

基于整数规划的原材料订单与转运策略研究

摘要

本文针对原材料的订购与转运问题，基于量化分析、缺货预测与库存机制等建立了多个优化模型，通过单目标与多目标的优化模型，为建材企业提供了不同需求下的原材料订购与转运方案，有效地节约了材料成本，提高产能。

针对问题一，本文对于 402 家历史订货量与供货量信息进行数据挖掘，选择**二级模糊综合评价模型**进行分析，确定交货能力、合作能力和发展潜力作为供应商评价中的一级指标对供货特征进行分析，同时确定最大供货量、平均交易量、合作次数等作为二级指标对一级指标再进行详细划分，最后通过**熵权法**与专家赋权值结合对供应商进行模糊综合评价，得出 S201、S229、S151 等 50 家最重要的供应商。

针对问题二，本文先对实际供货量的规律进行分析，通过**时间序列分析**得到供货量符合简单季节性的规律，再对未来 24 周的供货量进行预测。问题二在问题一的基础上建立**多目标 0-1 线性规划模型**，以供应商数量最少为主目标，以总评分最高为辅目标，使得每一周供应商供货都可以满足最大的供货量。通过**NSGA-II 优化算法**，求解多目标规划模型，最后确定至少选择 S201、S307、S151、S208 等 11 家供应商才能满足企业的生产需求。

本文考虑**供应规律**注意到供应商一些严重的缺货情况，通过**灰色预测模型**预测供应商突发的缺货情况，预测模型合理性较强，得到了未来 24 周的每个供应商的缺货时段。在缺货时段企业停止与相应供应商的订货合作，通过建立**整数线性规划**，在保证库存充足、转运限制和缺货时期不订货的前提下，以最小订购成本为目标建立模型，通过**库存机制**计算出未来每个月的订单策略。

最后针对转运策略，首先对损耗率进行**时间序列分析**，其中每一家转运商的损耗率均满足简单季节性的时间序列规律，根据之前的订单策略与预测的损耗率，以最小损耗量为单目标建立**0-1 线性规划**，得到未来 24 周的转运策略。

针对问题三，以第二问的方案为基础，最小化订购成本比值与 C 订单量和 A 订单量比值的加权和作为目标函数，求出最小化使用 C 材料和最大化使用 A 材料的订单方案。对比问题二中 C 订单量比 A 订单量的比值显著提升，通过数值分析可以看出问题三的方案有效地改进了订单效果，减少了储存与转运费用，节约成本。通过库存机制得到未来 24 周的订单方案，依据该订单方案并结合问题二的方法重新进行**0-1 线性规划**，最终得到未来 24 周的转运方案。

针对问题四，根据题意企业已经具有了产能提高的潜力，本文仅考虑供应商与转运商的限制，根据每周不同的损耗率，以供应商的最大供货量，缺货期和转运量限制来约束，建立最大实际产量为目标函数的**非线性整数规划**。由于规划方程存在**非线性约束**，较为复杂，本文考虑通过**遗传算法**进行求解，最终得到未来 24 周的订货与转运方案。通过确定的方案分析每一周可以提高了产能，根据模型计算出第一周、第二周、第三周的产能分别提高 42.02%、43.77%和 44.75%。可以看出在不同的损耗率水平下提升的产能水平也不同，但总体来看产能水平均有较大幅度的提高，说明模型合理性较强。

关键词：模糊综合评价 预测分析 供应规律 整数规划 遗传算法

一、 问题重述

1.1 问题背景

原材料是建材企业运营的根基，原材料的成本和质量直接影响到企业的营业利润和市场份额。而如何以较低的运输损耗率获取原材料、如何在不同发展时期合理配置购入原材料，则对建材企业管理层提出较高的能力要求。

原材料损耗率较高会增加企业的运营成本，压缩盈利空间，不利于企业发展；原材料购入过多会使企业存货数量增加，这将占用企业运营资金并加剧了存货损坏的风险；而原材料购入过少会使得企业无法及时完成客户订单，企业信誉受到不良影响，也不利于企业业务的拓展。从企业整体运作的视角来看，预测未来原材料的需求和选择合适的供应商是企业运营管理所需要解决的重要问题。

1.2 问题提出

根据题目要求和附件提供的近五年企业向 402 家供应商每周的订货量、402 家供应商每周可以提供的供货量和 8 家转运商运输损耗率，我们所要解决的问题有如下四个：

问题一要求基于企业向各个供应商每周的订货数量和各个供应商的供货量，建立评价模型，并依次选出对该建材企业最为重要的 50 家供应商；

问题二在问题一的基础上要求解决以下三个问题：为满足日常生产企业至少应选取多少家供应商，在选取供应商之后制定最经济的原材料订购周方案和转运周方案，并对两个方案的效果进行分析；

问题三要求在扩张 A 类原材料缩减 C 类原材料采购数量以及原材料转运耗损率最小化的基础上，如问题二制定新要求下的订购周方案和转运周方案，并对两个方案的效果进行分析；

问题四要求在当前原材料供应和转运情况下，企业每周最多能提高多少产能，在此基础上给出之后 24 周企业的订购周方案和转运周方案。

二、 问题分析

2.1 问题一的分析

问题一要求对供应商的供货特征进行量化分析，构建影响企业生产的数学模型，并对供应商进行排序。本问选择**二级模糊综合评价模型**，确定交货能力、合作能力和发展潜力为一级指标分析供应商的供货特征，同时确定最大供货量、平均交易量、合作次数、合作潜力等为二级指标再对供货特征进行详细划分，之后通过熵权法与专家赋权值对供应商进行模糊综合评价，将评价得分排序，最终得出对于企业 50 家最重要的供应商。

2.2 问题二的分析

问题二要求确定合适的订购和转运策略。本问首先通过时间序列分析预测实际供货量，得到未来 24 周最大的供货量，之后在问题一的基础上建立**多目标 0-1 线性规划模型**，以供应商数量最少为主目标，以总评分最高为辅目标，得到需要的供应商。

之后对缺货量进行分析，通过**时间序列分析**、**灰色预测**等方法预测缺货时期，以预测未来 24 周可能出现的缺货时段，规定企业在缺货时期停止向供应商订货。通过建立**整数线性规划**，在保证库存充足、转运限制和缺货时期不订货的前提下，以最小订购成本为目标建立模型，通过库存机制来计算出未来的订单策略。

最后在已有的订单策略下，以最小损耗量为目标函数建立线性规划，求解出不同供应商的转运商，其中的损耗率同样满足了时间季节性。通过**灰色预测**确定未来 24 周的转运商的损耗率，得到转运方案。

2.3 问题三的分析

问题三以问题二的方案为基础进行改进，将最小化订购成本比值和 C 订单量与 A 订单量比值的加权和作为目标函数，求出最小化使用 C 材料和最大化使用 A 材料的订单方案。该方案在一定程度上使成本不变或者增加，同时 A 材料的较高效益使运输和库存成本降低。本问通过**库存机制**得到未来 24 周的订单方案，依据该订单方案并结合问题二的方法重新进行**0-1 线性规划**，最终得到未来 24 周的转运方案。

2.4 问题四的分析

问题四基于假设认为企业具有较大的产能潜力，每周根据不同的损耗率，以供应商的最大供货量、缺货期和转运量限制作为约束条件，建立最大供应量的**整数非线性规划**，通过**遗传算法**求出最终的供应方案与转运方案。根据转运方案求出每周供应商的实际供给量，从而计算出每周的产能提高量。

三、 模型假设

1. 假设题目所给数据真实可信；
2. 假设建材企业与供应商和转运商之间的业务往来相互独立；
3. 假设企业向供应商的前五年订单，不受供应商供货时段影响，是随机行为；
4. 假设建材企业近期业务并不会有太大波动，对原材料需求量较为稳定；
5. 结社一家供应商每周的运输仅与一家转运商合作；
6. 假设转运商转运三类原材料的运输费用与企业储存原材料的单位费用相同；
7. 假设供应商缺货时段存在一定规律；
8. 假设建材企业具有的产能潜力可以满足最大供货量。

四、 符号说明

符号	说明
C_{ap}	企业产能
W_j	第 j 周的存储量
C_p	供应商的合作潜力
S_p	供应商的供货潜力
$Success_{(t)}$	第 t 年的成功合作数
M_d	供应商的最大供货量
S_d	供应商的供货稳定性
β_{kj}	第 j 周 k 转运商的损耗率
G_i	第 i 个供应商的综合评分
D_i	第 i 个供应商的供应能力
C_i	第 i 个供应商的合作能力
P_i	第 i 个供应商的发展潜力
L_d	供应商提供原材料的总缺货量
F_c	供应商与建材企业的合作频数
S_{ij}	第 i 个供应商在第 j 周的供货量
O_{ij}	第 i 个供应商在第 j 周的订货量
V_c	供应商与建材企业交易的平均交易量
Q_{ikj}	第 j 周第 i 个供应商是否选择了 k 转运商
D_{Xij}	第 i 个 X 原材料供应商在第 j 周的缺货量

五、 模型的建立与求解

5.1 问题一模型的建立与求解

5.1.1 模型建立

问题一要求基于附件中企业向各个供应商每周的订货量和各个供应商的供货量，建立供应商的评价模型进行排序后选出对企业发展最为重要的 50 家供应商。本问选择模糊数学模型^[1]建立对供应商的评价体系，模糊数学模型把决策论域中的研究对象在模糊环境下进行排列，之后本问基于该评价模型选取出最为重要的 50 家供应商企业。

模糊数学模型首先需要确定模糊集和隶属函数，其次计算隶属度矩阵，之后确定检验评价矩阵，最后计算最后得分并进行排序。

(1) 确定模糊集和指标变量

模糊集为模型所需要排序的事物集合，在本题中即为各个原材料供应商。

在附件一中，提供了建材企业对提供不同材料的供应商在不同星期的订货量数据，以及提供特定材料的供应商在不同星期的供货量数据，通过分析相关数据及逻辑关系，本文设定供应商 i 的供应能力 D_i 、合作能力 C_i 和发展能力 P_i 三大因素为一级指标。

本文通过供应商的最大供货量 M_d 、缺货量 L_d 和供货稳定性 S_d 三个二级指标来分

析供应商的供应能力，其中：

① 最大供货量计算公式如下：

$$M_d = \frac{Max_{10}\{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{i240}\}}{10} \quad (1)$$

此处将对原材料供货量从大到小进行排序后选取排名前十的供货量求得的算术平均值作为最大供货量，降低了数据的偶然性使结果更具有普遍意义。

② 供应商缺货量计算公式如下：

$$d(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$L_d = \sum_{j=1}^{240} (O_{ij} - S_{ij}) d(O_{ij} - S_{ij}) \quad (3)$$

当 $O_{ij} > S_{ij}$ 时，建材企业的订货量大于原材料供应商的供给量，此时供应商缺货，

缺货量为 $O_{ij} - S_{ij}$ ，原材料在 240 周内所有的缺货数量之和作为供应商缺货量这一评价指标。

③ 供应商的供货稳定性计算公式如下：

$$S_d = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{240} (S'_{ij} - \bar{S}_{ij})^2}{\sum_{j=1}^{240} d(S'_{ij})}} \quad (4)$$

其中 $S'_{ij} > 0$ ，为已完成供货的供货量，使用已完成供货的方差作为衡量供货稳定性的指标。

对供应商的合作能力的分析，此处采用供应商与建材企业的合作频数 F_c 和单次平均交易量 V_c 两个二级指标，其中：

① 供应商与企业的合作频数公式如下：

$$F_c = \frac{1}{5} \sum Success_{(3)} + \frac{3}{10} \sum Success_{(4)} + \frac{1}{2} \sum Success_{(5)} \quad (5)$$

$Success_{(t)}$ 表示第 t 年的成功合作数，考虑到数据的时效性以及数据对未来发展的影响程度不同，此处不考虑第 1、2 年的合作数总和，并对第 3、4、5 年的合作数总和分别设置 $\frac{1}{5}$ 、 $\frac{3}{10}$ 和 $\frac{1}{2}$ 的权重。

② 供应商与企业的单次平均交易量公式如下：

$$V_c = \frac{\sum_{j=1}^{240} O_{ij} \times Success_{ij}}{\sum_{j=1}^{240} Success_{ij}} \quad (6)$$

表示每次合作中供应商所供应的原材料平均数量。

对供应商发展潜力的分析，此处考虑供应商的合作潜力 C_p 与供货潜力 S_p 作为两个二级指标，其中：

① 供应商的合作潜力公式如下：

$$C_p = \frac{\frac{\sum_{j=193}^{240} Success_{ij}}{192} + \frac{\sum_{j=145}^{192} Success_{ij}}{144}}{\frac{\sum_{j=145}^{192} Success_{ij}}{144} + \frac{\sum_{j=97}^{144} Success_{ij}}{96}} \times 100\% \quad (7)$$

$\sum_{j=97}^{144} Success_{ij}$ 表示第三年的成功交易额， $\sum_{j=145}^{192} Success_{ij}$ 表示第四年的成功交易额，

$\sum_{j=193}^{240} Success_{ij}$ 表示第五年的成功交易额；

$\frac{\sum_{j=193}^{240} Success_{ij}}{\sum_{j=145}^{192} Success_{ij}}$ 表示第五年的交易增长倍数， $\frac{\sum_{j=145}^{192} Success_{ij}}{\sum_{j=97}^{144} Success_{ij}}$ 表示第四年的交易增

长倍数，我们将最近两年的交易增长倍数的算数平均值作为供应商的合作潜力进行评估。

② 供应商的供货潜力公式如下：

$$S_p = \frac{\frac{\sum_{j=193}^{240} S_{ij}}{192} + \frac{\sum_{j=145}^{192} S_{ij}}{144}}{\frac{\sum_{j=145}^{192} S_{ij}}{144} + \frac{\sum_{j=97}^{144} S_{ij}}{96}} \times 100\% \quad (8)$$

$\sum_{j=97}^{144} S_{ij}$ 表示第三年的供货量， $\sum_{j=145}^{192} S_{ij}$ 表示第四年的供货量， $\sum_{j=193}^{240} S_{ij}$ 表示第五年的

供货量；

$\frac{\sum_{j=193}^{240} S_{ij}}{\sum_{j=145}^{192} S_{ij}}$ 表示第五年供货量的增长倍数， $\frac{\sum_{j=145}^{192} S_{ij}}{\sum_{j=97}^{144} S_{ij}}$ 表示第四年供货量的增长倍数，

我们将最近两年供货量增长倍数的算数平均值作为供应商的供货潜力进行评估。

三个一级指标和七个二级指标的所属关系如图 1 所示：

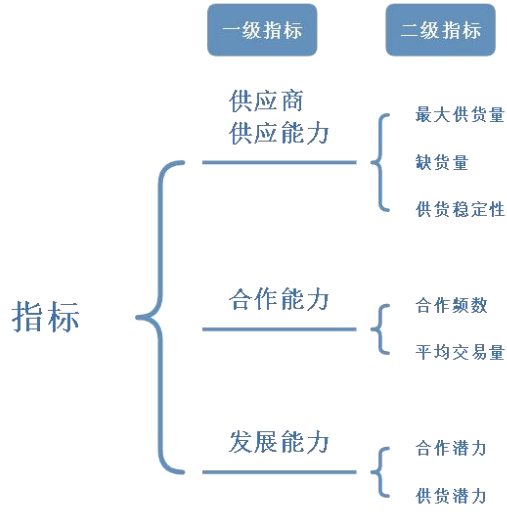


图 1：一级指标和二级指标的所属关系

(2) 确定指标的隶属度函数

在确定了一级指标和二级指标之后，我们确定了七个隶属函数，表达式如下：

① 最大供货量隶属度函数

$$C_1(M_d) = \begin{cases} 0, M_d \leq 5 \\ ax^2 + bx, 5 < M_d \leq 500 \\ 1, M_d > 500 \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{求得 } a = \frac{1}{247500}, \quad b = -\frac{1}{47500};$$

② 缺货量隶属度函数

$$C_2(L_d) = \begin{cases} 1, L_d \leq 100 \\ \frac{1000 - L_d}{1000 - 100}, 100 < L_d \leq 1000 \\ 0, L_d > 1000 \end{cases} \quad (10)$$

③ 供货稳定性隶属度函数

$$C_3(S_d) = \begin{cases} 1, S_d \leq 20 \\ \frac{200 - S_d}{200 - 20}, 20 < S_d \leq 200 \\ 0, S_d > 200 \end{cases} \quad (11)$$

④ 合作频数隶属度函数

$$C_4(F_c) = \begin{cases} 0, F_c \leq 2 \\ \frac{F_c - 2}{48 - 2}, F_c > 2 \end{cases} \quad (12)$$

⑤ 平均交易量隶属度函数

$$C_5(V_c) = \begin{cases} 0, V_c \leq 10 \\ a'x^2 + b'x, 10 < V_c \leq 1000 \\ 1, V_c > 1000 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{求得 } a' = \frac{1}{9.9 \times 10^5}, \quad b' = -\frac{1}{9.9 \times 10^4}$$

⑥ 合作潜力隶属度函数

$$C_6(C_p) = \begin{cases} 0, C_p \leq 0.9 \\ \frac{C_p - 0.9}{2 - 0.9}, 0.9 < C_p \leq 2 \\ 1, C_p > 2 \end{cases} \quad (14)$$

⑦ 供货潜力隶属度函数

$$C_7(S_p) = \begin{cases} 0, S_p \leq 0.2 \\ \frac{S_p - 0.2}{15 - 0.2}, 0.2 < S_p \leq 15 \\ 1, S_p > 15 \end{cases} \quad (15)$$

(3) 熵权法确定指标权重

本问使用熵权法确定二级指标在指标集中所占权重，熵权法具体步骤如下：

STEP 1: 计算在第 j 项指标下第 i 个对象中的特征比重

设第 i 个对象的第 j 项指标的标准化数据 $x'_{ij} > 0 (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ ，则 i

对象的指标在所有 j 项指标中的特征比重为：

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (16)$$

STEP 2: 计算第 j 项指标的熵值

$$e_{ij} = -\frac{\sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln n} (j = 1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

STEP 3: 计算第 j 项指标的差异系数

$$g_j = 1 - e_j (j = 1, 2, \dots, m) \quad (18)$$

STEP 4: 确定第 j 项指标的权重系数

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{k=1}^m g_k} (j = 1, 2, \dots, m) \quad (19)$$

(4) 二级指标综合评判

根据 (1) 已确定三组需要分析的指标集 $T = \{x_1, \dots, x_p\}$ ，由 (3) 可以确定指标集

中元素对应的权重向量 $W = [w_1, \dots, w_p]$ ；

将 402 家企业的相关数据带入到相应的隶属度函数中，将数值代入矩阵中，获得

$R = (r_{ij})_{p \times 402}$ ， p 行 402 列的综合评价矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,402} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,402} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p,1} & r_{p,2} & \cdots & r_{p,402} \end{bmatrix} \quad (20)$$

我们将权重向量与综合评价矩阵相乘得到一行 402 列的模糊综合评价结果向量，

$$\text{将其定义为 } A, \quad A = [w_1, \cdots, w_p] \times \begin{bmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{1,402} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{p,1} & \cdots & r_{p,402} \end{bmatrix} = [a_1, \cdots, a_{402}]$$

得到 402 家供应商一级指标的数值： $b_k = \sum_{j=1}^p w_j r_{jk}, \quad k = 1, 2, \cdots, 402$

(5) 一级指标综合评判

根据专家意见^[2]，本问对供应商的供货能力、供应商的合作能力和供应商的发展潜力三大一级指标分别赋权重 0.3782、0.3301 和 0.2918。对一级指标求加权平均值得到最终企业的综合评判情况，对一级指标加权平均后的数据进行排序，得出排名前 50 的供应商为对建材企业最为重要的 50 家供应商。

5.1.2 模型求解

结合专家赋权值和熵权法，最终得到一级指标与二级指标的权重占比情况如表 1 所示：

表 1：一级指标与二级指标的权重占比情况

一级指标	权重	二级指标	权重
供货能力	0.3782	最大供货量	0.7232
		供货缺货量	0.1291
		供货稳定性	0.1477
合作能力	0.3301	合作频数	0.2274
		平均交易量	0.7726
发展潜力	0.2918	合作潜力	0.5605
		供货潜力	0.4395

在确定了各指标所占权重后，将供应商的相关指标代入各隶属度函数求得二级指标综合评判值，最终求得企业的总和评判结果，综合评价得分前 50 的供应商代码和分数如表 2 所示，得分排名前 50 的供应商即为保障企业生产最重要的 50 家供应商。

表 2：综合评价得分前 50 的供应商代码与分数情况

供应商代码	综合评判分数	供应商代码	综合评判分数
S201	0.880702	S194	0.415114
S229	0.625659	S143	0.409377
S151	0.625254	S352	0.406934
S361	0.625238	S210	0.400909
S108	0.624849	S77	0.397394

S140	0.618024	S55	0.374787
S395	0.592879	S364	0.373847
S126	0.551654	S119	0.373497
S374	0.550491	S338	0.368781
S282	0.538633	S114	0.366012
S308	0.523206	S37	0.365101
S139	0.51336	S86	0.363652
S275	0.503408	S240	0.338475
S330	0.502168	S74	0.33507
S340	0.500577	S208	0.332864
S329	0.487262	S291	0.311247
S348	0.466282	S48	0.291584
S268	0.463843	S84	0.291111
S306	0.458263	S365	0.288658
S131	0.455503	S40	0.280954
S356	0.450694	S5	0.276641
S154	0.4389	S52	0.274375
S273	0.434476	S238	0.273313
S284	0.426903	S228	0.258207
S307	0.426811	S247	0.253405

综合评价得分前 50 的供应商得分的分布如图 2 所示：

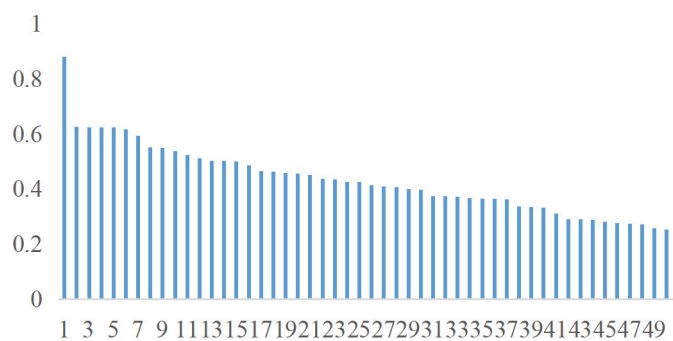


图 2： 供应商排名前 50 综合评判分数

5. 2 问题二模型的建立与求解

5.2.1 模型建立

问题二在问题一的基础上要求在满足企业生产需求的前提下，至少要选择多少数量的供应商提供原材料。在选择供应商之后，企业考虑成本最低和损耗最少的要求下应如何制定未来的原材料订购和转运方案。

为最大程度满足企业生产需求，本文在选择供应商时主要考虑问题一中综合评判分数排名前 50 的供应商。同时为确定未来 24 周企业对原材料的需求量，我们首先对过去 5 年的数据进行处理获取未来数据。在获得未来原材料需求量后，我们在选择供应商的过程中采用多目标 0-1 线性规划，确定企业对供应商的选择方案。具体过程如

图 3 所示：

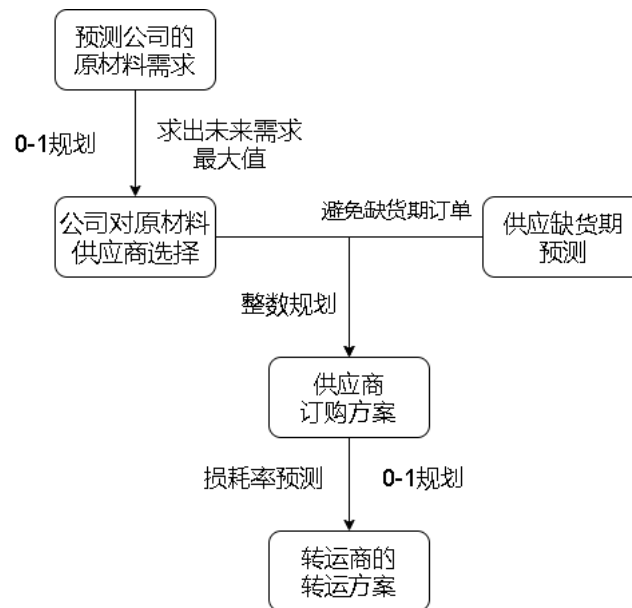


图 3：问题 2 的解题思路

(1) 预测企业未来对原材料的需求

本问选择时间序列分析^[3]的方法预测企业未来对原材料的需求量。时间序列分析通过对历史数据的统计与分析，进一步推测未来的发展趋势，本问采用时间序列分析预测企业对原材料的需求趋势并确定在未来 24 周企业对原材料的需求数量。

首先对数据缺失值进行处理，通过折线图的形式表示出历史五年建材企业对原材料的需求量如图 3 所示，可以看出企业对原材料的需求量的变动大体具有季节性的变动趋势。

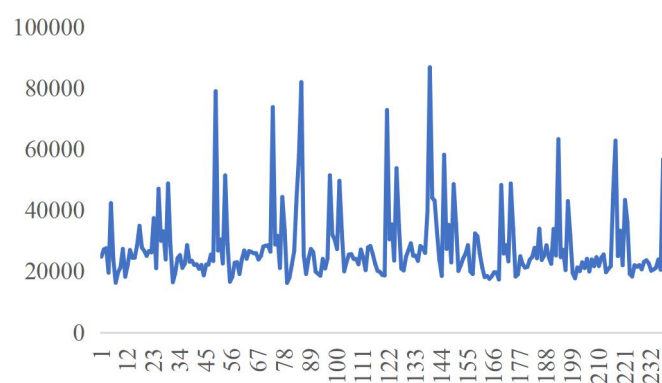


图 4：历史 5 年企业对原材料的需求量

之后使用 SPSS 的时间序列预测创建简单季节性的模型进行预测。

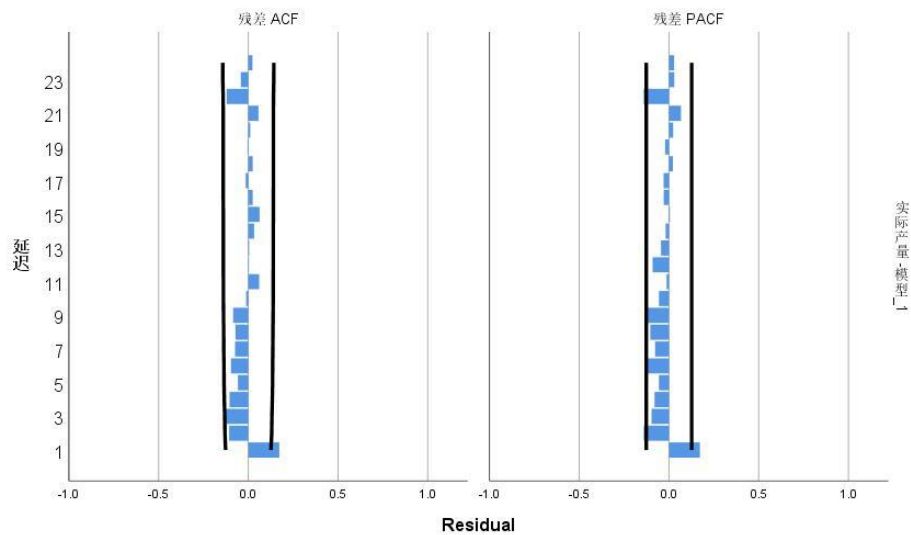


图 5：处理后数据的 ACF 和 PACF 图形分析

从残差的 ACF 和 PACF 图形中可以看出，所有阶数的自相关系数和偏自相关系数均与 0 没有显著的差异，通过时间序列分析模型拟合度我们可以认为残差就是白噪声序列，而简单季节性模型能够很好的预测企业未来对原材料的需求量。

表 3：时间序列分析对模型的拟合度

拟合统计	平均值	标准误差	最小值	最大值
平稳 R 方	0.67	.	0.67	0.67
R 方	0.579	.	0.579	0.579
RMSE	7492.188	.	7492.188	7492.188
MAPE	16.321	.	16.321	16.321
MaxAPE	115.022	.	115.022	115.022
MAE	4704.351	.	4704.351	4704.351
MaxAE	45389.85	.	45389.85	45389.85
正态化 BIC	17.889	.	17.889	17.889

从表 3 的模型拟合度可以看出平稳的 R 方数值较大说明拟合的效果较好，对于正态化 BIC 值对比分析，我们选择了最小的 BIC 值进行时间序列的模型建立，综上从数据层面说明了季节性模型的准确性。

最终我们获得企业对原材料的实测、拟合和预测曲线如图 5 所示。通过对图 5 的观测，可以看出对历史五年原材料需求量的拟合与实际数值差异较小，拟合效果较好。

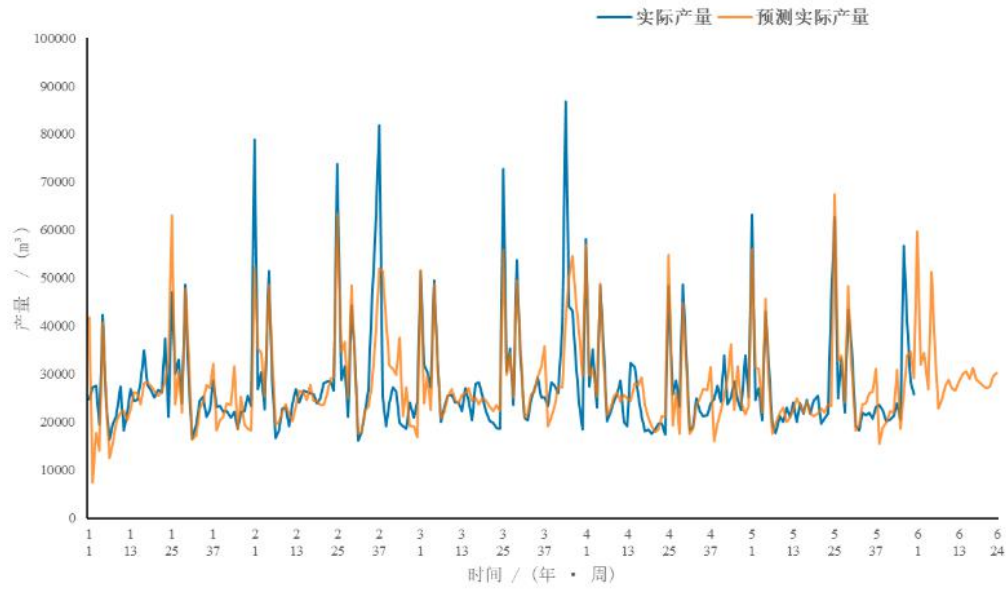


图 6：企业对原材料的实测、拟合和预测曲线

(2) 企业对原材料供应商的选择

我们使用多目标 0-1 线性规划选择原材料供应商。首先定义 $x_i, i = 1, \dots, 50$ ， x_i 表示企业对排名前 50 供应商的选择，当 $x_i = 1$ 时表示企业选择该供应商；当 $x_i = 0$ 时表示企业不选择该供应商。

根据题目要求，本问需要使选择的供应商数量最小，对应目标函数^[4]为：

$$\min \sum x_i \quad (21)$$

同时为满足原材料订购方案的经济性，最大化供应商 i 的综合评分 G_i 之和，对应目标函数为：

$$\max G_i x_i \quad (22)$$

我们限定约束条件供应商的供货总量不能小于建材企业对材料的需求量，即：

$$\text{s.t. } \sum x_i \frac{S_{\max i}}{\text{typ}(x_i)} \geq Y_{\max} \quad (23)$$

其中函数 $\text{typ}(x_i)$ 的取值与原材料的种类有关， $\text{typ}(x_i) = \begin{cases} 0.6, & \text{原材料为 } A \\ 0.66, & \text{原材料为 } B \\ 0.72, & \text{原材料为 } C \end{cases}$ ； $S_{\max i}$

为原材料供货量从大到小进行排序后选取排名前 15 的供货量求得的算术平均值，由于题目中规定一家供应商只能选择一家转运商，而一家转运商每周最多只能运输 6000 立方米的原材料，如果出现 $S_{\max i} > 6000$ 的情况，则规定 $S_{\max i} = 6000$ 。

根据以上分析，确定原材料供应商的模型为：

$$\begin{cases} \max G_i x_i \\ \min \sum x_i \end{cases}$$

$$s.t. \sum x_i \frac{S_{\max i}}{typ(x_i)} \geq Y_{\max}$$

对于多目标 0-1 线性规划，我们选择 NSGA-II 算法对于问题进行求解，NSGA-II 算法即带精英策略的非支配排序遗传算法，该算法在 NSGA 算法的基础上进行了以三个方面的改进：

1、应用了快速非支配排序算法，对比 NSGA 的非支配排序算法，复杂度大幅度下降，由原来的 $O(mN^3)$ 降为 $O(mN^2)$ 。（ m 为目标函数的个数， N 为种群的大小）；

2、引入拥挤度和拥挤度比较算子，这不但克服了 NSGA 算法中需要人为指定参数的缺陷，而且将拥挤度作为种群中个体之间的比较准则，使得准 Pareto 域中的种群个体能均匀扩展到整个 Pareto 域，从而保证了种群的多样性。

3、应用了精英策略，以防止在种群进化过程使得优秀的个体流失，通过将父代种群与产生的子代种群组合进行非支配排序的方法，避免了父代种群中优秀个体的流失，提高优化结果的准确度。

(3) 对供应商出现异常值的预测

定义 D_{ij} 为缺货量，用企业对原材料的需求量与供应商原材料的供给量之差来表示：

$$D_{ij} = O_{ij} - S_{ij} \quad (24)$$

本问使用 SPSS 的时间序列分析预测未来缺货量较大的异常值出现的周数，在异常值出现的周数企业不向供应商下订单。在创建传统模型、补充缺失值后，对过去五年异常值出现周数的数据进行可视化处理，如图 6 所示，发现数据并不存在季节性变化。我们通过 SPSS 时间序列预测作出序列图，选择最优模型进行预测，得到预测结果如图 6 所示：

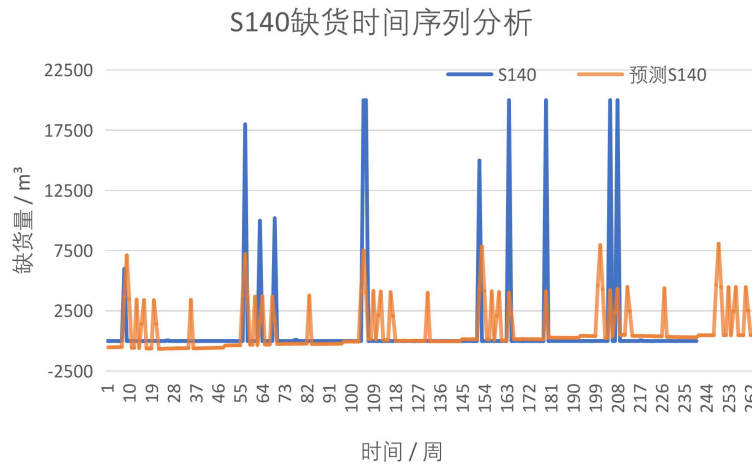


图 7：未来 24 周 S140 供应商缺货预测

通过图 6 可以看出由于历史数据较少，通过时间序列分析得到的预测结果与历史数据误差较大，时间序列分析效果较差。故本问考虑重新选择处理小样本的灰色预测模型，通过首先计算数列的级比进行数据检验，再构建灰色预测模型，最后进行预测检验构建出一阶微分方程模型 GM (1,1)。

最终得到灰色预测模型原始数据与预测数据的折线图如图 7 所示，通过观察发现前五年的预测数据与原始数据差距较小，模型预测较为合理。

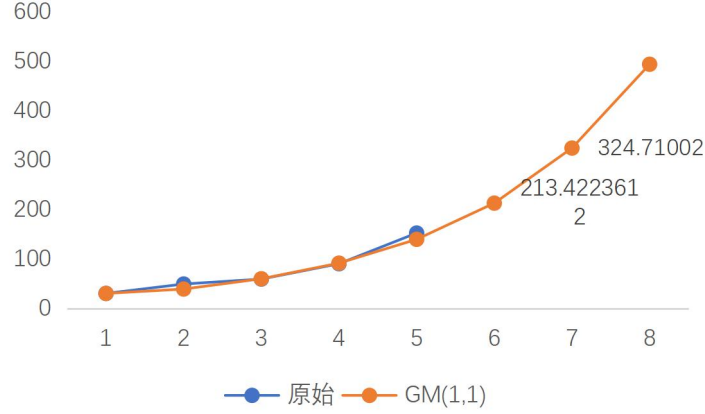


图 8：灰色预测模型原始数据与预测数据

(4) 企业订购方案的选择

首先设定企业材料的存储量不小于企业产能的约束条件：

$$W_w + \left[\frac{\sum o_{Aiw}}{0.6} + \frac{\sum o_{Biw}}{0.66} + \frac{\sum o_{Ciw}}{0.72} \right] \times (1 - \beta) \geq 2.82 \times 10^4 \times 2 + Cap(t) \quad (25)$$

确定 w+1 周的库存量为 w 周的库存量加上 w+1 周原材料的实际运输量减去 w 周产能的损耗。

$$W_{w+1} = W_w + \left[\frac{\sum S_{Aiw}}{0.6} + \frac{\sum S_{Biw}}{0.66} + \frac{\sum S_{Ciw}}{0.72} \right] \times (1 - \beta) - 2.8 \times 10^4 \quad (26)$$

其中 β 表示转运商的损耗率，本问中对转运商的损耗率求平均确定 $\beta = 1\%$ ； W_w 为第 w 周的存储量； $Cap(t)$ 采用时间序列分析确定原材料需求量的变化。上式要求企业原材料的库存量和实际运输量不能小于企业两周的产能和原材料增加的需求量。

同时根据题目和变量定义本问对 A、B、C 三种原材料的供给量进行限制：

$$\begin{cases} S_{Aiw} \leq S_{Ai \max} \leq 6000 \\ S_{Biw} \leq S_{Bi \max} \leq 6000 \\ S_{Ciw} \leq S_{Ci \max} \leq 6000 \end{cases} \quad (27)$$

定义函数 $g(X_{iw})$, $g(X_{iw}) = 1$ 表示在 w 周供应 X 原材料的第 i 供应商处于缺货期；

$g(X_{iw}) = 0$ 表示在 w 周 i 供应商未处于缺货期。则函数 $g(X_{iw})$ 满足

$$g(X_{iw})O_{Xiw} = 0 \quad (28)$$

根据题意要求在成本尽可能低的情况下选择供应商的订购方案，目标函数如下：

$$\min P_A S_A + P_B S_B + P_C S_C \quad (29)$$

其中 S 表示对原材料的需求量， P 表示原材料的价格，由于题目中给出 A 类原材料和 B 类原材料的成本分别是 C 类原材料成本的 1.2 倍和 1.1 倍，故本问中假定：

$$\begin{cases} S_A = \sum S_{Aiw} \\ S_B = \sum S_{Biw} \\ S_C = \sum S_{Ciw} \end{cases} \quad \begin{cases} P_A = 1.2 \\ P_B = 1.1 \\ P_C = 1 \end{cases}$$

根据以上分析，确定供应商的订购方案为：

$$\begin{aligned} &\min P_A S_A + P_B S_B + P_C S_C \\ &s.t. \begin{cases} g(X_{iw})O_{Xiw} = 0 \\ S_{Aiw} \leq S_{Ai \max} \leq 6000 \\ S_{Biw} \leq S_{Bi \max} \leq 6000 \\ S_{Ciw} \leq S_{Ci \max} \leq 6000 \end{cases} \end{aligned}$$

根据库存机制来确定每一周的库存量最后通过循环得到每一周的订购方案

$$W_{w+1} = W_w + \left[\frac{\sum S_{Aiw}}{0.6} + \frac{\sum S_{Biw}}{0.66} + \frac{\sum S_{Ciw}}{0.72} \right] \times (1 - \beta) - 2.8 \times 10^4$$

(5) 转运商运输策略的选择

首先通过时间序列分析对转运商在未来 24 周的运输损耗率进行预测

其次定义 Q_{ikw} 、 β_{kw} 和 S_{iw} 三个变量，具体含义如下所示：

Q_{ikw} 表示在第 w 周第 i 个供应商是否选择了 k 转运商， $Q_{ikw} = 1$ 表示选择 k 转运商，

$Q_{ikw} = 0$ 表示不选择 k 转运商；

β_{kw} 表示通过时间序列分析预测的第 w 周 k 转运商的损耗率；

S_{iw} 表示第 w 周 i 供应商的供应量。

之后根据题目要求设置目标函数和约束条件如下：

为考虑决策的经济性需要原材料损耗最小，即设置目标函数如下：

$$\min \sum_{i=1}^{11} \sum_{k=1}^8 \frac{S_{iw} Q_{ikw} \beta_{kw}}{typ(S_{iw})} \quad w \in [1, 24] \quad (30)$$

根据题目要求限制转运数量最多为 6000 立方米，设置约束条件一如下：

$$\sum_{i=1}^{11} S_{iw} Q_{ikw} \leq 6000 \quad (k=1, \dots, 8) \quad (31)$$

同时限制一家供应商只能选择一家转运商，设置约束条件二如下：

$$\sum_{k=1}^8 Q_{ikw} = 1 \quad (i=1, \dots, 11) \quad (32)$$

根据以上分析，确定转运商转运方案的模型为：

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^{11} \sum_{k=1}^8 \frac{S_{iw} Q_{ikw} \beta_{kw}}{\text{typ}(S_{iw})} \quad w \in [1, 24] \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i=1}^{11} S_{iw} Q_{ikw} \leq 6000 \quad (k=1, \dots, 8) \\ \sum_{k=1}^8 Q_{ikw} = 1 \quad (i=1, \dots, 11) \end{cases} \end{aligned}$$

5.2.2 模型求解

(1) 企业对原材料的需求量

通过时间序列分析得到在未来 5 周企业对原材料的需求量如表 4 所示：

表 4：未来 5 周对原材料的需求量（单位：立方米）

第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 4 周	第 5 周
38843	0	18544	13445	33937

(2) 企业对供应商的选择

最终确定企业选择原材料供应商最少 8 个，其代码和提供原材料类型如表 5 所示

表 5：供应商的代码和提供原材料类型

供应商代码	原材料类型
S037	C
S086	C
S108	B
S139	B
S140	B
S151	C
S201	A
S307	A
S348	A
S374	C
S395	A

(3) 供应商异常值的预测

表 6：对供应商异常值的预测

WEEK	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S086									
S108	1	1	1						
S201									
WEEK	10	11	12	13	14	15	16	17	18
S086									
S108				1	1	1	1	1	
S201	1	1	1	1	1				

其中 1 表示相应供应商在对应周数缺货

(4) 企业订购方案的选择

通过求解线性规划问题得到企业对具体供应商的订货方案如表 7 所示：

表 7：企业对具体供应商的订货方案（单位：立方米）

供应商	原材料	第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 4 周	第 5 周
S37	C	2269	0	410	0	2272
S86	C	969	0	0	0	962
S108	B	0	0	0	0	0
S139	B	6001	0	0	0	0
S140	B	4462	0	0	0	5554
S151	C	3904	0	0	3907	3909
S201	A	4808	0	4805	1507	4812
S307	A	4922	0	4929	4922	4922
S348	A	4892	0	4890	0	4896
S374	C	3108	0	0	3109	3107
S395	A	3508	0	3510	0	3503

(5) 对转运商转运方案的选择

首先使用时间序列分析预测未来 24 周 8 家转运商的运输损耗率，预测结果如表 5 所示：

表:10：未来 24 周转运商的运输损耗率（单位：%）

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
W1	1.85	0.52	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.69
W2	2.11	1.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.04
W3	1.27	0.52	0.03	0.00	0.00	0.04	0.33	0.04
W4	1.25	0.95	0.00	0.00	0.00	4.52	0.34	0.04
W5	0.97	0.63	0.02	0.00	0.00	2.14	0.53	0.55
W6	1.09	0.77	0.03	0.00	0.00	5.00	0.40	1.06
W7	1.05	0.52	0.06	0.00	0.00	0.39	0.11	0.59

W8	1.30	0.91	0.00	0.00	0.00	0.22	0.23	1.20
W9	1.98	0.81	0.05	0.00	0.88	0.17	1.80	1.23
W10	2.46	0.81	0.00	0.00	1.28	0.08	2.48	0.62
...

基于运输损耗率和企业对原材料的实际需求情况，确定在未来 3 周企业选择的最优订购和转运方案如表 11 所示。由于第 2 周企业对原材料的需求量为 0，故仅展示第 1 周和第 3 周的方案。

表 11：未来第 1 周和第 3 周的订购转运方案

	第 1 周		第 3 周	
	供应商	供应量	供应商	供应量
T1	S374	3109	—	—
T2	S140	4466	—	—
T3	S348	4898	S201	4812
T4	S139	6000	S348	4898
T5	S086	968	S037	409
	S307	4930	S307	4930
T6	S395	3512	S395	3512
	S037	2277	—	—
T7	S201	4812	—	—
T8	S151	3910	—	—

（供应量单位：立方米）

5.2.3 模型检验

企业对 A、B、C 三种不同原材料的订购情况如表 8 所示：

表 8：A、B、C 三种不同原材料的订购情况（单位：立方米）

A	B	C
60826	16017	27926

根据模型建立中的分析与题目要求，可以得到 A、B、C 三种不同原材料价格、效应和性价比等基本信息的情况如表 9 所示：

表 9：A、B、C 三种不同原材料的基本情况

	A	B	C
价格	1.2	1.1	1.0
效应	1.66	1.52	1.39
性价比	1.39	1.38	1.39

对比表 8 和表 9，发现通过模型确定的订购方案与原材料的基本情况契合程度较高：B 材料的性价比较低，在订购过程中也减少了对 B 材料的选择。

5.3 问题三模型的建立与求解

5.3.1 模型建立

问题三与问题二同样都是为企业设计订购和转运方案，但问题三要求扩张 A 类原材料缩减 C 类原材料采购数量以及使原材料转运损耗率最小化，企业对原材料供应商和转运商的选择需要进一步调整。

(1) 企业对原材料供应商的选择

与问题二相类似，首先设定企业材料的存储量不小于企业产能的约束条件：

$$W_w + \left[\frac{\sum O_{Aiw}}{0.6} + \frac{\sum O_{Biw}}{0.66} + \frac{\sum O_{Ciw}}{0.72} \right] \times (1 - \beta) \geq 2.82 \times 10^4 \times 2 + Cap(t) \quad (33)$$

其中 β 表示转运商的损耗率，本问中对转运商的损耗率求平均确定 $\beta = 1\%$ ； W_w 为第 w 周的存储量； $Cap(t)$ 采用时间序列分析确定原材料需求量的变化。上式要求企业原材料的库存量和实际运输量不能小于企业两周的产能和原材料增加的需求量。

同时根据题目和变量定义本问对 A、B、C 三种原材料的供给量进行限制：

$$\begin{cases} S_{Aiw} \leq S_{Ai \max} \leq 6000 \\ S_{Biw} \leq S_{Bi \max} \leq 6000 \\ S_{Ciw} \leq S_{Ci \max} \leq 6000 \end{cases} \quad (34)$$

定义函数 $g(X_{ij})$, $g(X_{ij}) = 1$ 表示在 w 周 i 供应商处于缺货期； $g(X_{ij}) = 0$ 表示在 w 周 i 供应商未处于缺货期。则函数 $g(X_{ij})$ 满足

$$g(X_{iw}) O_{Xiw} = 0 \quad (35)$$

根据题意要求在成本尽可能低的情况下选择供应商的供货方案，目标函数如下：

$$\min \frac{P_A S_A + P_B S_B + P_C S_C}{Q(t)} + \frac{\sum O_C}{\sum O_A} \quad (36)$$

其中 S 表示对原材料的需求量， P 表示原材料的价格，由于题目中给出 A 类原材料和 B 类原材料的成本分别是 C 类原材料成本的 1.2 倍和 1.1 倍，故本问中假定：

$$\begin{cases} S_A = \sum S_{Aiw} \\ S_B = \sum S_{Biw} \\ S_C = \sum S_{Ciw} \end{cases} \quad \begin{cases} P_A = 1.2 \\ P_B = 1.1 \\ P_C = 1 \end{cases}$$

$Q(t)$ 为第二问所求得的生产成本， $\frac{P_A S_A + P_B S_B + P_C S_C}{Q(t)}$ 计算问题三与问题二的成

本比值表示成本变化率， $\frac{\sum O_C}{\sum O_A}$ 表示 C 原材料与 A 原材料之间的比值，比值越小说明

采购的 A 类原材料越多采购的 C 类原材料越少。通过目标函数的限制，使成本变化率和原材料比值之和最小。

根据上述分析，公司对原材料供应商选择的模型如下所示：

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{P_A S_A + P_B S_B + P_C S_C}{Q(t)} + \frac{\sum O_C}{\sum O_A} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} W_w + \left[\frac{\sum O_{Aiw}}{0.6} + \frac{\sum O_{Biw}}{0.66} + \frac{\sum O_{Ciw}}{0.72} \right] \times (1 - \beta) \geq 2.82 \times 10^4 \times 2 + Cap(t) \\ g(X_{iw}) O_{Xiw} = 0 \\ S_{Aiw} \leq S_{Ai \max} \leq 6000 \\ S_{Biw} \leq S_{Bi \max} \leq 6000 \\ S_{Ciw} \leq S_{Ci \max} \leq 6000 \end{cases} \end{aligned}$$

(2) 企业对原材料转运商的选择

定义 Q_{ikw} 、 β_{kw} 和 S_{iw} 三个变量，具体含义如下所示：

Q_{ikw} 表示在第 w 周第 i 个供应商是否选择了 k 转运商， $Q_{ikw} = 1$ 表示选择 k 转运商，

$Q_{ikw} = 0$ 表示不选择 k 转运商；

β_{kw} 表示通过时间序列分析预测的第 w 周 k 转运商的损耗率；

S_{iw} 表示第 w 周 i 供应商的供应量。

之后根据题目要求设置目标函数和约束条件如下：

为考虑决策的经济性需要原材料的损耗率最小，设置目标函数如下：

$$\min \quad \frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{k=1}^8 \frac{S_{iw} Q_{ikw} \beta_{kw}}{typ(S_{iw})}}{\sum_{i=1}^{11} S_{iw}} \quad w \in [1, 24] \quad (37)$$

根据题目要求限制转运数量最多为 6000 立方米，设置约束条件一如下：

$$\sum_{i=1}^{11} S_{iw} Q_{ikw} \leq 6000 \quad (k = 1, \dots, 8) \quad (38)$$

同时限制一家供应商只能选择一家转运商，设置约束条件二如下：

$$\sum_{k=1}^8 Q_{ikw} = 1 \quad (i=1, \dots, 11) \tag{39}$$

根据以上分析，确定原材料转运商的模型为：

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{k=1}^8 \frac{S_{iw} Q_{ikw} \beta_{kw}}{typ(S_{iw})}}{\sum_{i=1}^{11} S_{iw}} \quad w \in [1, 24] \\ s.t. \quad & \begin{cases} \sum_{i=1}^{11} S_{iw} Q_{ikw} \leq 6000 \quad (k=1, \dots, 8) \\ \sum_{k=1}^8 Q_{ikw} = 1 \quad (i=1, \dots, 11) \end{cases} \end{aligned}$$

5.3.2 模型求解

通过求解线性规划模型，得到在未来 5 周企业对所选择的 11 家供应商的订货方案如表 12 所示：

表 12：企业对供应商的订货方案（单位：立方米）

供应商	第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 4 周	第 5 周
S37	2270	0	212	997	2248
S86	964	0	101	959	317
S108	0	0	0	0	0
S139	4809	38	16	1238	3969
S140	5621	41	0	1325	3546
S151	3761	0	79	1143	3276
S201	4811	39	4809	1230	4809
S307	4925	41	4928	2306	4930
S348	4750	36	4897	959	4891
S374	3100	0	47	1298	1718
S395	3506	38	3512	2247	3506

基于运输损耗率和企业对原材料的实际需求情况，确定在未来第 1 周和第 3 周企业选择的最优订购和转运方案如表 13 所示：

表 13：未来第 1 周和第 3 周的订购转运方案

	第 1 周		第 3 周	
	供应商	供应量	供应商	供应量
T1	S374	3109	—	—

T2	S139	4813	—	—
T3	S201	4812	S201	4812
T4	S140	5622	S037	214
	—	—	S086	103
	—	—	S139	16
	—	—	S151	81
	—	—	S307	4930
	—	—	S374	54
T5	S037	2277	S348	4898
	S395	3512	—	—
T6	S086	968	S395	3512
	S307	4930	—	—
T7	S348	4754	—	—
T8	S151	3763	—	—

5.3.3 模型检验

将问题三的订购成本与问题二的订购成本做对比如图 9 所示，大多数时间问题三的订购成本更低，这使得订购方案更经济。

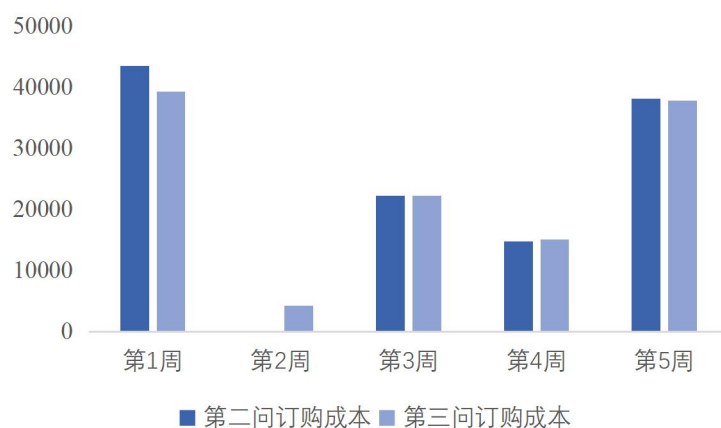


图 9：问题二与问题三的订购成本对比

将问题三的订货方案与问题二的订货方案做对比，将两问中订货方案中 C 原材料和 A 原材料订货量的比值，即 $\frac{O_C}{O_A}$ 进行比较，具体数据情况如图 8 所示，可以看到相较于问题二，问题三的决策 C 原材料和 A 原材料订货量的比值显著降低，符合题目要求。

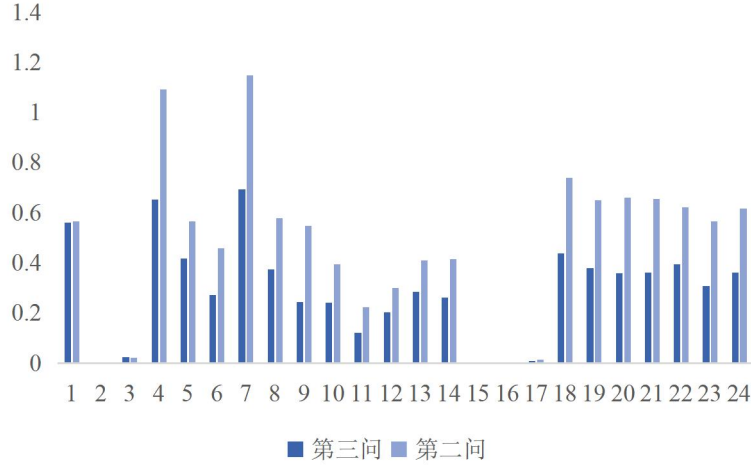


图 10: 第三问与第二问 $\frac{O_C}{O_A}$ 比较

5.4 问题四模型的建立与求解

5.4.1 模型建立

问题四要求依据给出的供应商与转运商的基本情况，确定建材企业每周可能提高的产能。基于企业未来的产能增速，制定之后 24 周的原材料订购和转运方案。

(1) 整数非线性规划

考虑到题目要求最大化企业的产能，设置最大化企业原材料需求量的目标函数，即：

$$\max \sum_{i=1}^{11} \sum_{k=1}^8 \frac{O_{iw} Q_{ikw} (1 - \beta_{kw})}{typ(O)} \quad (40)$$

定义变量 Q_{ikw} 和 O_{iw} ：与问题二问题三类似 Q_{ikw} 在第 w 周第 i 个供应商是否选择了 k 转运商， $Q_{ikw}=1$ 表示选择 k 转运商， $Q_{ikw}=0$ 表示不选择 k 转运商； O_{iw} 表示第 w 周向 i 供应商提交的订单。

根据题意和实际对订购和转运方案的要求，本文设置约束条件如下：

①要求企业对原材料的需求量小于原材料的最大供给量：

$$O_{iw} \leq S_{\max i} \quad (41)$$

②要求供应商只能选择一家转运商

$$\sum_{k=1}^8 Q_{ikw} = 1 \quad (i=1, \dots, 11) \quad (42)$$

③要求供应商每次对企业的订单需求量不能超过 6000 立方米

$$\sum_{i=1}^{11} O_{iw} Q_{ikw} \leq 6000 \quad (k=1, \dots, 8) \quad (43)$$

④ Q_{ikw} 表示是否对该转运商进行选择，其取值范围为 $[0, 1]$

$$0 \leq Q_{ikw} \leq 1 \quad (44)$$

⑤ $g(X_{iw}) = 1$ 表示在 w 周 i 供应商处于缺货期； $g(X_{iw}) = 0$ 表示在 w 周 i 供应商未处于缺货期。则函数 $g(X_{iw})$ 满足

$$g(X_{iw}) O_{iw} = 0 \quad (45)$$

根据以上分析，确定原材料订购和转运的模型为：

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^{11} \sum_{k=1}^8 \frac{O_{iw} Q_{ikw} (1 - \beta_{kw})}{typ(O)} \\ & s.t. \begin{cases} O_{iw} \leq S_{\max i} \\ \sum_{i=1}^{11} S_{iw} Q_{ikw} \leq 6000 \quad (k=1, \dots, 8) \\ \sum_{k=1}^8 Q_{ikw} = 1 \quad (i=1, \dots, 11) \\ 0 \leq Q_{ikw} \leq 1 \\ g(X_{iw}) O_{iw} = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

(2) 遗传算法

之后通过 MATLAB 的遗传算法求解这一非线性规划和 0-1 线性规划问题。

遗传算法是模拟自然选择和生物进化过程的计算模型，的通过模拟自然进化过程探索最优解的方法。遗传算法过程如下：

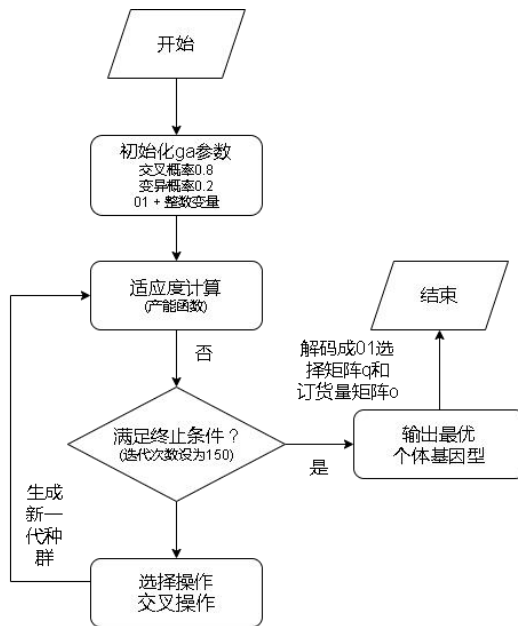


图 11：遗传算法的具体过程

STEP 1：随机产生种群，在本问中种群为订购和转运方案。

STEP 2：计算个体的适应度，判断其是否符合优化准则，若符合则输出最优解，在本问中为最优方案；否则则进行下一步。

STEP 3：根据适应度情况选择父辈，适应度高的个体被选中的概率更高。

STEP 4：染色体进行交叉，生成子代。

STEP 5：子代染色体进行变异。

STEP 6：染色体交叉变异后形成新一代种群，此时再进入 STEP 2 进行适应度计算，循环直至最优解，即最优的订购和转运方案产生。

5.4.2 模型求解

通过求解非线性规划模型，得到在未来 5 周企业对所选择的 11 家供应商的订货方案如表 14 所示：

表 14：企业对具体供应商的订货方案（单位：立方米）					
供应商	第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 4 周	第 5 周
S037	2276	2276	226	2276	1232
S086	967	967	967	967	666
S108	0	0	0	4870	4606
S139	6000	6000	6000	1220	4764
S140	6000	6000	5774	6000	3238
S151	3909	3909	0	3903	3405
S201	4811	4811	4811	4811	2762
S307	0	4592	4793	4929	4450
S348	4897	0	4897	4780	2595
S374	3108	3106	1207	1071	1550
S395	136	1408	3511	3503	3511

基于运输损耗率和企业对原材料的实际需求情况，确定在未来第 1 周和第 3 周企业选择的最优订购和转运方案如表 15 所示：

表 15：未来第 1 周和第 3 周的订购转运方案

	第 1 周		第 3 周	
	供应商	供应量	供应商	供应量
T1	S201	4811	S139	6000
T2	S151	3909	—	—
T3	S374	3108	S086	967
T4	S139	6000	S201	4811
T5	—	—	S037	226
	—	—	S140	5774
T6	S086	967	S307	4793
	S348	4897	S374	1207
	S395	136	—	—
T7	S140	6000	S348	4897
T8	S037	2276	S395	3511

5.4.3 模型检验

根据原材料供应商和转运商的现有情况，对企业产能提升情况进行数值分析，情况如图 10，可以看出在最大供应策略下，建材公司的产能有了较大幅度的提升，最高能达到 50%左右的提高，具有较大的潜力，也验证了模型的准确性。

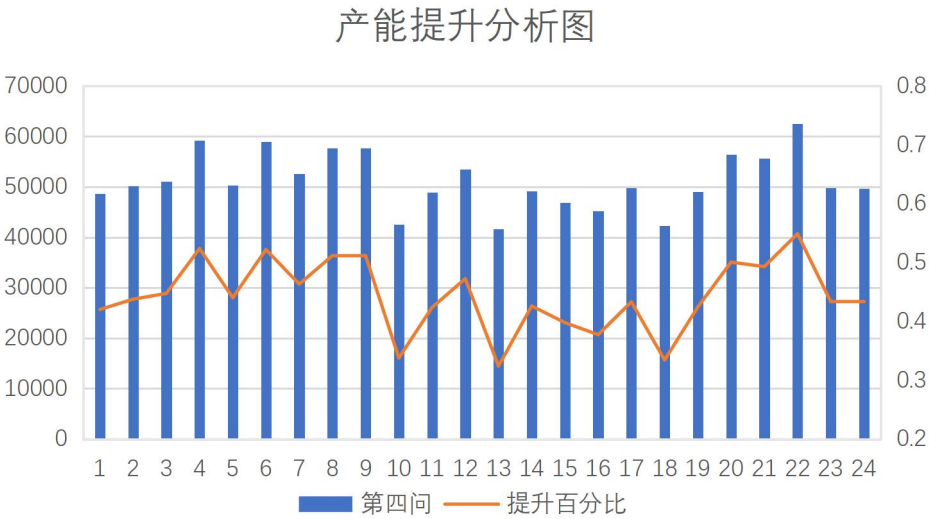


图 12：产能与产能提升情况

六、 模型的评价、改进与推广

6.1 模型的优点

(1) 问题一在对供应商评价的过程中, 一级指标选择供应商的供应能力、供应商与企业的合作关系和供应商未来的发展能力, 求得三个大方面的加权平均分数进行考核; 通过供应商的最大供货量、缺货量和供货稳定情况来评价供应能力, 通过供应商与企业的合作频数和单次平均交易量评价合作能力, 通过供应商合作潜力与供货潜力来评价发展潜力。建立的模型对供应商的分析具体全面, 评分和排序客观准确;

(2) 问题二中对未来值的预测根据具体数据和预测结果采用不同时预测模型。时间序列分析适用于根据历史数据的连续规律性预测未来发展趋势, 灰色预测模型适用于处理较少的特征值数据。通过选择时间序列分析预测发展中企业未来对原材料的需求量、灰色预测模型预测历史数据较少的供应商异常值出现情况, 使得预测结果更加准确有效;

(3) 在问题二中特殊考虑供应商出现异常值的情况: 当供应商出现缺货量较大的异常周数时企业停止向供应商下单, 提高了企业决策的经济性和效率;

(4) 在建立多目标 0-1 规划模型的过程中, 充分考虑企业对供应商和转运商的实际要求, 灵活设置约束条件, 分别对原材料供应商的选择、供应商供货方案的选择、对转运商运输方案的选择等做出优化决策。

6.2 模型的缺点

(1) 问题一中确定隶属度函数较为主观, 会使决策结果存在一定误差;

(2) 选择预测模型存在近似误差。

七、 参考文献

- [1]姜启源,谢金星,叶俊.数学模型[M].3 版.北京:高等教育出版社,2003
- [2]边利. 精益供应链的供应商评价选择及优化研究[D].中南大学,2006.
- [3]施海燕. 基于需求预测的 S 公司备件管理研究[D].华东理工大学,2013.
- [4]王莹. 基于 ANP 和多目标模型的供应商订购策略研究[D].哈尔滨工业大学,2013.

附录

附录 1
介绍: 支撑材料的文件列表
1. getIndicators.m 及其输入

2. calWeight.m 及其输入
3. pro2Optimization1.py 及其输入
4. pro2Optimization2.m 及其输入
5. pro2Optimization3.m 及其输入
6. pro2ShortPredict_GM11.py
7. pro2SupplyShortAnalysis.m 及其输入
8. pro3Optimization1.m 及其输入
9. pro3Optimization2.m 及其输入
10. pro4Optimization.m 及其输入
11. 第一问各项指标得分和权重
12. 第二问时间序列预测的 spss 数据和交互文件

附录 2 getIndicators.m

介绍：MATLAB 编写 用于从 附件 1 挖掘指标

```
clear all;clc
```

```
order = xlsread('order.xlsx');
supply = xlsread('supply.xlsx');
```

```
%% 表格预处理 - 缺失值检查
```

```
check1 = isnan(order); check1 = sum(sum(check1));
check2 = isnan(supply); check2 = sum(sum(check2));
```

```
supply_avgOfBiggest10 = zeros(402, 1);    %%每个供应商 240 周供应量前十取平均
supply_avgOfBiggest15 = zeros(402, 1);    %%每个供应商 240 周供应量前十取平均
supply_std = zeros(402, 1);               %%每个供应 商供货标准差
isCooperate = zeros(402, 240);            %%bool 矩阵, 判断某一周与某供应商是否合作
coop_weightedAvgOfCooperate = zeros(402, 1);%%每个供应商 后 3 年加权合作频数
coop_avgDealVolume = zeros(402, 1);       %%每个供应商 平均交易量
supply_Short = zeros(402, 1);             %%每个供应商 5 年内总缺货量
potential_coop = zeros(402, 1);           %%每个供应商 合作潜力
potential_supply = zeros(402, 1);         %%每个供应商 供货潜力
```

```
%% 下列循环 对象为 供货能力
```

```
for i = 1 : 402
```

```
    % 计算每个供应商 240 周供应量前十取平均
```

```
    tmp = sort (supply(i, :), 'descend');
    supply_sumOfBiggest10 = sum(tmp(1 : 10));
    supply_sumOfBiggest15 = sum(tmp(1 : 15));
    supply_avgOfBiggest10(i) = supply_sumOfBiggest10 / 10;
    supply_avgOfBiggest15(i) = supply_sumOfBiggest15 / 15;
    clear tmp, clear supply_sumOfBiggest10;
```

```
    % 计算 5 年内总缺货数量
```

```
    tmp = 0;
    for j = 1 : 240
        if (supply(i, j) >= order(i, j))
```

```

        tmp = tmp + 0;
    else
        tmp = tmp + abs(supply(i, j) - order(i, j));
    end
end
supply_Short(i) = supply_Short(i) + tmp;
clear tmp;

% 求方差
supply_std(i) = std(supply([supply(i, :) ~= 0]));
end

%% 计算 bool - 是否合作矩阵
for i = 1 : 402

    for j = 1 : 240
        if (supply(i, j) > 0 && order(i, j) > 0)
            isCooperate(i, j) = 1;
        end
    end
end

%% 下列循环 对象为 合作能力指标
for i = 1 : 402
    % 计算每个供应商 后 3 年加权合作频数
    coop_weightedAvgOfCooperate(i) = sum(isCooperate(i, 97 : 144)) * 0.2 + ...
        sum(isCooperate(i, 145 : 192)) * 0.3 + sum(isCooperate(i, 193 : 240)) * 0.5;

    % 计算每个供应商 平均交易量
    tmp = 0;
    for j = 1 : 240
        tmp = tmp + order(i, j) * isCooperate(i, j);
    end
    coop_avgDealVolume(i) = tmp / sum(isCooperate(i, :));
    clear tmp;
end

%% 下列循环 对象为 发展潜力指标
for i = 1 : 402
    % 计算每个供应商 合作潜力
    year4 = sum(isCooperate(i, 193 : 240)) / sum(isCooperate(i, 145 : 192));
    if sum(isCooperate(i, 145 : 192)) == 0
        year4 = sum(isCooperate(i, 193 : 240));
    end
    year5 = sum(isCooperate(i, 145 : 192)) / sum(isCooperate(i, 97 : 144));
    if sum(isCooperate(i, 97 : 144)) == 0
        year5 = sum(isCooperate(i, 145 : 192));
    end
end

```

```

potential_coop(i) = 0.5 * (year4 + year5);

% 计算每个供应商 供货潜力
year4 = sum(supply(i, 193 : 240)) / sum(supply(i, 145 : 192));
if sum(supply(i, 145 : 192)) == 0
    year4 = sum(supply(i, 193 : 240));
end
year5 = sum(supply(i, 145 : 192)) / sum(supply(i, 97 : 144));
if sum(supply(i, 97 : 144)) == 0
    year5 = sum(supply(i, 145 : 192));
end
potential_supply(i) = 0.5 * (year4 + year5);
clear year4, clear year5
end

```

附录3 calWeight.m

介绍：MATLAB 编写 用于隶属度计算获得指标，并用熵权法获得权重，总得分

```

clear all;clc
load indicators.mat
%% 二级指标
% 供货能力指标
supply_avgOfBiggest10 = C1(supply_avgOfBiggest10); % 最大供货量(前 10 平均)
supply_Short = C2(supply_Short); % 缺货量
supply_std = C3(supply_std); % 供货稳定性(标准差)

% 合作能力指标
coop_weightedAvgOfCooperate = C4(coop_weightedAvgOfCooperate); % 合作频数
coop_avgDealVolume = C5(coop_avgDealVolume); % 平均交易量

% 发展潜力
potential_coop = C6(potential_coop); % 合作潜力
potential_supply = C7(potential_supply); % 供货潜力

% 一级指标，由二级指标分别合并
supply_indic = [supply_std, supply_Short, supply_avgOfBiggest10];
coop_indic = [coop_weightedAvgOfCooperate, coop_avgDealVolume];
potential_indic = [potential_coop, potential_supply];

%% 计算二级权重
supply_w = entropy(supply_indic);
supply_w = real(supply_w)
coop_w = entropy(coop_indic)
potential_w = entropy(potential_indic)
%% 计算二级指标综合得分
supply_score = supply_indic * supply_w';
coop_score = coop_indic * coop_w';
potential_score = potential_indic * potential_w';

```

```

%% 计算一级指标权重
compreh_indic = [supply_score, coop_score, potential_score];
% compreh_weight = entropy(compreh_indic)
compreh_weight = [0.9136 0.7974 0.7049] / sum([0.9136 0.7974 0.7049]);

%% 计算总得分
total_score = compreh_indic * compreh_weight';

%% 倒序排序, 取出前 50 名
tmp = sort(total_score, "descend");
treshhold = tmp(50);
top50 = [];
for i = 1 : 402
    if total_score(i) >= treshhold
        top50 = [top50; i];
    end
end
supplyCapacity = zeros(50, 1);
realProductionCapacity = zeros(50, 1); %% ABC 类型归一化为能够生产的产品量
typeOfTop50 = zeros(50, 1);
scoreOfTop50 = zeros(50, 1);
load('indicators.mat', 'supply_avgOfBiggest10');
for i = 1 : 50
    typeOfTop50(i) = type(top50(i));
    % supplyCapacity(i) = supply_avgOfBiggest10(top50(i));
    % realProductionCapacity(i) = supplyCapacity(i) / typeOfTop50(i);
    supplyCapacity(i) = supply_avgOfBiggest15(top50(i));
    if supplyCapacity(i) > 6000
        supplyCapacity(i) = 6000;
    end
    realProductionCapacity(i) = supplyCapacity(i) / typeOfTop50(i);
    scoreOfTop50(i) = total_score(top50(i));
end

%% 以下为 各二级指标 隶属度函数
function [out] = C1(in) % 最大供货量
    out = zeros(402, 1);
    for i = 1 : 402
        if (in(i) <= 5)
            out(i) = 0;
        elseif in(i) <= 500
            out(i) = 1 / (500 * 495) * in(i) ^ 2 - 1 / (500 * 95) * in(i);
        else
            out(i) = 1;
        end
    end
end
end

```



```

function [out] = C2(in)% 缺货量
    out = zeros(402, 1);
    for i = 1 : 402
        if (in(i) <= 100)
            out(i) = 1;
        elseif in(i) <= 1000
            out(i) = (1000 - in(i)) / (1000 - 100);
        else
            out(i) = 0;
        end
    end
end

function [out] = C3(in) % 供货稳定性(标准差)
    out = zeros(402, 1);
    for i = 1 : 402
        if (in(i) <= 20)
            out(i) = 1;
        elseif in(i) <= 200
            out(i) = (200 - in(i)) / (200 - 20);
        else
            out(i) = 0;
        end
    end
end

function [out] = C4(in) % 合作频数
    out = zeros(402, 1);
    for i = 1 : 402
        if (in(i) <= 2)
            out(i) = 0;
        else
            out(i) = (in(i) - 2) / (48 - 2);
        end
    end
end

function [out] = C5(in) % 平均交易量
    out = zeros(402, 1);
    for i = 1 : 402
        if (in(i) <= 10)
            out(i) = 0;
        elseif in(i) <= 1000
            out(i) = 1 / (1000 * 990) * in(i) ^ 2 - 1 / (1000 * 99) * in(i);
        else
            out(i) = 1;
        end
    end
end

```

```

function [out] = C6(in) % 合作潜力
    out = zeros(402, 1);
    for i = 1 : 402
        if (in(i) <= 0.9)
            out(i) = 0;
        elseif in(i) <= 2
            out(i) = (in(i) - 0.9) / (2 - 0.9);
        else
            out(i) = 1;
        end
    end
end

function [out] = C7(in) % 供货潜力
    out = zeros(402, 1);
    for i = 1 : 402
        if (in(i) <= 0.2)
            out(i) = 0;
        elseif in(i) <= 15
            out(i) = (in(i) - 0.2) / (15 - 0.2);
        else
            out(i) = 1;
        end
    end
end

function [out] = entropy(in)
%% 计算熵权
    [n, m] = size(in);
    tmp = zeros(1, m); % 用于保存信息效用值
    for i = 1 : m
        x = in(:, i);
        p = x / sum(x);
        e = -sum(p .* mylog(p)) / log(n); % 计算信息熵
        tmp(i) = 1 - e; % 计算信息效用值
    end
    out = tmp ./ sum(tmp); % 信息效用值归一化
end

%% 防止计算 log 0 出现 NaN
function [out] = mylog(in)
    n = length(in);
    out = zeros(n, 1);
    for i = 1:n
        if in(i) == 0
            out(i) = 0;
        else
            out(i) = log(in(i));
        end
    end
end

```

```
end  
end
```

附录4 pro2Optimization1.py

介绍：Python 编写 多目标规划以选出 50 家供应商

```
from platypus import Problem, NSGAI, Constraint, Binary, nondominated, unique  
  
isSelected = 50    # 50 个供应商是否选择  
treshhold = 70000  #原未来 24 周预测最大值为 59695.72，为保证供货，改为 70000  
  
realProduct = [158.5555556,3161.759259,594.1414141,5.454545455,4.888888889,  
               1089.69697,845.5555556,12.92929293,6.111111111,1344.259259,  
               7380.887.3333333,3.222222222,3563.611111,1283.333333,  
               9090.909091,9090.909091,1504.222222,5429.537037,430.6666667,  
               753.3333333,8018.555556,615.1111111,857.1296296,13.98148148,  
               4278.333333,3.232323232,4.949494949,425.8333333,957.5,  
               398.3333333,1480.444444,2415.111111,786.111111,659,  
               1072.685185,8215.222222,2458.787879,1453.666667,3064.545455,  
               2502.323232,1548.888889,8162.888889,1059.222222,1851.574074,  
               3281.111111,705.7575758,498.7962963,4316.944444,5852.444444]  
score = [0.2766,0.3651,0.2809,0.2915,0.2743,0.3747,0.3350,0.3973,0.2911,0.3636,  
         0.6248,0.3660,0.3734,0.5516,0.4555,0.5133,0.6180,0.4093,0.6252,0.4389,  
         0.4151,0.8807,0.3328,0.4009,0.2582,0.6256,0.2733,0.3384,0.2534,0.4638,  
         0.4344,0.5034,0.5386,0.4269,0.3112,0.4582,0.4268,0.5232,0.4872,0.5021,  
         0.3687,0.5005,0.4662,0.4069,0.4506,0.6252,0.3738,0.2886,0.5504,0.5928]  
  
def pro2Opti1(x):  
    selection = x[0]  
    # 不等式约束函数  
    totalProduct = sum([realProduct[i] if selection[i] else 0 for i in range(isSelected)])  
    # 目标函数 2：选出供应商的总得分  
    totalScore = sum([score[i] if selection[i] else 0 for i in range(isSelected)])  
    # 目标函数 1：选出供应商的总供应量  
    cnt = -sum(selection)  
    return [cnt, totalScore], [totalProduct]  
  
problem = Problem(1, 2, 1)    # 两个目标函数，一个不等式约束  
problem.types[0] = Binary(isSelected)    # 变量类型为 2 进制  
problem.directions[0] = Problem.MAXIMIZE  
problem.constraints[0] = Constraint(">=", treshhold)    # 总供货量 >= 70000  
problem.function = pro2Opti1  
  
algorithm = NSGAI(problem)    # 使用 NSGAI 算法求解多目标线性规划  
algorithm.run(50000)  
  
for solution in unique(nondominated(algorithm.result)):    # 返回解集中的非支配解并且去重
```

```
print(solution.variables, solution.objectives)
```

附录5 pro2Optimization2.m

介绍：MATLAB 编写 线性规划计算优化订购方案 o 和供应情况 s

```
clear all; clc;
dev = dev1(); %% 均匀分布的随机数矩阵 11x24
load opti2Input

w = zeros(25, 1); %% 每一周的库存
o_opti = zeros(11, 24); %% 每一周的优化 order
s_opti = zeros(11, 24); %% 每一周的优化 supply
w(1) = 28200 * 2;
Q = []; %% 订货成本

%% 对 24 周循环 做线性规划
for i = 1 : 24
    A = [
        -1/0.72*0.99, -1/0.72*0.99, -1/0.66*0.99, ...
        -1/0.66*0.99, -1/0.66*0.99, -1/0.72*0.99, ...
        -1/0.6*0.99, -1/0.6*0.99, -1/0.6*0.99, -1/0.72*0.99, -1/0.6*0.99;
        1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
        0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
        0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0;
        0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0;
        0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0;
        0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0;
        0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0;
        0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0;
        0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0;
        0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0;
        0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1; ];
    b = [
        -(28200 * 2 + cap(i) - w(i));
        2276.47 + dev(1, i);
        967.87 + dev(2, i);
        4870.80 + dev(3, i);
        6000.00 + dev(4, i);
        6000.00 + dev(5, i);
        3909.27 + dev(6, i);
        4811.13 + dev(7, i);
        4929.13 + dev(8, i);
        4897.73 + dev(9, i);
        3108.20 + dev(10, i);
        3511.47 + dev(11, i); ];

    %% 等式约束 预测得到的缺货空窗期 不能订货
    Aeq = [
```

```

g(1, i), g(2, i), g(3, i), g(4, i), g(5, i), g(6, i), ...
g(7, i), g(8, i), g(9, i), g(10, i), g(11, i)
];

beq = [ 0];

lb = zeros(1, 11);

%% 目标函数:订购成本
goal = [
1, 1, 1.1, 1.1, 1.1, 1, 1.2, 1.2, 1.2, 1, 1.2 ];

% intcon = 1:8;
[o, fval] = linprog(goal, A, b, Aeq, beq, lb);
Q = [Q, fval];
o_opti(:, i) = o;

for j = 1 : 11
    s_opti(j, i) = o(j) - dev(j, i);
end

%% 更新库存
w(i + 1) = w(i) - 28200 + 1/0.72* ( o(1) - dev(1, i) )+ ...
1/0.72* ( o(2) - dev(2, i) )+1/0.66* ( o(3) - dev(3, i) )+...
1/0.66* ( o(4) - dev(4, i) )+1/0.66* ( o(5) - dev(5, i) )+...
1/0.72* ( o(6) - dev(6, i) )+1/0.6 * ( o(7) - dev(7, i) )+...
1/0.6 * ( o(8) - dev(8, i) )+1/0.6 * ( o(9) - dev(9, i) )+...
1/0.72* ( o(10) - dev(10, i) )+1/0.6 * ( o(11) - dev(11, i) );

end

o_opti = ceil(o_opti);
s_opti([s_opti < 15]) = 0;
s_opti = ceil(s_opti);
save('opti2Output.mat', 'Q', 'dev', 'o_opti', 's_opti', 'w');
function [out] = devi() %% 生成 order - supply 的随机误差
    out = zeros(11, 24);
    for i = 1 : 11
        for j = 1 : 24
            out(i, j) = -9 + 10 * rand(1); %% 随机误差范围[-9, 1]
        end
    end
end
end
end

```

附录6 pro2Optimization3.m

介绍：MATLAB 编写 整数线性规划计算优化转运方案

clc, clear;

```

load opti3Input
%% 第 w 周
w = 1;
attachBOut = [];

for w = 1 : 24
    sMat = [ s(1 ,w)*ones(1,8),s(2 ,w)*ones(1,8),s(3 ,w)*ones(1,8),s(4 ,w)*ones(1,8),s(5 ,w)*o
nes(1,8),...
            s(6 ,w)*ones(1,8),s(7 ,w)*ones(1,8),s(8 ,w)*ones(1,8),s(9 ,w)*ones(1,8),s(10 ,w)*ones
(1,8),];
    bMat = repmat(b(:,w)',1, 10);
    goal = sMat .* bMat ./ type;

    q1 = repmat([1 0 0 0 0 0 0 0], 1, 10);
    q2 = repmat([0 1 0 0 0 0 0 0], 1, 10);
    q3 = repmat([0 0 1 0 0 0 0 0], 1, 10);
    q4 = repmat([0 0 0 1 0 0 0 0], 1, 10);
    q5 = repmat([0 0 0 0 1 0 0 0], 1, 10);
    q6 = repmat([0 0 0 0 0 1 0 0], 1, 10);
    q7 = repmat([0 0 0 0 0 0 1 0], 1, 10);
    q8 = repmat([0 0 0 0 0 0 0 1], 1, 10);

    A = [
        sMat .* q1; sMat .* q2; sMat .* q3; sMat .* q4;
        sMat .* q5; sMat .* q6; sMat .* q7; sMat .* q8; ];
    B = [ 6000; 6000; 6000; 6000; 6000; 6000; 6000; 6000; ];

    Aeq=[
        [[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 9)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 1),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 8)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 2),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 7)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 3),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 6)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 4),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 5)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 5),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 4)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 6),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 3)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 7),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 2)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 8),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 1)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 9),[1 1 1 1 1 1 1 1]];
    ];

    beq = [ 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; ];

    intcon = 1:80;
    lb=zeros(1,80);
    ub=ones(1,80);
    [x,y]=intlinprog(goal,intcon,A, B,Aeq,beq,lb,ub);
    x = reshape(x,[8,10]),y ;
    sAtWeekW = s(:, w)';
    sAtWeekW = repmat(sAtWeekW, 8, 1);

```

```

attachBOut = [attachBOut, (sAtWeekW .* x)'];    %% 附件 B 的输出结果
end

% for j = 1 : 8 : 192
%   attachBOutput = [attachBOutput, sum(attachBOut(:, j : j + 7), 2)];
% end

```

附录 7 pro2ShortPredict_GM11.py

介绍：Python 编写 GM (1,1) 模型预测缺货时间

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# x 为缺货时间序列
x = [32,92,130,232]
stepRatio = []
for i in range(len(x)):
    if i == len(x) - 1:
        continue
    stepRatio.append(x[i] / x[i + 1]) # 计算级比
xCumSum = np.cumsum(x)
# 计算 GM(1,1)函数参数
B = np.array([-1 / 2 * (xCumSum[i] + xCumSum[i + 1]) for i in range(len(x) - 1)])
B = np.mat(np.vstack((B, np.ones((len(x) - 1,))))).T
Y = np.mat([x[i + 1] for i in range(len(x) - 1)]).T
t = np.dot(np.dot(B.T.dot(B).I, B.T), Y)
[a, b] = [t[0, 0], t[1, 0]]
aNew, b = x[0] - b / a, b / a

# 预测 3 周
week = 3
week += len(x)
xPredict = [x[0]]
xPredict = xPredict + [aNew * (np.exp(-a * i) - np.exp(-a * (i - 1))) for i in range(1, week)]
print(xPredict[:])
plt.plot(xPredict)
plt.xlabel('Out of stock at x th time')
plt.ylabel('Out at week y [mt]')
plt.show()

```

附录 8 pro2SupplyShortAnalysis.m

介绍：MATLAB 编写 用于从附件中提取缺货信息，得到 GM (1,1) 的输入并进行 JBTest,

```

clear all;clc;
load greyInput.mat

%% bool 11 个供应商 240 周 是否缺货矩阵
isLack = zeros(11, 240);

```

```

for i = 1 : 240
    for j = 1 : 11
        if raw(j, i) > 5000
            isLack(j, i) = 1;
        end
    end
end
end

s1 = isLack(1, :); s2 = isLack(2, :);
s3 = isLack(3, :); s4 = isLack(4, :);
s5 = isLack(5, :); s6 = isLack(6, :);
s7 = isLack(7, :); s8 = isLack(8, :);
s9 = isLack(9, :); s10 = isLack(10, :);
s11 = isLack(11, :);

%% 定位 8 个供应商的缺货周
shortWeek1 = find(s1); shortWeek2 = find(s2);
shortWeek3 = find(s3); shortWeek4 = find(s4);
shortWeek5 = find(s5); shortWeek6 = find(s6);
shortWeek7 = find(s7); shortWeek8 = find(s8);
shortWeek9 = find(s9); shortWeek10 = find(s10);
shortWeek11 = find(s11);

%% 筛出非缺货时期的 order - supply 值, 用于正态分布检验
normalWeek1 = getNormalWeek(raw(1, :), s1);
normalWeek2 = getNormalWeek(raw(2, :), s2);
normalWeek3 = getNormalWeek(raw(3, :), s3);
normalWeek4 = getNormalWeek(raw(4, :), s4);
normalWeek5 = getNormalWeek(raw(5, :), s5);
normalWeek6 = getNormalWeek(raw(6, :), s6);
normalWeek7 = getNormalWeek(raw(7, :), s7);
normalWeek8 = getNormalWeek(raw(8, :), s8);
normalWeek9 = getNormalWeek(raw(9, :), s9);
normalWeek10 = getNormalWeek(raw(10, :), s10);
normalWeek11 = getNormalWeek(raw(11, :), s11);

%% 样本数均大于 200, 用雅克-贝拉检验(JB 检验), 显著性水平 $\alpha=0.05$ 
h = zeros(11, 1); p = zeros(11, 1);
[h(1), p(1)] = jbtest(normalWeek1(:, 1), 0.05);
[h(2), p(2)] = jbtest(normalWeek2(:, 1), 0.05);
[h(3), p(3)] = jbtest(normalWeek3(:, 1), 0.05);
[h(4), p(4)] = jbtest(normalWeek4(:, 1), 0.05);
[h(5), p(5)] = jbtest(normalWeek5(:, 1), 0.05);
[h(6), p(6)] = jbtest(normalWeek6(:, 1), 0.05);
[h(7), p(7)] = jbtest(normalWeek7(:, 1), 0.05);
[h(8), p(8)] = jbtest(normalWeek8(:, 1), 0.05);
[h(9), p(9)] = jbtest(normalWeek9(:, 1), 0.05);
[h(10), p(10)] = jbtest(normalWeek10(:, 1), 0.05);
[h(11), p(11)] = jbtest(normalWeek11(:, 1), 0.05);

```



```

%% h 值全部为 1, 拒绝原假设, 不服从正态分布, 随机值采用平均分布随机数
devi = -9 + (10) * rand(1);

```

```

%% 函数 : 获取非缺货时期的 order - supply 值

```

```

function [out] = getNormalWeek(in, judge)
    out = [];
    for i = 1 : 240
        if judge(i) == 0
            out = [out ; in(i)];
        end
    end
end
end

```

附录 9 pro3OPTimization1.m

介绍：MATLAB 编写 线性规划计算优化订购方案 o 和供应情况 s

```

clear all; clc;
dev = devi();
load opti1Input

w = zeros(25, 1);
o_opti = zeros(11, 24); %% 附件 A 输出
s_opti = zeros(11, 24);
cost = []; %% 成本
w(1) = 28200 * 2;

%% 对 24 周循环 做非线性规划
for i = 1 : 24
    A = [
        -1/0.72*0.99, -1/0.72*0.99, -1/0.66*0.99, ...
        -1/0.66*0.99, -1/0.66*0.99, -1/0.72*0.99, ...
        -1/0.6*0.99, -1/0.6*0.99, -1/0.6*0.99, -1/0.72*0.99, -1/0.6*0.99;
        1,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
        0,1,0,0,0,0,0,0,0,0;
        0,0,1,0,0,0,0,0,0,0;
        0,0,0,1,0,0,0,0,0,0;
        0,0,0,0,1,0,0,0,0,0;
        0,0,0,0,0,1,0,0,0,0;
        0,0,0,0,0,0,1,0,0,0;
        0,0,0,0,0,0,0,1,0,0;
        0,0,0,0,0,0,0,0,1,0;
        0,0,0,0,0,0,0,0,0,1;
        1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0;
        0,0,0,0,0,0,-1,-1,-1,0,-1;
    ];

```

```

b = [
    -(28200*2+cap(i)-w(i));
    2276.47 + dev(1, i);
    967.87 + dev(2, i);
    4870.80 + dev(3, i);
    6000.00 + dev(4, i);
    6000.00 + dev(5, i);
    3909.27 + dev(6, i);
    4811.13 + dev(7, i);
    4929.13 + dev(8, i);
    4897.73 + dev(9, i);
    3108.20 + dev(10, i);
    3511.47 + dev(11, i);
    con1(i);
    -con2(i);
];

%% 等式约束 预测得到的缺货空窗期 不能订货
Aeq = [
    g(1, i), g(2, i), g(3, i), g(4, i), g(5, i), g(6, i), ...
    g(7, i), g(8, i), g(9, i), g(10, i), g(11, i);
    0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
];

beq = [
    0; 0;
];

lb = zeros(1, 11);
% intcon = 1:8;
option = optimoptions(@fmincon, 'TolX', 1e-4, 'TolFun', 1e-2);
[o,fval] = fmincon(@goal, rand(11, 1), A, b, Aeq, beq, lb, [], [], option);

o_opti(:, i) = o;
cost = [cost, o(1)+o(2)+1.1*o(3)+1.1*o(4)+1.1*o(5)+o(6)+1.2*o(7)+1.2*o(8)+1.2*o(9)+o(10)+1.2*o(11)];

for j = 1 : 11
    s_opti(j, i) = o(j) - dev(j, i);
end

%% 更新库存
w(i + 1) = w(i) - 28200 + 1/0.72* ( o(1) - dev(1, i) )+ ...
1/0.72* ( o(2) - dev(2, i) )+1/0.66* ( o(3) - dev(3, i) )+...
1/0.66* ( o(4) - dev(4, i) )+1/0.66* ( o(5) - dev(5, i) )+...
1/0.72* ( o(6) - dev(6, i) )+1/0.6 * ( o(7) - dev(7, i) )+...
1/0.6 * ( o(8) - dev(8, i) )+1/0.6 * ( o(9) - dev(9, i) )+...
1/0.72* ( o(10) - dev(10, i) )+1/0.6 * ( o(11) - dev(11, i) );

```

```

end

o_opti([o_opti < 15]) = 0;
o_opti = ceil(o_opti);
s_opti([s_opti < 15]) = 0;
s_opti = ceil(s_opti);
save('opti1Output.mat','cost','o_opti','s_opti');
function [out] = devi()    %% 生成 order - supply 的随机误差
    out = zeros(11, 24);
    for i = 1 : 11
        for j = 1 : 24
            out(i, j) = -9 + 10 * rand(1); %% 随机误差范围[-9, 1]
        end
    end
end

function out = goal(o)
    load opti1Input
    global w;
    %% C 少 A 多指标 indic1
    indic1 = 0;
    indic1 = indic1 + (o(1)+o(2)+o(6)+o(10)) / (o(7)+o(8)+o(9)+o(11));
    %% 成本指标 indic2
    indic2 = o(1)+o(2)+1.1*o(3)+1.1*o(4)+1.1*o(5)+o(6)+1.2*o(7)+1.2*o(8)+1.2*o(9)+o(10)+1.2*o(11);
    indic2 = indic2 / 21260.15745;
    %% 两者权重为 0.25 : 0.75
    out = 0.2 * indic1 + 0.8 * indic2;
end

```

附录 10 pro3Optimization2.m

介绍：MATLAB 编写 整数线性规划计算优化转运方案

```

clc, clear;
load opti2Input
%% 第 w 周
global w;
attachBOut = [];
for w = 1 : 24
    sMat = [ s(1 ,w)*ones(1,8),s(2 ,w)*ones(1,8),s(3 ,w)*ones(1,8),s(4 ,w)*ones(1,8),s(5 ,w)*ones(1,8),...
            s(6 ,w)*ones(1,8),s(7 ,w)*ones(1,8),s(8 ,w)*ones(1,8),s(9 ,w)*ones(1,8),s(10 ,w)*ones(1,8),];
    bMat = repmat(b(:,w)',1, 10);
    goal = sMat .* bMat ./ type;
end

```

```

q1 = repmat([1 0 0 0 0 0 0 0], 1, 10);
q2 = repmat([0 1 0 0 0 0 0 0], 1, 10);
q3 = repmat([0 0 1 0 0 0 0 0], 1, 10);
q4 = repmat([0 0 0 1 0 0 0 0], 1, 10);
q5 = repmat([0 0 0 0 1 0 0 0], 1, 10);
q6 = repmat([0 0 0 0 0 1 0 0], 1, 10);
q7 = repmat([0 0 0 0 0 0 1 0], 1, 10);
q8 = repmat([0 0 0 0 0 0 0 1], 1, 10);

A = [
sMat .* q1; sMat .* q2; sMat .* q3; sMat .* q4;
sMat .* q5; sMat .* q6; sMat .* q7; sMat .* q8;
];
B = [
6000; 6000; 6000; 6000;
6000; 6000; 6000; 6000; ];

Aeq=[
[[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 9)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 1),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 8)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 2),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 7)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 3),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 6)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 4),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 5)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 5),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 4)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 6),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 3)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 7),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 2)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 8),[1 1 1 1 1 1 1 1],repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 1)];
[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 9),[1 1 1 1 1 1 1 1]];
];

beq = [
1; 1; 1; 1; 1;
1; 1; 1; 1; 1;];

intcon = 1:80;
lb=zeros(1,80);
ub=ones(1,80);
[x,y]=intlinprog(goal,intcon,A, B,Aeq,beq,lb,ub);
x = reshape(x,[8,10]),y ;

sAtWeekW = s(:, w)';
sAtWeekW = repmat(sAtWeekW, 8, 1);
attachBOut = [attachBOut, (sAtWeekW .* x)'];    %% 附件 B 的输出结果
end

```

附录 11 pro4Optimization.m

介绍：MATLAB 编写 遗传算法计算非线性整数规划，得到优化订购方案 o 和转运方案 q

```

clear all; clc;
load pro4OptilInput

global i;
attachBOut = [];    %% 附件 B 的输出
attachAOut = [];    %% 附件 A 的输出
productVolume = []; %% 产能

%% 对 24 周循环 做整数非线性规划
for i = 1 : 24
    %% 不等式约束 MATLAB 遗传算法不能同时限制整数和等式约束,...因此用 a<=1&&-a<=-
    1 来表示 a==1
    A = [
        % 预测得到的缺货空窗期 不能订货
        zeros(1, 8 * 11), g(1, i), g(2, i), g(3, i), g(4, i), g(5, i), g(6, i), ...
        g(7, i), g(8, i), g(9, i), g(10, i), g(11, i);
        % 每个供应商都有且仅有 1 家 转运商负责转运
        [[1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 10), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 1), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 9), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 2), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 8), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 3), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 7), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 4), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 6), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 5), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 5), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 6), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 4), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 7), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 3), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 8), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 2), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 9), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 1), zeros(1, 11)];
        [repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 10), [1 1 1 1 1 1 1 1], zeros(1, 11)];
        %% 以下为上面不等式的对称部分
        -[zeros(1, 8 * 11), g(1, i), g(2, i), g(3, i), g(4, i), g(5, i), g(6, i), ...
        g(7, i), g(8, i), g(9, i), g(10, i), g(11, i)];

        -[[1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 10), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 1), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 9), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 2), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 8), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 3), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 7), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 4), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 6), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 5), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 5), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 6), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 4), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 7), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 3), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 8), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 2), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 9), [1 1 1 1 1 1 1 1], repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 1), zeros(1, 11)];
        -[repmat([0 0 0 0 0 0 0 0], 1, 10), [1 1 1 1 1 1 1 1], zeros(1, 11)];
    ];

    B = [    0; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1;
           0; -1; -1; -1; -1; -1; -1; -1; -1; -1; -1; -1;];

    %% 决策变量 : x = 8(转运商) * 11(供应商)的指派矩阵 q + 11 个供应商的供货量 o

```

```

lb = zeros(1, 8 * 11 + 11);
% 上界: q 的上界为 1, o 的上界为供应商最大供货量排名前 15 周的平均值
ub = [ones(1, 88), [2276.47, 967.87, 4870.80, 6000.00, 6000.00, 3909.27, 4811.13, 4929.13, 489
7.73, 3108.20, 3511.47]];

intcon = 1 : 99;
option = optimoptions(@ga, 'Generations', 150);
[x,fval] = ga(@goal, 99, A, B, [], [], lb, ub, @nonlcon, intcon);
q = reshape(x(1 : 88), [8, 11]); %% 将 q 还原成 8 x 11 便于观察
oMat = x(89 : 99);
oMat = repmat(oMat, 8, 1);
attachBOut = [attachBOut, (oMat .* q)]; %% 附件 B 的输出结果
productVolume = [productVolume, fval]; %% 每周的总产量

end
for j = 1 : 8 : 192
    attachAOut = [attachAOut, sum(attachBOut(:, j : j + 7), 2)];
end

%% 第四问的非线性约束 - 转运商转运量总和 <= 6000
function [c,ceq]=nonlcon(x)
    o = x(89 : 99); %% 截取决策变量 o 矩阵为 11 x 1 列矩阵
    q = x(1 : 88); %% 截取决策变量 q 矩阵为 88 x 1 列矩阵
    o = o(:);
    q = reshape(q, [8, 11]); %% 将 q 转成 8 x 11 矩阵
    c(1) = q(1, :) * o - 6000; %% 每个转运商转运量总和 <= 6000
    c(2) = q(2, :) * o - 6000;
    c(3) = q(3, :) * o - 6000;
    c(4) = q(4, :) * o - 6000;
    c(5) = q(5, :) * o - 6000;
    c(6) = q(6, :) * o - 6000;
    c(7) = q(7, :) * o - 6000;
    c(8) = q(8, :) * o - 6000;
    ceq = [];
end

%% 适应度(目标)函数含义为 考虑供应商转运商损耗率后的产量
function out = goal(x)
    global i;
    load pro4OptInput;
    bb = 1 - b(:, i); %% bb 为接受率
    out = 0;
    o = x(89 : 99); %% 截取决策变量 o 矩阵为 11 x 1 列矩阵
    o = o(:);
    q = x(1 : 88); %% 截取决策变量 q 矩阵为 88 x 1 列矩阵
    q = q(:);
    q = reshape(q, [8, 11]); %% 将 q 转成 8 x 11 矩阵
    o = o ./ t; %% ABC 供货量归一化为成品量
    tmp = q * o; %% 含义: 每个转运商运输的总产品量

```

```
    out = -bb * tmp; %% 添符号取最大值  
end
```