减少比例。

查阅文献^{[3]-[9]}，对总共41种农作物对洪涝、干旱、寒潮的适应性划分为“高”、“中”、“低”三个等级并且给出部分适应度表格，见表8：

表 8 种植作物洪涝、干旱、寒潮的适应度表格（部分）

作物	耐旱程度	耐寒程度	耐洪涝程度	作物	耐旱程度	耐寒程度	耐洪涝程度
小麦	高	高	低	茄子	低	低	低
玉米	中	低	低	豇豆	中	低	低
黄豆	中	低	低	刀豆	中	低	低
绿豆	中	低	低	红萝卜	中	低	低
谷子	高	中	低	水稻	高	中	低
黑豆	中	低	低	榆黄菇	中	低	低
小青菜	低	低	中	空心菜	低	低	中
大白菜	低	中	中	芹菜	低	中	中
西红柿	低	低	低	菠菜	低	低	低

构建一个线性加权的综合评分模型，见式(30):

$$I_j = \sum_{i=1}^3 \omega_i I_i (\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1) \quad (30)$$

其中， I_j 为作物 j 的灾害适应度评分，该评分越高，代表作物的灾害适应度越好；评分越低，代表作物的灾害适应度越差。对“高”、“中”、“低”三个等级分别赋分 1, 2, 3。 $I_i (i=1,2,3)$ 分别代表作物受洪涝、干旱、寒潮的影响程度。通过综合考察华北地区农业农村政策^{[10]-[12]}、气候历史数据^{[13]-[19]}等信息，洪涝、干旱、寒潮三种气候的影响程度排序如下：干旱>洪涝>寒潮。可以确定三种灾害的评价权重 $\omega_i (i=1,2,3)$ ，给出权重表格，见表 9：

表 9 三种灾害评价权重赋值表

ω_1	ω_2	ω_3
0.3	0.5	0.2

气候灾害直接影响亩产量，考虑以作物的亩产量作为受灾害影响程度的量化指标。通过计算分数，将分数区间映射到具体区间，然后根据区间确定亩产量的减量比例。

综合分数排名前 33% 亩产量减少 10%；分数排名中间 33% 亩产量减少 20%；分数排名后 33% 亩产量减少 30%，见式(31):

$$P_{i,j,t}^{(k)} = [P_{i,j,t-1}^{(k)} (1 + r_{i,j,t}^{(k)(P)})] (1 - \phi), \phi \in \{10\%, 20\%, 30\%\} \quad (31)$$

综上所述，对于目标函数的预期销售量 $R_{j,t}^{(k)}$ 、销售价格 $S_{j,t}^{(k)}$ 、亩产量 $P_{i,j,t}^{(k)}$ 、种植成本 $C_{i,j,t}^{(k)}$ ，进行了公式的阐述与计算。最终通过构建该线性加权优化模型，可以综合考虑潜在风险对亩产量的影响，优化种植策略。模型通过计算评分和减量比例，将气候影响量化为实际的亩产量调整，从而最大化种植带来的总利润并合理配置资源。

(2) 市场波动潜在风险

在种植或农业生产中，市场会存在波动，市场波动会直接影响预期销售量 $R_{j,t}^{(k)}$ 、销售价格 $S_{j,t}^{(k)}$ 和种植成本 $C_{i,j,t}^{(k)}$ 三个指标，综合考虑以作物的上述三个指标作为受市场波动影响程度的量化指标。

市场波动常常表现出两端波动较大而中间较小的特征，这种现象可以通过 U 型分布来有效建模。U 型分布的特点是区间的两端具有较高的概率密度，而中间区域的概率密度较低，这与市场在极端波动情况下对销售量和价格的影响较大，而在稳定状态下影响较小的情况一致。因此，U 型分布能够准确地反映市场波动在不同情况中的影响程度。引入一个衡量市场波动的因子 ε ，该因子为随机变量，服从闭区间上的 U 形分布：给出该 U 型分布的概率密度函数：

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2}{a^2}(x-a)^2 & a \leq x \leq b \\ \frac{2}{(b-a)^2}(b-x)^2 & b \geq x \geq a \end{cases} \quad (32)$$

服从 U 型分布概率密度函数为式(32)的随机变量 ε 会对预期销售量 $R_{j,t}^{(k)}$ 、销售价格 $S_{j,t}^{(k)}$ 、种植成本 $C_{i,j,t}^{(k)}$ 进行扰动：

$$\begin{cases} R_{j,t}^{(k)} = R_{j,t-1}^{(k)}(1+r_{j,t}^{(k)(R)})\varepsilon \\ S_{j,t}^{(k)} = S_{j,t-1}^{(k)}(1+r_{j,t}^{(k)(S)})\varepsilon \\ C_{i,j,t}^{(k)} = C_{i,j,t-1}^{(k)}(1+r_{i,j,t}^{(k)(C)})\varepsilon \end{cases} \quad (33)$$

5.2.4 最优种植方案优化模型建立

结合不确定度以及潜在风险，对目标函数进行了修正，原始的最优种植方案优化模型的决策变量和约束条件不变，此处省略。仅给出优化模型的目标函数：

$$\begin{cases} \max Z = \max(Z_1 - Z_2) \\ Z_1 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} [\min\{\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j,t}^{(k)}, R_{j,t}^{(k)}\} S_{j,t}^{(k)} + \max\{\sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j,t}^{(k)} - R_{j,t}^{(k)}, 0\} S_{j,t}^{(k)}] \\ Z_2 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} C_{i,j,t}^{(k)} \\ P_{i,j,t}^{(k)} = [P_{i,j,t-1}^{(k)}(1+r_{i,j,t}^{(k)(P)})](1-\phi) \\ \phi \in \{10\%, 20\%, 30\%\}, (t=1, 2, \dots, 7) \\ R_{j,t}^{(k)} = R_{j,t-1}^{(k)}(1+r_{j,t}^{(k)(R)})\varepsilon, (t=1, 2, \dots, 7) \\ S_{j,t}^{(k)} = S_{j,t-1}^{(k)}(1+r_{j,t}^{(k)(S)})\varepsilon, (t=1, 2, \dots, 7) \\ C_{i,j,t}^{(k)} = C_{i,j,t-1}^{(k)}(1+r_{i,j,t}^{(k)(C)})\varepsilon, (t=1, 2, \dots, 7) \end{cases} \quad (34)$$

5.2.5 最优种植方案优化模型求解

本文基于 2023 年的已有数据，对未来的预期销售量、亩产量、种植成本和销售价格进行增幅和减幅控制，得到对应年份具体的数据，因此可以模拟出四种变量的不确定性；同时，本文基于文献给出了当地气候下，不同农作物的种植风险的评估，可以得到亩产量的变化率，因此也考虑了潜在的种植风险。

同问题一，基于模拟退火算法的最优种植策略迭代图，如图 7：

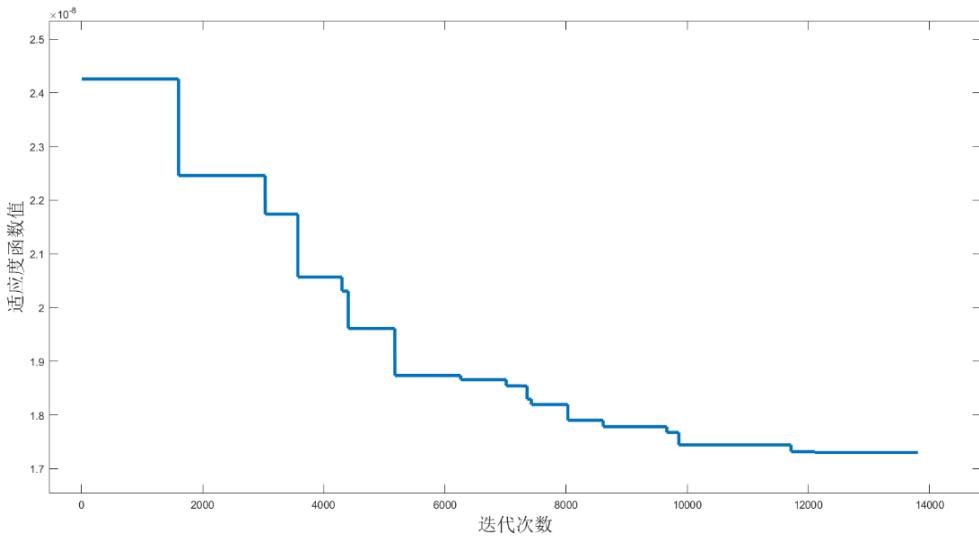


图 7 模拟退火算法最优适应度迭代图

观察图 7，模拟退火算法经多次迭代趋于收敛至较优的解，说明模拟退火算法在效率上有较大改进。

展示 2024 年部分耕地的最优种植方案表，见表 10：

表 10 综合考虑不确定性和潜在风险的最优方案（部分）

地块名	种植的农作物	种植面积(亩)
A1	红豆	80
A2	荞麦	55
A3	大麦	35
A4	爬豆	72
A5	红薯	68
A6	高粱	55

给出第二问的农作物-耕地可视化，更加直观的反应最优种植方案，见图 8：

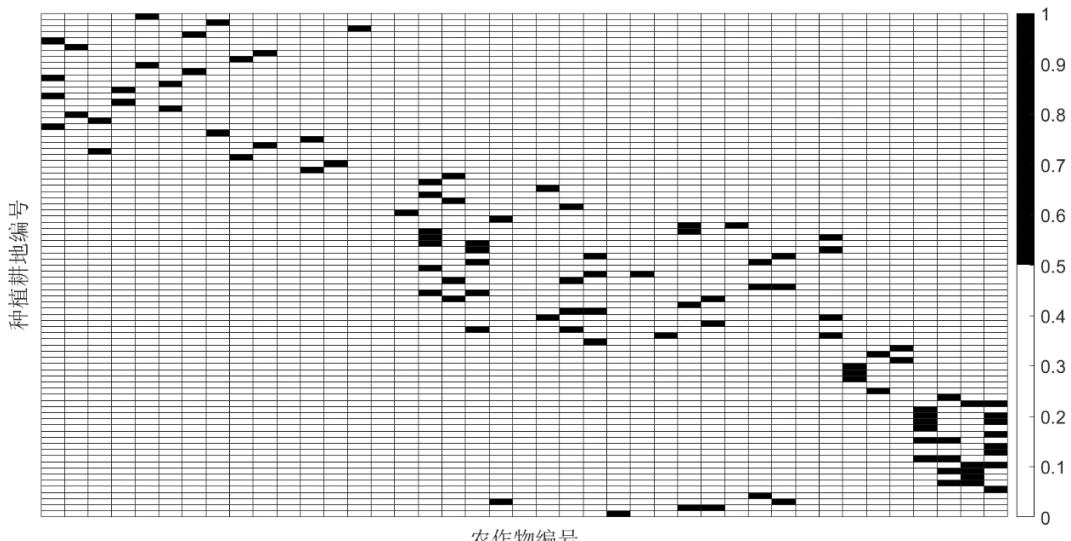


图 8 问题二最优种植方案可视化 (2024 年)

因此可以得到最优种植方案下的最大总收益为 **43265328.1** 元，经结果分析，在考虑当地气候条件的情况下，种植小麦、谷子、水稻等禾本科农作物的面积会更多，因为它们对于当地的气候有更好的耐受能力，相反，蔬菜等农作物的种植面积会偏少，因为其耐受能力较弱。

对问题二的求解的可靠性进行分析，已知 2023 年的收益为 **5919668.75** 元，现给出问题二逐年的收益情况如下：

表 11 问题 2 的逐年收益表

年份	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
收益	6258105	6886453	6429875	5035209.1	6285609	6920358	5449719

根据表 11，逐年收益（2024 – 2030 年）在 5035209.1 元至 6920358 元之间，收益波动较大，但整体水平高于 2023 年收益，多数年份收益增加。这表明问题二的解具有较好的可靠性。

5.3 问题三模型的建立与求解

5.3.1 各农作物之间的可替代性及互补性

(1) 作物之间的替代性及互补性定义

可替代性指的是不同作物在市场需求和价格变动下的相互替代能力。如果两种作物在市场上具有相似的需求特征和价格弹性，即存在市场替代关系使得生产者能够根据市场价格的变化调整种植策略，从而优化收益。

互补性则指的是市场上某些作物之间的联合生产能够提升整体经济效益。当两种作物在市场需求和供应链中表现出互补关系时，它们可以共同增加市场的需要或降低生产成本。

(2) 各作物间的可替代性说明

了解不同作物之间的可替代性对于优化种植策略、提高生产效率和应对市场波动具有重要意义。各类作物之间可替代性的详细说明，见表 12：

表 12 各作物间的可替代性说明

类型	作物名称	可替代性说明
豆类作物	黄豆、黑豆、红豆、绿豆、豌豆	这些豆类作物在市场需求和营养成分上相似。可以互相替代。
粮食作物	小麦、玉米、谷子、高粱、黍子、荞麦、南瓜、红薯、莜麦、大麦、水稻	这些粮食作物在价格波动时可以互相替代，尽管它们的生长条件和用途有所不同。
蔬菜作物	豇豆、刀豆、芸豆、土豆、西红柿、茄子、菠菜、青椒、菜花、包菜、油麦菜、小青菜、黄瓜、生菜、辣椒、空心菜、黄心菜、芹菜、大白菜、白萝卜、红萝卜	蔬菜之间的可替代性较高，蔬菜在市场需求和营养成分上具有一定相似性。
食用菌	榆黄菇、香菇、白灵菇、羊肚菌	食用菌之间的可替代性较低，不存在可替代性

(3) 各作物间的互补性说明

不同作物类型满足了市场对食品多样性的需求，消费者对食物的选择是多样化的。因此，不同类型作物的组合能够提供更全面的市场供应。豆类作物（如黄豆、黑豆）、粮食作物（如小麦、玉米）、蔬菜作物（如西红柿、大白菜）和食用菌（如香菇、白灵菇）覆盖了从主食到副食品的广泛需求。由于四种食用菌之间的可替代性较低，即它们之间存在显著的互补性。

为了确保市场需求的多样性和农业生产的经济效益，每个作物类型应选取 2 个代表作物，这些作物应为华北地区的优势作物，并且需要重点推广和种植。通过这样的选择，不仅能够保证作物之间的互补性，还能确保生产的多样性，从而实现农业资源的最优配置和市场需求的全面满足。该地优势作物表，见表 13：

表 13 华北地区各作物类型优势作物表

作物类型	华北地区优势作物	j
豆类作物	黄豆、黑豆	1,2
粮食作物	小麦、玉米	6,7
蔬菜作物	豇豆、西红柿、大白菜、白萝卜	17,21,35,36
食用菌	榆黄菇、香菇、白灵菇、羊肚菌	38,39,40,41

根据表 13，在华北地区仅种植 12 种优势作物。这 12 种优势作物涵盖了豆类、粮食、蔬菜和食用菌四大类，而每一类的其他作物可以通过这些优势作物进行替代，这样可有效简化种植结构，实现作物之间的可替代性与互补性。

5.3.2 预期销售量相关性分析

预期销售量作为市场需求的核心变量，与销售价格和种植成本密切相关。一般来说，较高的销售价格可能抑制消费者的需求，从而导致预期销售量的下降；相反，较低的销售价格则可能刺激需求，提升预期销售量。此外，种植成本的高低也间接影响预期销售量。种植成本过高可能导致生产者减少种植面积或调整种植策略，从而影响预期销售量。

Spearman 相关性通过比较变量的排序关系来衡量它们之间的单调关系。由于销售量、价格和种植成本可能受到市场波动、气候变化等因素的影响，呈现复杂的非线性变化，Spearman 相关性能够在不依赖正态分布和线性假设的情况下，揭示这些变量之间的强弱关联，相关系数热力图，见图 9：

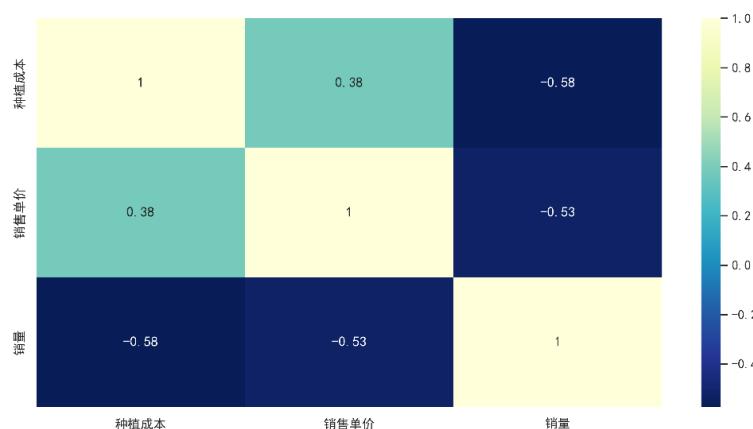


图 9 Spearman 相关系数热力图

经过 Spearman 相关性分析，可以初步判断种植成本、销售单价和预期销售量存在某种关系，故能用函数拟合。本文选用 2023 年的已知数据对三者的关系进行拟合，为降低变量之间关系的复杂度，考虑使用二次多项式回归进行拟合，见式(35)：

$$y = \sum_{p=1}^2 \beta_p x_p + \sum_{p=1}^2 \beta_{pp} x_p^2 + \sum_{p \neq q} \beta_{pq} x_p x_q + \beta_0 + \varepsilon \quad (35)$$

其中， $\beta_p, \beta_{pp}, \beta_{pq}, \beta_0$ 分别代表二次多项式回归模型的一次项、平方项、交叉项、常数项的对应系数。

使用逐步回归的方法，从双变量二次的多项式全模型开始，经历前向选择和后向消除，根据回归的评价指标 $R^2, RMSE$ 等，对每一步的变量显著性进行添加或删除，选取最优模型。

根据逐步回归结果得到种植成本、销售单价和预期销售量之间的关系：

$$R_{j,t}^{(k)} = 2280.81 - 0.0322 S_{j,t}^{(k)} + 0.75 (C_{i,j,t}^{(k)})^2 + \varepsilon \quad (36)$$

5.3.3 问题二相关策略的考量

根据问题二种构建的不确定性及潜在风险（气候风险、市场风险）变化的数学模型，重新定义了预期销售量、销售价格、亩产量和种植成本的计算公式。原始的最优种植方案优化模型的决策变量和约束条件不变，此处省略。构建目标函数的过程需要结合上述作物见可替代性和互补性，给出修正后的目标函数：

$$\begin{cases} \max Z = \max(Z_1 - Z_2) \\ \left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} [\min \{ \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j,t}^{(k)}, R_{j,t}^{(k)} \} S_{j,t}^{(k)} + \max \{ \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} P_{i,j,t}^{(k)} - R_{j,t}^{(k)}, 0 \} S_{j,t}^{(k)}] \\ Z_2 = \sum_{t=1}^7 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{41} \sum_{i=1}^{54} x_{i,j,t}^{(k)} C_{i,j,t}^{(k)} \\ P_{i,j,t}^{(k)} = [P_{i,j,t-1}^{(k)} (1 + r_{i,j,t}^{(k)(P)})] (1 - \phi), \phi \in \{10\%, 20\%, 30\% \} \\ R_{j,t}^{(k)} = R_{j,t-1}^{(k)} (1 + r_{j,t}^{(k)(R)}) \varepsilon \\ S_{j,t}^{(k)} = S_{j,t-1}^{(k)} (1 + r_{j,t}^{(k)(S)}) \varepsilon \\ C_{i,j,t}^{(k)} = C_{i,j,t-1}^{(k)} (1 + r_{i,j,t}^{(k)(C)}) \varepsilon \\ t = 1, 2, \dots, 7 \\ j \in J; J = \{1, 2, 6, 7, 17, 21, 35, 36, 38, 39, 40, 41\} \end{array} \right. \end{cases} \quad (37)$$

5.3.4 基于模拟数据的最优种植方案优化模型求解

根据逐步回归得到的式(36)，明确了预期销售量、价格和种植成本之间的函数关系。在已知 2023 年这三个变量中的任意两个数据的情况下，通过回归模型推导出第三个变量。例如，通过 2023 年的种植成本和销售单价，可以利用回归模型求解未来年份的预期销售量，然后根据给定的模拟数据，实现最优种植策略的求解，基于前述的模拟退火算法，进行优化求解，通过调整模型参数，以最大化 7 年作物总收益。通过模拟退火算法的迭代求解得到问题三的最优种植方案，结果见图 10：

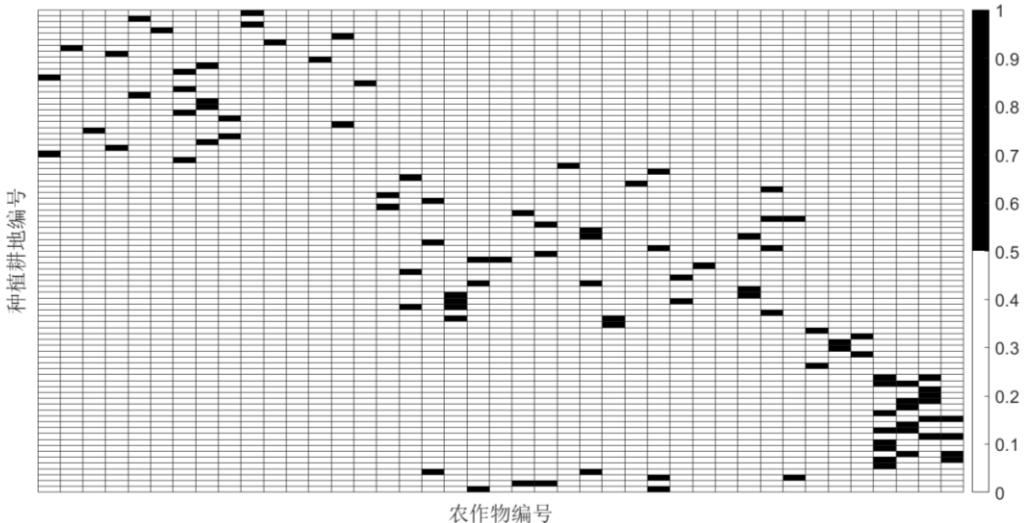


图 10 问题三最优种植方案可视化（2024 年）

得到问题三最优种植方案下的最大收益为 **50485667.3** 元。

5.3.5 模拟数据求解结果分析

问题二要求在不考虑作物之间的替代性和互补性的情况下，基于预期销售量、种植成本、亩产量的变化及潜在的气候和市场风险，求出 2024-2030 年最优的农作物种植方案。模型主要关注每种作物的单独表现及其收益最大化。问题三进一步综合考虑了作物之间的可替代性和互补性。

结果比较显示，问题三中得到的最优种植方案的最大收益为 50485667.3 元，而问题二中的最大收益为 49265328.1 元。问题三的收益高于问题二，表明在考虑可替代性和互补性的情况下，作物之间的协同有助于进一步优化种植策略，提高整体收益。问题三的结果更具优势，说明作物之间的替代性和互补性在优化农作物种植方案中具有重要的作用，通过合理的组合，实现更高的经济效益。

六、模型的灵敏度分析

由于模型的优化的目标是最大总收益，而销售单价的变化往往会引起预期需求量及种植量的变化，从而引起收益变化。本文考虑对农作物的单位售价进行 5% 左右的波动，观察第一问情况 2 下的模型收益的变化情况，具体变化见图 11：

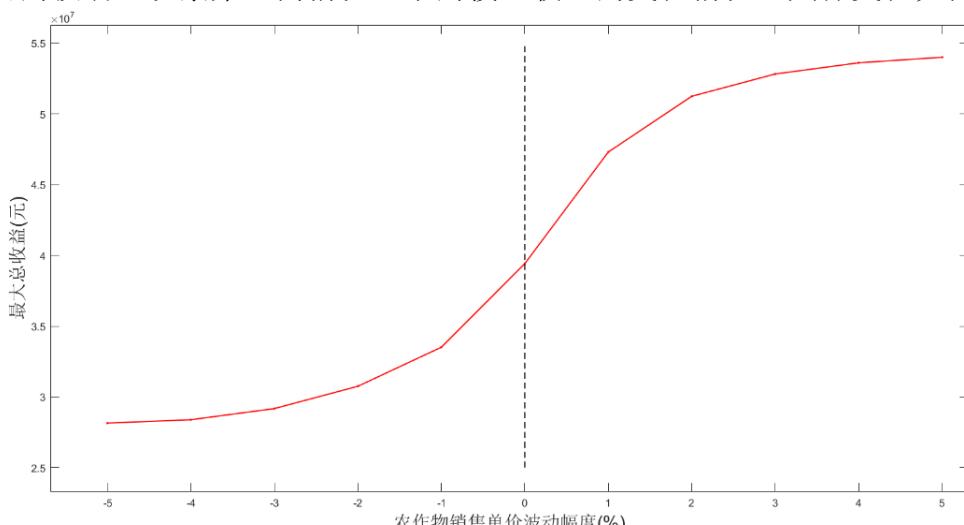


图 11 销售单价的灵敏度分析

观察模型的最大总收益，当波动幅度为 0%~5% 时，模型输出先以较大的变动情况增加，然后逐渐趋于平缓，说明随着农作物销售单价的增长，收益并不会一直处于增长阶段，现实中可能受到需求量的影响，导致销量下降从而引起最大收益趋于平缓；当波动幅度为 -5%~0% 时，模型输出先会快速下降，然后趋于平缓，说明随着农作物销售单价的减少，销售量可能会递增，因此最大总收益并不会一直处于减少状态，而是逐渐趋于稳定，比较符合实际情况。

七、模型的评价与改进

7.1 模型的评价

7.1.1 模型的优点

- (1) 本文优化模型综合考虑预期销售量、种植成本、亩产量和销售价格，结合作物生长规律和地块面积限制，旨在帮助乡村在有限资源下最大化经济效益。无论是在滞销、降价或价格波动的情境中，模型都能提供最优种植方案，确保资源的合理利用，促进农业的可持续发展。
- (2) 在综合考虑农作物预期销售量、种植成本、亩产量及销售价格的不确定性时，假设这些变量的年增长率服从均匀分布，以反映其随机性与波动性。为应对气候变化和市场波动的潜在风险，模型通过量化分析修正各因素的影响，结合不确定性与潜在风险的综合分析，实现农业生产的稳定和持续发展。
- (3) 模型充分考虑了作物之间的可替代性与互补性，优化了作物选择，综合分析了作物间的相互关系，反映了农业生产的复杂性，提供具有现实意义种植方案。

7.1.2 模型的缺点

- (1) 尽管模型考虑了价格、产量、销售量等变量的波动性，但对不确定性的处理较为简单，可能仅通过波动区间应对气候或市场变化，未充分捕捉复杂的随机性或极端情况，这在一定程度上限制了模型应对不确定性的精确性。
- (2) 模型缺乏时序数据，无法准确反映作物产量、价格和需求的长期趋势及季节性波动，限制了其动态响应市场和气候变化的能力。模型可以考虑引入时序分析和季节性调整，增强模型的预测能力，使种植方案更有效应对市场和环境变化的挑战。

7.2 模型的改进

- (1) 为更全面地考虑气候和市场的变化，模型可以引入随机变量，以模拟极端情况和不确定性。这有助于评估不同情境下的最优种植策略，使模型能够更有效地应对极端气候、市场波动等复杂环境，从而提升其应对复杂情况的适应性。
- (2) 模型可以增加作物产量、价格和需求的长期趋势变化及季节性波动等指标，从而使其能够随时间动态更新种植方案，实时响应市场和气候的变化，确保种植策略能够更好地适应不断变化的环境条件，优化资源利用和经济效益。

八、模型的推广与应用

本文构建的优化模型不仅适用于华北地区的农业种植优化，具有较强的普适性，能够推广应用于世界各地具有气候变化和市场波动特点的农业区域。通过对不同地区的气候条件、市场需求以及种植结构进行参数调整，本模型可为区域农业发展提供定制化的种植方案。同时，模型的灵活性为农业可持续发展提供决策支持，具有重要的现实意义。

九、参考文献

- [1] 陈华根,吴健生,王家林,等.模拟退火算法机理研究[J].同济大学学报(自然科学版),2004,(06):802-805.
- [2] 庞峰.模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用[D].吉林大学,2006.
- [3] 亓翠芸.暴雨灾害特征对农业的危害及防灾减灾措施研究[J].农业灾害研究,2024,14(01):292-295.
- [4] 刘保才,闫书安.华北地区日光温室蔬菜生产存在的问题及对策[J].北方园艺,1999,(05):43.
- [5] 周寅.气候变化对我国粮食产量影响的测度及应对策略研究[D].华东交通大学,2023.DOI:10.27147/d.cnki.ghdju.2023.000490.
- [6] 李梦倩.2021 年中国大陆涝渍灾害及对华北主要农作物影响分析[D].中国气象科学研究院,2023.DOI:10.27631/d.cnki.gzqky.2023.000037.
- [7] 刘笑.农业气象灾害和气温降水对华北平原粮食产量的影响[D].中国农业科学院,2018.
- [8] 李莎.农业气象灾害对粮食生产的影响与风险评估[D].华东师范大学,2017.
- [9] 张玉静.华北地区冬小麦主要气象灾害风险评估[D].中国气象科学研究院,2014.
- [10] 陈卓.华北地区春、夏玉米时空格局变化及其响应机制研究[D].中国地质大学(北京),2017.
- [11] 林玉娟.气候变迁下中国粮食安全政策模型之经济分析[D].南京农业大学,2013.
- [12] 万众,朱哲毅.政策性金融对农业经济增长的影响研究[J].经济经纬,2014,31(02):153-160.DOI:10.15931/j.cnki.1006-1096.2014.02.020.
- [13] 肖雨欣.气候因子对中国粮食产量影响的定量评估[D].扬州大学,2023.DOI:10.27441/d.cnki.gyzdu.2023.001390.
- [14] 安晓宇.气象灾害对农业生产影响的研究[D].东北农业大学,2018.
- [15] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [16] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [17] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2021.
- [18] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2022.
- [19] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.

附录:

本文源程序

本文代码使用的软件是 MATLAB R2021b

问题一代码:

data_process.m 数据处理及分析代码

pro1_merge.m 附件信息合并代码

SA_Conditon1.m 问题一情况 1 模拟退火求解代码

SA_Conditon2.m 问题一情况 2 模拟退火求解代码

fun_value.m 计算适应度函数代码

Metropolis.m 概率选择新解代码

new_point.m 产生新解代码

问题二代码:

pro2.m 问题二模拟退火求解代码

问题三代码:

pro3.m 问题三求解代码

灵敏度分析代码:

Sensitivity_analysis.m 对农作物单价进行灵敏度分析

说明: 由于有些代码重复性很高, 附录只给出一组代码, 源代码详见支撑材料。

data_process.m 数据处理及分析代码

```
1. clc;clear
2. %% 数据导入
3. data1_1=readtable("附件
    1.xlsx","Sheet","Sheet1","VariableNamingRule","preserve");
4. data1_1=data1_1(:,1:3);
5. data1_2=readtable("附件
    1.xlsx","Sheet","Sheet2","VariableNamingRule","preserve");
6. data1_2=data1_2(1:41,1:3);
7.
8. data2_1=readtable("附件
    2.xlsx","Sheet","Sheet1","VariableNamingRule","preserve");
9. data2_2=readtable("附件
    2.xlsx","Sheet","Sheet2","VariableNamingRule","preserve");
10. data2_2=data2_2(1:107,2:8);
11. % 对销售单价求均值
12. sales_price=data2_2(:, "销售单价/(元/斤)");
13. mean_price=zeros(107,1);
14. for i=1:107
15.     a=table2cell(sales_price(i,1));
16.     ls=split(string(a{1})," - ");
```

```

17.     mean_price(i)=(double(ls(1))+double(ls(2)))/2;
18. end
19. data2_2=data2_2(:,1:6);data2_2.mean_price=mean_price;
20. clear sales_price;clear ls;clear a;clear mean_price;clear i
21. %% 数据初步可视化
22. % 6个平旱地、14个梯田、6个山坡地、8个水浇地
23. % 16个普通大棚、4个智慧大棚
24. subplot(1,2,1)
25. bar([6,14,6,8,16,4])
26. set(gca, 'xticklabels', {'平旱地', '梯田', '山坡地', '水浇地', ...
27.     '普通大棚', '智慧大棚'}, 'FontSize', 12);
28. text(1, 6+0.4, num2str(6), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
29. text(2, 14+0.4, num2str(14), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
30. text(3, 6+0.4, num2str(6), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
31. text(4, 8+0.4, num2str(8), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
32. text(5, 16+0.4, num2str(16), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
33. text(6, 4+0.3, num2str(4), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
34. ylabel('耕地数目', 'FontSize', 18)
35. title('耕地类型')
36.
37. subplot(1,2,2)
38. % 6个粮食(豆类)、11个粮食、3个蔬菜(豆类)、18个蔬菜、4个食用菌
39. bar([6,11,3,18,4])
40. set(gca, 'xticklabels', {'粮食(豆类)', '粮食', '蔬菜(豆类)', '蔬菜', ...
41.     '食用菌'}, 'FontSize', 12);
42. text(1, 6+0.3, num2str(6), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
43. text(2, 11+0.3, num2str(11), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
44. text(3, 3+0.3, num2str(3), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
45. text(4, 18+0.3, num2str(18), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);
46. text(5, 4+0.3, num2str(4), 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 15);

```

```

47. ylabel('粮食作物数目','FontSize',18)
48. title('农作物种类')
49. %% 统计每亩盈利较大的作物和耕地组合
50. P=table2array(data2_2(:, "亩产量/斤")); % 每亩的产量
51. C=table2array(data2_2(:, "种植成本/(元/亩)")); % 每亩的成本
52. S=table2array(data2_2(:, "mean_price")); % 每斤的售价
53. profit=P.*S-C; % 每亩盈利
54. % 取出盈利排名前 5 的与排名后 5 的
55. [prof,idx]=sort(profit);
56. max_pf=prof(end-4:end);
57. max_idx=idx(end-4:end);
58. min_pf=prof(1:5);
59. min_idx=idx(1:5);
60. max_data=data2_2(max_idx,2:3);
61. min_data=data2_2(min_idx,2:3);
62. max_data.pf=max_pf;
63. min_data.pf=min_pf;
64. for i=1:5
65.     zhmax(i,1)=string(max_data{i,1})+"+"+string(max_data{i,2});
66.     zhmin(i,1)=string(min_data{i,1})+"+"+string(min_data{i,2});
67. end
68. subplot(1,2,1)
69. barh([90000,101500,109550,150000,284500], 'b')
70. set(gca, 'yticklabels', {zhmax(1), zhmax(2), zhmax(3), zhmax(4),
...
71.     zhmax(5)}, 'Fontsize', 16);
72. title('每亩地盈利排名前 5 的组合','FontSize',18)
73. subplot(1,2,2)
74. barh([770,835,900,1312.5,1400], 'y')
75. set(gca, 'yticklabels', {zhmin(1), zhmin(2), zhmin(3), zhmin(4),
...
76.     zhmin(5)}, 'Fontsize', 16);
77. title('每亩地盈利排名后 5 的组合','FontSize',18)
78. %% 附件 2 信息合并
79. data2=join(data2_1,data1_1,"Keys","种植地块");
80. data2=data2(:,1:end-1);
81. data2=join(data2,data2_2,"Keys",["作物编号","作物名称","地块类型
"]);
82. writetable(data2, 'merge_fujian2.xlsx', 'Sheet', 'Sheet1');

```

pro1_merge.m 附件信息合并代码

```
1. clc;clear
2. data1=readtable("附件
1.xlsx","Sheet","Sheet2","VariableNamingRule","preserve");
3. data1=data1(1:41,2);
4. % 2023 年农作物种植情况
5. data2=readtable('merge_fujian2.xlsx','VariableNamingRule','preser
ve');
6. only=unique(table2array(data2(:,3))); % 2023 年产出作物种类数
7. % 求 2023 年每种作物的销售量
8. for i=1:41
9.     name=string(data1{i,1}); % 遍历姓名
10.    ls(i,1)=sum(table2array(data2(data2{:,4}==name,11)));
11. end
12. data1.sum_sale=ls;
13. % 2023 年盈利 5931343.25 元
14. all_pf_2023=sum(table2array(data2(:,10)).*table2array(data2(:,11)
)- ...
15.     table2array(data2(:,7)).*table2array(data2(:,9)));
16. %% 求解未来 7 年的最优种植方案
17. Rj=readtable("merge_fujian2.xlsx","Sheet","Rj","VariableNamingRul
e","preserve");
18. x = optimvar('x',54,41,7,2);
19. R=table2array(Rj(:,2:3));
```

SA_Conditon1.m 问题一情况 1 模拟退火求解代码

```
1. clc;clear;
2. %% 模拟退火求解最优种植方案
3. clc;clear
4. T0=1000; % 初始温度
5. Tf=1e-3; % 终止温度
6. iter=80; % 各温度下的迭代次数
7. a=0.999; % 降温速率
8. % 计算退火次数
9. x = double(log(Tf / T0) / log(a));
10. Time = ceil(x); % 向上取整
11. % 选取初始点 0,0
12. point1=zeros(2,1);
13. % 状态函数值储存向量初始化
14. obj=zeros(Time,1);
15. f_start=fun_value(point1); % 求初始函数值
16. count=0; % 记录迭代次数
```

```

17. % 记录 x 和 y 两个变量的迭代过程
18. track=zeros(2,Time);
19. while T0>Tf
20.     count=count+1;
21.     list_value=zeros(3,iter); % 存储 for 循环中的迭代记录
22.     for i=1:iter % 外加一层 for 循环使得在每个温度 T 下，向尽可能最优
        的方向移动，避免概率的偶然性
23.         point2=new_point(point1,T0); % 获取更新点
24.         % Metropolis 法则判断是否接受新解
25.         [pointxy,F]=Metropolis(point1,point2,T0);
26.         list_value(1,i)=pointxy(1);list_value(2,i)=pointxy(2);lis
        t_value(3,i)=F;
27.     end
28.     [F,ind]=min(list_value(3,:)); % 找到迭代 iter 次的最优退火方向
29.     minx=list_value(1,ind);miny=list_value(2,ind);
30.     if count==1 || F<obj(count-1)
31.         % 更新状态
32.         obj(count)=F; % 若当前状态的函数值比上一次状态的函数值更
        小，则追加记录
33.         point1(1)=minx;point1(2)=miny;
34.         fprintf("第%d 次迭代: f 为%.5d\n",[count,obj(count)]);
35.     else
36.         % 不更新状态
37.         obj(count)=obj(count-1);
38.         fprintf("第%d 次迭代: f 为%.5d\n",[count,obj(count)]);
39.     end
40.     track(:,count)=point1; % 记录 point 的变化
41.     T0=T0*a; % 退火一次
42. end
43. %% 选择较好解
44. Best = importdata("情况 1.mat");
45. % 耕地面积和农作物编号
46. Data1 = importdata("附件 1.xlsx");
47. Area = Data1.data.Sheet1; % 面积
48. Crop = Data1.data.Sheet2; % 农作物
49. for year = 2:size(Best,1)
50.     plant = Best(year,:);
51.     Plan = [];
52.     % 初始化季节矩阵
53.     Season1 = zeros(size(Area,1),size(Crop,1));
54.     Season2 = zeros(size(Area,1),size(Crop,1));
55.     for i = 1:size(Area,1)

```

```

56.         plan = plant{1,i};
57.         % 单季度
58.         if size(plan,2) == 1
59.             land = plan.land;
60.             season = plan.season;
61.             crop = plan.crop;
62.             Season1(i,crop) = Area(i);
63.             Plan = [Plan;[crop,land,season,Area(i)]];
64.             % 双季度
65.         else
66.             for j = 1:2
67.                 crop = plan(j).crop;
68.                 land = plan(j).land;
69.                 season = plan(j).season;
70.                 if j==1
71.                     for k = crop
72.                         Season1(i,k) = Area(i)/length(crop); % 引入比例 0.5
73.                         Plan = [Plan;[k,land,season,Area(i)/length(crop)]];
74.                 end
75.             else
76.                 for k = crop
77.                     Season2(i,k) = Area(i)/length(crop); % 引入比例 0.5
78.                     Plan = [Plan;[k,land,season,Area(i)/length(crop)]];
79.                 end
80.             end
81.         end
82.     end
83. end
84. Answer(year-1).Season1 = Season1; % 求出季节 1 的解
85. Answer(year-1).Season2 = Season2; % 求出季节 2 的解
86. Answer(year-1).Plan = Plan; % 保存种植方案
87. end
88. figure
89. plot(1:count,obj','LineWidth',3)
90. xlabel('迭代次数','FontSize',18)
91. ylabel('适应度函数值','FontSize',18)
92. %% 最优种植方案写入 excel
93. sheet=["2024","2025","2026","2027","2028","2029","2030"];

```

```

94. for i=1:7
95.     first=Answer(i).Season1;
96.     second=Answer(i).Season2;
97.     second=second(27:end,:);
98.     filename1 = 'result1_1.xlsx';
99.     % 指定要写入的起始单元格位置
100.    Range1 = ['C2',':', 'AQ55'];
101.    Range2 = ['C56',':', 'AQ83'];
102.    % 将矩阵写入 Excel 文件的特定位置
103.    xlswrite(filename1,first, sheet(i), Range1);
104.    xlswrite(filename1,second, sheet(i), Range2);
105. end
106. %% 种植方案可视化
107. df=readtable('result1_1.xlsx','VariableNamingRule','preserve');
108. Area_matrix=table2array(df(1:82,3:43));
109. bin_matrix=zeros(82,41);
110. for i=1:82
111.     for j=1:41
112.         temp=Area_matrix(i,j);
113.         if temp>0
114.             bin_matrix(i,j)=1;
115.         else
116.             bin_matrix(i,j)=0;
117.         end
118.     end
119. end
120. figure(1)
121. % 使用 imagesc 函数可视化矩阵
122. heatmap(bin_matrix);
123. % 设置颜色图为黑白两种颜色
124. colormap([1 1 1; 0 0 0]);
125. % 显示颜色条
126. colorbar;
127. % 隐藏 x 轴和 y 轴的标签
128. ax = gca; % 获取当前轴对象
129. ax.XDisplayLabels = nan(size(ax.XDisplayData));
130. ax.YDisplayLabels = nan(size(ax.YDisplayData));
131. xlabel('农作物编号')
132. ylabel('种植耕地编号')

```

fun_value.m 计算适应度函数代码

```
1. function value=fun_value(point)
```

```

2. % value 为函数状态值
3. % point 为多元变量
4. value=((point(1)+2*point(2)-0.77)^10+(2*point(1)+point(2)-
5)^1.5+(2*point(1)+point(2)-5)^0.2 ...
5. +(2*point(1)+point(2)+5)^0.5-
(3*point(1)^2+2*point(2)^4+1)^0.1)*0.00000001;
6. end

```

Metropolis.m 概率选择新解代码

```

1. function [S,F]=Metropolis(S1,S2,T)
2. % Metropolis 准则
3. % S1:当前解(多元变量)
4. % S2:新解(多元变量)
5. % T:当前温度
6. % S:更新解(多元变量)
7. % F:更新解的函数值
8. F1=fun_value(S1); % 状态 S1 的函数值
9. F2=fun_value(S2); % 状态 S2 的函数值
10. delta_f=F2-F1;
11. if delta_f<0
12.     S=S2;
13.     F=F2;
14. elseif rand()<=exp(-delta_f/T) % 以一定的概率接受
15.     S=S2;
16.     F=F2;
17. else
18.     S=S1;
19.     F=F1;
20. end
21. end

```

new_point.m 产生新解代码

```

1. function newpoint=new_point(point1,T)
2. % 生成新的点
3. % ceil 向正无穷取整, unifrnd 在指定区间生成一个均匀随机数
4. while (true)
5.     newpoint(1,1)=point1(1)+T*(rand()-rand());
6.     newpoint(2,1)=point1(2)+T*(rand()-rand());
7.     if (-100<=newpoint(1,1)<=100)&&(-100<=newpoint(2,1)<=100)
8.         break;
9.     end
10. end

```

11. end

pro2.m 问题二模拟退火求解代码

```
1. clc;clear;
2. %% 模拟退火求解最优种植方案
3. clc;clear
4. T0=1000; % 初始温度
5. Tf=1e-3; % 终止温度
6. iter=80; % 各温度下的迭代次数
7. a=0.999; % 降温速率
8. % 计算退火次数
9. x = double(log(Tf / T0) / log(a));
10. Time = ceil(x); % 向上取整
11. % 选取初始点 0,0
12. point1=zeros(2,1);
13. % 状态函数值储存向量初始化
14. obj=zeros(Time,1);
15. f_start=fun_value(point1); % 求初始函数值
16. count=0; % 记录迭代次数
17. % 记录 x 和 y 两个变量的迭代过程
18. track=zeros(2,Time);
19. while T0>Tf
20.     count=count+1;
21.     list_value=zeros(3,iter); % 存储 for 循环中的迭代记录
22.     for i=1:iter % 外加一层 for 循环使得在每个温度 T 下，向尽可能最优
        的方向移动，避免概率的偶然性
23.         point2=new_point(point1,T0); % 获取更新点
24.         % Metropolis 法则判断是否接受新解
25.         [pointxy,F]=Metropolis(point1,point2,T0);
26.         list_value(1,i)=pointxy(1);list_value(2,i)=pointxy(2);lis
        t_value(3,i)=F;
27.     end
28.     [F,ind]=min(list_value(3,:)); % 找到迭代 iter 次的最优退火方向
29.     minx=list_value(1,ind);miny=list_value(2,ind);
30.     if count==1 || F<obj(count-1)
31.         % 更新状态
32.         obj(count)=F; % 若当前状态的函数值比上一次状态的函数值更
        小，则追加记录
33.         point1(1)=minx;point1(2)=miny;
34.         fprintf("第%d 次迭代: f 为%.5d\n",[count,obj(count)]);
35.     else
36.         % 不更新状态
```

```

37.         obj(count)=obj(count-1);
38.         fprintf("第%d 次迭代: f 为%.5d\n",[count,obj(count)]);
39.     end
40.     track(:,count)=point1; % 记录 point 的变化
41.     T0=T0*a; % 退火一次
42. end
43. %% 选择较好方案
44. Best = importdata("情况 2.mat");
45. % 耕地面积和农作物编号
46. Data1 = importdata("附件 1.xlsx");
47. Area = Data1.data.Sheet1;
48. Crop = Data1.data.Sheet2;
49. % 附件 2 数据
50. Data3 = importdata("附件 2.xlsx");
51. % 第一列作物 第二列耕地 第三列季度
52. % sale = Data3.data;
53. for year = 2:size(Best,1)
54.     plant = Best(year,:);
55.     Plan = [];
56.     % 初始化季节矩阵
57.     Season1 = zeros(size(Area,1),size(Crop,1));
58.     Season2 = zeros(size(Area,1),size(Crop,1));
59.     for i = 1:size(Area,1)
60.         plan = plant{1,i};
61.         % 单季度
62.         if size(plan,2) == 1
63.             land = plan.land;
64.             season = plan.season;
65.             crop = plan.crop;
66.             Season1(i,crop) = Area(i);
67.             Plan = [Plan;[crop,land,season,Area(i)]];
68.             % 双季度
69.         else
70.             for j = 1:2
71.                 crop = plan(j).crop;
72.                 land = plan(j).land;
73.                 season = plan(j).season;
74.                 if j==1
75.                     for k = crop
76.                         Season1(i,k) = Area(i)/length(crop); % 引入比例 0.5

```

```

77.                               Plan = [Plan;k,land,season,Area(i)/length
    h(crop)]]; 
78.                           end
79.                       else
80.                           for k = crop
81.                               Season2(i,k) = Area(i)/length(crop); % 引
入比例 0.5
82.                               Plan = [Plan;k,land,season,Area(i)/length
    h(crop)]]; 
83.                           end
84.                       end
85.                   end
86.               end
87.           end
88.       Answer(year-1).Season1 = Season1; % 求出季节 1 的解
89.       Answer(year-1).Season2 = Season2; % 求出季节 2 的解
90.       Answer(year-1).Plan = Plan; % 保存种植方案
91.   end
92. figure
93. plot(1:count,obj,'LineWidth',3)
94. xlabel('迭代次数','FontSize',18)
95. ylabel('适应度函数值','FontSize',18)
96. %% 加入随机性
97. yearss=["2024","2025","2026","2027","2028","2029","2030"];
98. filename1 = 'result2.xlsx';
99. filename2 = 'result1_2.xlsx';
100. for t=1:7 % 年份
101.     r2=readtable(filename2,"Sheet",yearss(t),"VariableNamingRule"
    ,"preserve");
102.     r2=table2array(r2(1:82,3:43));
103.     for i=1:82
104.         for j=1:41
105.             temp=r2(i,j)+r2(i,j)*((rand - 0.5) * 0/100);
106.             if temp>r2(i,j)
107.                 disp('no')
108.             else
109.                 r2(i,j)=temp;
110.             end
111.         end
112.     end
113.     Range = ['C2',':', 'AQ83'];
114.     xlswrite(filename1,r2, yearss(t), Range);

```

```

115. end
116. %% 最优种植方案写入 excel
117. sheet=[ "2024", "2025", "2026", "2027", "2028", "2029", "2030" ];
118. for i=1:7
119.     first=Answer(i).Season1;
120.     second=Answer(i).Season2;
121.     second=second(27:end,:);
122.     filename2 = 'result2.xlsx';
123.     % 指定要写入的起始单元格位置
124.     Range1 = [ 'C2', ':', 'AQ55' ];
125.     Range2 = [ 'C56', ':', 'AQ83' ];
126.     % 将矩阵写入 Excel 文件的特定位置
127.     xlswrite(filename2,first, sheet(i), Range1);
128.     xlswrite(filename2,second, sheet(i), Range2);
129. end

```

pro3.m 问题三求解代码

```

1. clc;clear
2. % 2023 年农作物种植情况
3. data2=readtable('merge_fujian2.xlsx','VariableNamingRule','preserve');
4. data2=table2array(data2(:,9:11));
5. [R, P] = corr(data2, 'Type', 'Spearman');
6. imagesc(R);
7. colorbar;
8. axis square;
9. %% 2023 年农作物种植情况
10. df=readtable('result1_1.xlsx','Sheet','2027','VariableNamingRule',...
    , 'preserve');
11. Area_matrix=table2array(df(1:82,3:43));
12. bin_matrix=zeros(82,41);
13. for i=1:82
14.     for j=1:41
15.         temp=Area_matrix(i,j);
16.         if temp>0
17.             bin_matrix(i,j)=1;
18.         else
19.             bin_matrix(i,j)=0;
20.         end
21.     end
22. end
23. figure(1)

```

```

24. % 使用 imagesc 函数可视化矩阵
25. heatmap(bin_matrix);
26. % 设置颜色图为黑白两种颜色
27. colormap([1 1 1; 0 0 0]);
28. % 显示颜色条
29. colorbar;
30. % 隐藏 x 轴和 y 轴的标签
31. ax = gca; % 获取当前轴对象
32. ax.XDisplayLabels = nan(size(ax.XDisplayData));
33. ax.YDisplayLabels = nan(size(ax.YDisplayData));
34. xlabel('农作物编号')
35. ylabel('种植耕地编号')
36. %% 拟合关系
37. data=readtable('merge_fujian2.xlsx','VariableNamingRule','preserve');
38. data=table2array(data(:,9:11));
39. x1=data(:,1);x2=data(:,2);x3=data(:,3);
40. X1=[ones(size(x3)),x3,x2,x2.^2];
41. stepwise(X1(:,2:end),x1);
42.
43. X2=[ones(size(x3)),x3,x3.^2,x3.^3,x1,x1.^2,x1.^3];
44. stepwise(X2(:,2:end),x2);

```

Sensitivity_analysis.m 灵敏度分析代码

```

1. clc;clear
2. x=-5:1:5; % 波动
3. pf=[39424371*0.714,39424371*0.72,39424371*0.74,39424371*0.78,3942
4371*0.85,39424371.125, ...
4. 39424371*1.2,39424371*1.3,39424371*1.34,39424371*1.36,3942437
1*1.37];
5. plot(x,pf,'Color','red','LineStyle','-'
', 'Marker', '.', 'LineWidth',1.2);
6. hold on
7. plot([0,0],[2.5*1e7,5.5*1e7], 'Color', 'k', 'LineStyle', '--'
', 'LineWidth',1)
8. xlabel('农作物销售单价波动幅度(%)', 'FontSize',18)
9. ylabel('最大总收益(元)', 'FontSize',18)

```