

## 减少饥饿,增加和平 概括

今天,世界粮食系统在生产和分配粮食方面是高效和有利可图的,但它在粮食公平和可持续性方面表现不佳。具体来说,世界上还有相当数量的饥饿人口,对生态系统的破坏不容忽视。因此,良好的食物系统的创建和优化值得我们关注。

首先,我们建立了一个食物系统模型。我们将食品系统抽象为生产、运输和销售三个环节,分别建立模型。在食品生产过程模型中,我们考虑了食品的各种来源,并对食品的生产进行了量化。

同时,我们在修正量的基础上,参照生产热量换算,对食物中的热量进行了量化。在食品运输过程模型中,我们定义了生活区的概念,并计算了运输者的利润。然后基于利润优化驱动的运输选择算法,分配运输的食物。在食品销售过程模型中,我们使用供需微分方程来衡量波动的食品价格。考虑到个人收入的差异,我们基于人的食物选择算法模拟了每个人购买食物的情况,并根据购买食物中所含的卡路里来判断他们的饥饿情况。

然后,我们确定了评估我们的食物系统的指标。根据食品生产中生产造成的生态污染,我们选择了排放量、土地资源使用量、水资源使用量三个指标。我们使用熵值法确定权重来量化可持续性指标。

$CO_2$

$$W = [0.5213, 0.2511, 0.2276]$$

根据销售过程模型中饥饿人群的比例,我们建立了权益指标。根据粮食系统中的三个模型,我们建立了农民和运输者收入的效率指标。

为了确定食品系统如何针对公平和可持续性进行优化,我们定义了一个非线性规划优化模型。我们使用 Matlab 进行模拟,并使用遗传算法来寻找近似最优解。

结果表明,当公平和可持续优化努力相同时,法国将在43个月内完成优化目标。耕地面积减少6.7%,减少饥饿人口3万人;而印度将在37个月内完成优化目标,耕地面积将增加11.1%,饥饿人口将减少3910万。豆类的特点是热量高,种植面积增加。同时,我们在优化模型中逐渐增加了可持续性相对于公平的优先级。我们发现印度和法国的成本在增加,收益在减少。对于特定的优先级,India的成本增加率和收益减少率都低于优化前的法国。我们进一步将我们的模型应用到其余 10 个发达国家和发展中国家,验证了这一结论。

最后,我们讨论了较大食物系统和较小食物系统的迁移。我们相信我们的模型可以有效地应用于较小的食物系统,但它在更大的食物系统中的应用受到不同国家政策的限制。此外,我们将模型移至另一个国家 索马里,并根据具体情况进行修正。

关键词:食物系统;非线性规划;供需微分方程

## 内容

1 简介 .....	4
1.1 问题背景 .....	4
1.2 问题重述.....	4
1.3 我们的工作.....	4
2 假设和理由.....	6
3 符号.....	6
4 模型一:食品生产过程模型.....	7
4.1 食品生产来源分析模型.....	7
4.1.1 种植来源.....	7
4.1.2 畜牧资源.....	7
4.1.3 渔业资源 .....	8
4.2 基于校正的食物热量模型.....	8
5 模型 II :食品运输过程模型 .....	9
5.1 型号介绍.....	9
5.2 运营商利润的计算.....	10
5.2.1 承运人总成本的计算.....	10
5.2.2 承运人总收入的计算.....	11
5.3 利润优化驱动的运输选择算法.....	11
6 模型三 :基于市场价格的食物销售过程模型 .....	12
6.1 食品价格波动模型.....	12
6.2 人们的食品支出.....	13
6.3 人的食物选择算法.....	13
7 指标定义 .....	14
7.1 可持续性指标.....	14
7.1.1 指标选择.....	14
7.1.2 熵值法确定指标权重 .....	14
7.2 净值指标.....	15
7.3 盈利指标.....	15
8 案例研究:印度和法国.....	15
8.1 国家现行粮食体系评价 .....	16
8.1.1 模型 I 结果 .....	16
8.1.2 模型 II 的结果.....	17
8.1.3 模型 III 的结果.....	17

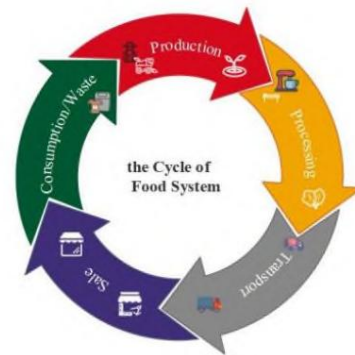
---

8.2 优化公平和可持续性.....	18	8.2.1
基于多目标规划的优化模型.....	18	8.2.2 优化结
果.....	19	
8.3 政策建议.....	23	
9 可扩展性和适应性分析.....	23	
10 模型评估.....	24	
10.1 优势.....	24	
10.2 弱点.....	24	
11 结论 .....	24	
参考 .....	25	

## 1 简介

### 1.1 问题背景

食物系统可以定义为参与特定人群食物生产和消费的一整套人员、机构、活动、过程和基础设施[1][2]。具体而言,它包括与粮食系统相关的种植、收获、加工、包装、运输和营销活动,以及活动链中每个步骤所需的任何投入,例如土地、农药、劳动力、水、机械、资本) 出图1:食物系统的循环放。



大多数当前的国家粮食系统优先考虑效率和盈利能力,这使得粮食生产和分配相对便宜和有效。然而,联合国估计全球约有8.21亿饥饿人口[3],这意味着我们在面对粮食系统时,将不得不考虑经济以外的更多因素。森林面积与粮食种植面积的平衡、粮食运输和分配过程中的公平考量、粮食浪费等问题,都与粮食系统的细节有关。如何进一步改善粮食系统及其满足最贫困人口需求的能力,以及如何平衡粮食系统的各个方面,这些都是具有挑战性但值得努力的。

### 1.2 问题重述

考虑到问题陈述中确定的背景信息和限制条件,我们需要解决以下问题: 问题 1:建立国家粮食系统模型,以便评估粮食系统的效率、盈利能力、可持续性和公平性。 问题 2:至少将已建立的食品系统模型应用到发达国家和发展中国家中的一个。如果食品系统针对公平和可持续性进行了优化,上述系统会发生什么情况以及实施需要多长时间。 问题 3:讨论改变食品系统优先顺序的收益和成本,

并分析变化的时间。 问题 4:讨论食物系统模型的可扩展性和适应性。

### 1.3 我们的工作

在1.2中,我们确定了四个需要通过problem来解决的问题  
声明。为了解决这些问题,我们的工作主要包括以下内容: 基于对食品系统的理解和定义,我们确定了其主要的三个组成部分:生产、运输和销售。对于生产部分,我们通过定义食物的生产来源,建立了食物的生产模型和热量模型。为了

运输部分,我们为运输商建立了盈利模式。基于每种食品的产量,评估运输商在不同区域的运输策略的利润,按照利润最优的原则进行食品的运输。对于销售部分,我们建立了食品供求关系的价格波动模型。供应来自一些运输商的运输,需求取决于当地人口和食品价格。然后,以个人工资收入为基础,建立了群众卖菜模式。根据人们从食物中获取的卡路里来衡量饥饿人口。在三个具体模型中,我们抽象出指标来评价我们模型的好坏。首先,我们针对生产环节因生产造成的生态污染,制定了可持续指标。然后根据销售部分的饥饿人数,我们建立了权益指标。最后,在生产和运输销售部分,我们以农民和运输商的收入来建立效率指标。我们使用这三个指标来评估我们的食品系统。

我们选择了印度和法国作为我们的案例研究。我们首先将这两个国家的一些具体数据代入我们的粮食系统模型,得到粮食生产、粮食分配、饥饿人口等数据。然后,我们将公平指标和可持续指标的加权值作为目标函数来规划目标。我们分析了系统发生了什么,优化前后系统的差异,以及我们使用两个指标的权重各减半所花费的时间。我们用两个指标权重从0变为1,即改变公平性和可持续性的优先级,得到粮食系统的收益和成本以及何时发生。我们讨论了在较大的食物系统和较小的食物系统上的模型迁移。我们将我们的模型迁移到其他国家以验证我们模型的适应性。

综上所述,整个建模过程可以表示如下:

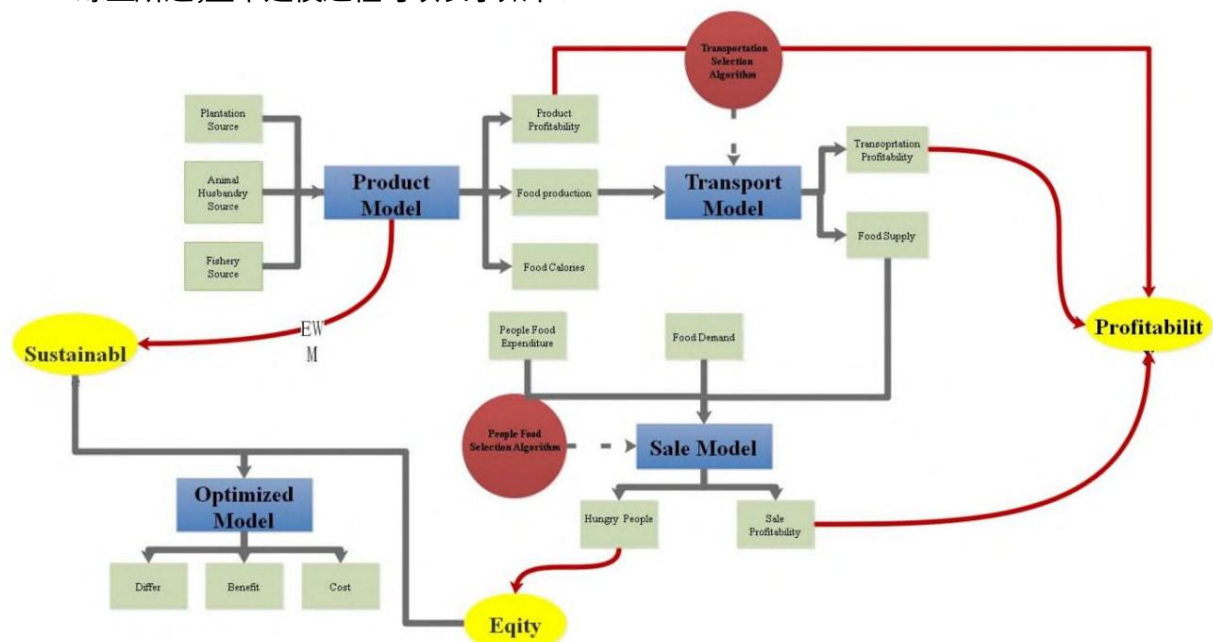


图 2:模型概览

2 假设和理由

假设 1:在食品运输过程模型中,划定生活区以考虑食品运输场景。

理由:考虑到一个国家可能有数以万计的粮食运输者和粮食产地,对每个运输者和每个产地都建模是不现实的。我们假设食物在同一个生活区域内的运输成本为0,同时我们将一个生活区域内的所有运输机抽象为一个运输机。

假设2:同月同种食品市场价格不变。

理由:虽然食品价格遵循供求关系,会受到需求的影响,但时间单位太小会使模型难以量化和估计。同时,考虑到人们的实际生活,市场上同一种食品的价格在一段时间内保持稳定,因此考虑食品价格在月时间尺度上发生变化是合理的。

假设三:假设研究数据真实可靠。

理由:我们假设模型构建和情景模拟所需的国家统计局数据真实可靠。基于此,我们可以模拟更多的真实场景,建立合理的模型。

3 符号

本文中使用的关键数学符号如表 1 所示。

表1:本文中使用的符号描述了该地区当月的粮			
象征	食总产量该地区当月		
$P_{i,t}^p$	的种植园总产量。全区当月畜牧业总产量。该地区当月渔业总产量。 $t$		
$A_{i,t}$	运输商在该地区购买和销售食物的利润		$t$
$B_{i,t}$	$i$		$t$
$C_{i,t}$	$i$		$t$
$TP_{i_1,i_2,t}$	一个月内该地区的食物		$i_1$ $t$
$supply_{i,t}^p$	居住区市场当月第p种食品供应量		$i$ $t$
$demand_{i,t}^p$	居住区月第 p 种食物的需求量。		$i$ $t$
$Sustainable_t$	一个国家当月的可持续性指标 该国当月的公平指标 该国当月 $t$		
$Eqity_t$	的利润指标		$t$
$Profit_t$			

## 4 模型 I :食品生产过程模型

### 4.1 食品生产来源分析模型

在建立食品生产过程模型之前,我们需要了解食品的分类和分布。参考维基百科,一个国家粮食系统的食物来源包括种植业来源、畜牧业来源和渔业来源,这也符合世界上大多数人的食物来源。据此,我们利用上述三种来源构建粮食生产来源分析模型,如图3所示。

在我们的模型中,我们将定义该地区当月的粮食生产总量,以及该国的粮食生产总量,定义如下:

$$P_t$$

$$P_{i,t} = A_{i,t} + B_{i,t} + C_{i,t}$$

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_{i,t}$$

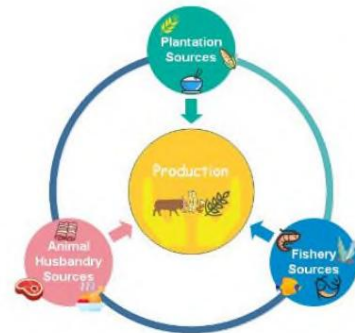


图 3:食物来源构成图代表该地区一个月的种植总

在哪里

$A_{i,t}$  产量。代表该地区当月的畜牧业总产量。代表该地区当月的渔业总产量。

$B_{i,t}$

$i$

$t$

$C_{i,t}$

$i$

$t$

$n$  代表全国的地区总数。

#### 4.1.1 种植来源

种植业是农业的主要组成部分之一。是种植各种农作物,获取植物产品的农业生产部门。种植业种植的农作物包括粮食作物、经济作物、蔬菜作物、饲料作物、牧草、花卉等植物的生产。在这里,考虑到世界上大多数发展中国家,如中国、印度和东南亚国家,人们的主要食物来源是种植业中的粮食作物。我们只考虑种植业的粮食作物产量,定义种植业的粮食总产量为

$A_{i,t}$  在区域中月份如下:

$t$

$$A_{i,t} = \sum_{p=1}^n Yield_{i,t}^p Area_{i,t}^p \quad (1)$$

在哪里

$Yield_{i,t}^p$  表示月内区域第  $p$  种作物的单位面积产量。表示该地区第  $p$  个作物在月份的种植面积

$Area_{i,t}^p$  积。代表种植业中粮食作物的种类总数。

$i$

$t$

$n$

#### 4.1.2 畜牧业来源畜牧业也是重要的食物

来源之一。它主要包括饲养动物以获得它们的肉、纤维、奶、蛋或其他产品。主要分布在一些

南美、大平原、澳大利亚等适宜土地较多的地方。这里,我们只考虑畜牧业的肉、蛋、奶作为食物来源。我们将畜牧业的粮食总产量定义为

$B_{i,t}$  在区域中月份如下:  $t$

$$B_{i,t} = \sum_{p=1}^n (Meat_{i,t}^p + Milk_{i,t}^p + Egg_{i,t}^p) Num_{i,t}^p$$

(2)

在哪里

$Meat_{i,t}^p$  表示该地区第  $p$  个动物在月份的单位肉类产量。表示该地区第  $p$  头动物在月份的单位产奶量。

$Milk_{i,t}^p$  代表区域中第  $p$  个动物在月份的单位产蛋量。表示该区域第  $p$  个动物在月份的繁殖次数。  $t$

$Egg_{i,t}^p$   $i$   $t$

$Num_{i,t}^p$   $i$   $t$

$n$  代表畜牧业饲养的动物种类总数。

4.1.3 渔业资源渔业是大

多数沿海国家和湖泊丰富国家的重要食物来源。

在一些北欧国家,如冰岛和挪威,由于纬度过高,气温不适宜发展种植业,渔业成为最重要的食物来源之一。主要包括通过水产养殖捕捞鱼类。我们将渔业总产量按区域定义如下:

$C_{i,t}$   $i$   $t$

$$C_{i,t} = \sum_{p=1}^n Fish_{i,t}^p FishArea_{i,t}^p$$

(3)

在哪里

$Fish_{i,t}^p$  表示 月 区域中第  $p$  条鱼的单位鱼产量。  $i$   $t$

$FishArea_{i,j}$  表示 月 区域第  $p$  条鱼的养殖面积。  $i$   $t$

$n$  代表渔业饲养的鱼类总数。

4.2 基于校正的食物热量模型

在4.1建立的模型中,我们考虑了不同作物或动物的产出。

该生产模型将用于后续的运输和销售模型。同时,在衡量人的饥饿感时,不仅要考虑食物摄入总量,还要考虑食物的卡路里摄入量。如表1所示,100克米饭和100克牛肉可以提供不同的热量。因此,我们基于生产的模型有一定的局限性。

为此,我们决定根据卡路里属性修改上述模型。

我们定义校正来衡量不同类型食物的卡路里差异。

本文以每100克大米的热量为基准值1,与其他农作物或动物的热量进行比较和衡量。我们得到了所有食物每单位热量所含热量的相对值如下:表2 不同种类食物的热量及比例Food Type Rice Maize Sorghum Chicken Beef

热量[kJ·(100g)−1]	1450.5	$\lambda$
1463		1.008617718
1724.6		1.188969321
489		0.337125129
1628.29		1.122571527



猪肉	1883.6	1.298586694
鲢鱼	435.32	0.300117201
虾	389.28	0.268376422

经过卡路里校正后,我们可以得到总卡路里模型公式:

$$\left\{\begin{aligned}\hat{P}_{i,t} &= \hat{A}_{i,t} + \hat{B}_{i,t} + \hat{C}_{i,t} \\ \hat{A}_{i,t} &= \sum_{p=1}^n Yield_{i,t}^p Area_{i,t}^p \lambda_1^p C \\ \hat{B}_{i,t} &= \sum_{p=1}^n (Meat_{i,t}^p \lambda_2^p C + Milk_{i,t}^p \lambda_3^p C + Egg_{i,t}^p \lambda_4^p C) Num_{i,t}^p \\ \hat{C}_{i,t} &= \sum_{p=1}^n Fish_{i,t}^p FishArea_{i,t}^p \lambda_5^p C\end{aligned}\right.$$

在哪里

$\hat{P}_{i,t}$  代表该地区当月生产的食物的总热量。表示该地区种植业在一个月中产  
 $\hat{A}_{i,t}$  生的总热量。代表该地区畜牧业生产的总热量  $i$   $t$   
 $\hat{B}_{i,t}$   $i$   
月内。  $t$   
 $\hat{C}_{i,t}$  表示当月该地区渔业生产的总热量。  $i$   $t$   
 $C$  代表每100克大米的热量值。表示校正量  
 $\lambda$

5 模型 II :食品运输过程模型

5.1 模型介绍

在食物系统中,运输是重新分配食物的重要方式。我们必须承认,粮食生产在不同的国家是不公平的,即使是在同一国家的不同地区也是如此。以日本为例,其大部分人口集中在东京及周边地区等国内经济发达地区。然而,作为日本主要粮食作物的水稻主要集中在北海道等北部沿海地区。

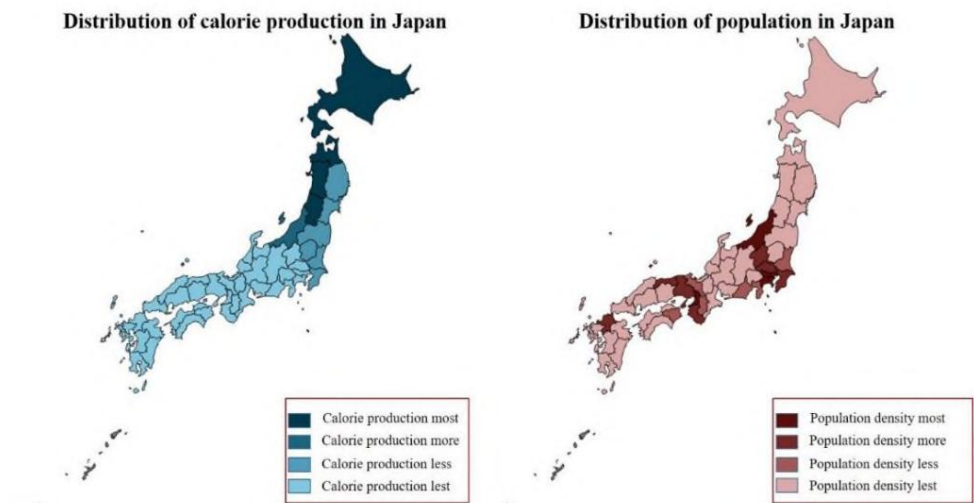


图4:日本热量生产与人口密度对比

考虑到经济效益和市场的影响,国家和地区粮食生产空间的不均衡与人口分布的不均衡并不对应,势必造成大量的粮食生产重新分配。

基于这个思路,我们在这里定义食品运输过程模型。

5.2 承运人利润的计算

在实际问题中,食物的运输是由食物运输者完成的。即粮食运输商从生产者（农民）手中购买粮食,然后运到其他地方销售。

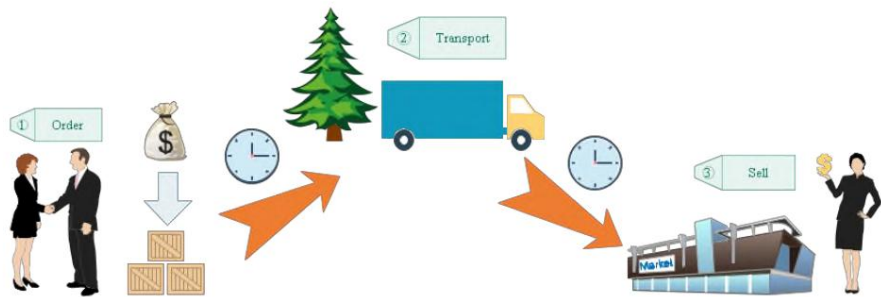


图 5 :运输流程图根据实际情况,运输商

在运输过程中的总成本应包括运费和从制造商处购买货物的价格,总收入取决于食品在运输过程中的售价每个区域市场。

5.2.1承运人总成本的计算

跨地区运输时,运输商会产生一定的运费。它应该包括运输燃料成本和人工成本。我们假设燃料成本与运输距离成正比,也应该与运输货物的重量成正比。人工成本与运输时间成正比。我们忽略了运输途中可能出现的堵车和交通事故,认为运输时间也与运输距离成正比。综上,运费可以定义如下

$$SC_{i_1,i_2} = k_1 w l_{i_1,i_2} + k_2 l_{i_1,i_2} \tag{4}$$

在哪里

$SC_{i_1,i_2}$  代表区域到区域的运费。 $i_1$   $i_2$   
 $w$  表示运输货物的重量。表示燃料成本与运输距离  
 $k_1$  和货物重量的比例系数。表示单位距离运输所需的人工成本。表示区域到区域的运输距离。  
 $k_2$   
 $l_{i_1,i_2}$   $i_1$   $i_2$

### 5.2.2 承运人总收入的计算

我们首先计算一次运输货物的运输商的收购成本。一般来说,运输车一次只运输一种货物,采集量等于4.1型号的生产量。因此,我们的采购成本定义了单一食品的采购成本。

$$AC_{i,t} = \sum_{p=1}^n P_{i,t}^p \rho_{i,t}^p ac_{i,t}^p \quad (5)$$

在哪里

$AC_{i,t}$  表示 月 地区采购货物的采购成本。代表该地区当月生产粮食的收购比例 .. 代表第p种粮食收购成本  $\rho_{i,t}^p$  的单价。

$ac_{i,t}^p$

$n$  代表食物种类的总数。

那么,我们计算运输车的销售收入如下图:

$$QB_{i,t} = \sum_{p=1}^n Q_{i,t}^p qb_{i,t}^p \quad (6)$$

在哪里

$Q_{i,t}^p$  代表该地区第p种食品月销量 .. 代表该地区第p种食品月销售价格。(具体定义见模型III)

$qb_{i,t}^p$

那么承运人一次运输的总利润为

$$TP_{i_1, i_2, t} = QB_{i_2, t} - AC_{i_1, t} - SS_{i_1, i_2} \quad (7)$$

在哪里

$TP_{i_1, i_2, t}$  代表运输商在该地区购买食物和销售食物的利润

在一个月的地区..  $t$

## 5.3 利润优化驱动的运输选择算法

在大多数国家,粮食都是以市场为基础进行分配的,这符合当前优先考虑效率和盈利能力的国家粮食系统模式。即运输者本着个人利益最大化的原则进行食品运输。

考虑到一个国家可能有数以万计的粮食运输者,而粮食产地又很多,对每一个运输者和每一个产地都进行建模是不现实的。在词汇表中,我们定义了生活区。同一生活区内的运输者向其他生活区运输时运费相同,在该生活区内收购和销售粮食的价格相等,因此可以确定他们的利益是共同的。基于这一思路,我们将各个生活区抽象为交通运输工具,建立了以利润优化为驱动的交通选择算法。

对于第p种食物,算法模拟了全国各个地区运输者之间食物运输的模拟场景。该算法的输出是一个  $-by-$  矩阵的。矩阵的每一行代表随着时间推移分配给该国单个地区的第 p 种食物的总量。假设全国共有居住区,具体算法  $T$  维矩阵  $U^p$  如下:

$M$

算法 1:利润优化驱动的运输选择算法	
输入:	$k_1, k_2, w, l_{i_1, i_2}, \rho_{i,t}^p, ac_{i,t}^p, Q_{i,t}^p, qb_{i,t}^p, p$
输出:对于	$U^p$
$t = 1$ 到 $T$ 做	
为了 $k = 1$ 到 $M$ 做	
定义 $\max, i$ # 定义区域最大利润值和区域编号。	
为了 $m = 1$ 到 $M$ 做	
计算 $TP_{i_1, i_2, t}^p$ 基于等式 (7) 。	
如果 $TP_{i_1, i_2, t}^p > \max$	
$i = m$	
$\max = TP_{i_1, i_2, t}^p$ # 记录区域最大利润值和区域编号。	
根据	
运输的食物量结束更新。	
结尾	
基于模型III更新各生活区各食品价格。	
结尾	
结尾	

6 模型三:基于市场价格的食物销售过程模型

作为食品体系中的最后一个环节,主要的销售形式是食品在市场上的自由流通,这使得食品流通过程相对便捷、高效。同时,粮食市场价格的波动实际上也影响着居民购买粮食的能力,对区域饥饿人口数量的评价起着至关重要的作用。

6.1 食品价格波动模型

在市场经济中,价格是由供求关系决定的  
要求。所有的食物经过运输最终都会流入市场进行销售。  
根据模型二中生活区的定义,同一种食物在一个生活区内的价格默认是相同的。根据供求规律和市场均衡,商品价格不断波动。一般来说,当供过于求时,价格就会下跌;当供不应求时,价格就会上涨。为了对其进行量化,我们将类比供需模型可视化,建立食品微分方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dqb_{i,t}^p}{dt} = (supply_{i,t}^p - demand_{i,t}^p)\alpha \\ qb_{i,t}^p(t_0) = p_0 \end{cases}$$

在哪里  
 $supply_{i,t}^p$  表示当月生活区市场第 p 种食物的供应量  $demand_{i,t}^p$  表示当月生活区第 p 种食物的需求量。  
 $\alpha$  表示供求关系对价格的影响系数,usu  
盟友关系到国家政策和稳定。表示居住区第p种食物的初始  
 $p_0$  价格。

对于供应,我们在模型 II 中进行了定义和量化,它是根据运输者的成本和收益来确定的。

对于需求,很明显这与当前居住区的总人口正相关。同时,食品市场价格越高,需求越有下降趋势。食物是居民的生活必需品。随着价格上涨,需求减少的弹性很低。基于这种逻辑关系,我们定义需求如下:

$$demand_{i,t}^p = \beta pop_{i,t} - \varphi qb_{i,t}^p$$

在哪里

$pop_{i,t}$  代表该居住区的月总人口数。表示比例因子。 $i$   $t$   
 $\beta, \varphi$

综上所述,我们为特定生活区域的特定产品建立了价格-时间波动模型。

## 6.2 人们的食品支出

对于每个公民来说,我们相信他们的收入中有一部分是用于食物的。由于不同人的收入存在差异,我们认为这些收入是独立同分布的,用正态分布来估计每个人的具体收入

人。

$$f(x)_{i,t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{i,t})^2}{2\sigma^2}\right)$$

在哪里

$\mu_{i,t}$  代表该地区人月的平均收入。 $i$   $t$   
 $\sigma$  代表收入随均值的波动。

## 6.3 人的食物选择算法

在应对饥饿方面,我们参考了联合国粮农组织 (FAO) 的标准。人均每日热量摄入1800大卡是个人健康和有效生活的最低要求,而人均每日热量摄入低于1800大卡则为饥饿人口[6]。

我们建立了人们的食物选择算法。该算法模拟了不同收入人群为该地区所有人口购买食物的模拟场景。该算法的输出是一个逐维矩阵。矩阵的每一行代表随着时间的推移,该国单个生活区域内的饥饿人口数量。假设国家有生活区,具体算法如下:  $T$

$M$

---

### 算法2:人的食物选择算法

---

输入:  $qb_{i,t}^p, supply_{i,t}^p, demand_{i,t}^p, pop_{i,t}, \alpha, p_0, \beta, \varphi$

输出: 对  $H$

于  $t = 1$  到  $T$  做

---

为了  $k = 1$  到  $M$  做

对于该地区的每个人:如果这个人很富

有:随机购买食物,直到满足个人卡路里

需求。如果这个人很穷 优先购买高热量食物,直到满足个人卡路里需求或  
钱用完 End

确定此人是否满足最低卡路里要求。如果不满足,更新。

$H$

结束

更新  $supply_{i,t}^p, demand_{i,t}^p$ .

结尾

## 7 指标定义

### 7.1 可持续性指标

#### 7.1.1 指标选择

可持续发展,正如布伦特夫人的名言,是“既满足当代人的需求,又不危及子孙后代满足其需求的能力的发展”。它一般包括经济可持续性、生态可持续性和社会可持续性[4][5]。对于食物系统来说,更多体现在生态的可持续性上,即衡量食物系统对环境造成的一些影响。

我们以温室气体排放量、耕地面积和用水量为指标,  
量化可持续性。具体定义如下:

$$G_t^{CO_2} = \sum_{p=1}^n CO_{2t}^p Area_t^p$$

$$G_t^{cul} = \sum_{p=1}^n Cul_t^p Area_t^p$$

$$G_t^{water} = \sum_{p=1}^n Water_t^p Area_t^p$$

在哪里

$G_t^{CO_2}$  代表该国粮食系统月总产量。 $CO_{2t}^p$  代表该国粮食系统以月计的耕地面积。 $Area_t^p$  代表该国食品系统在  $t$

$G_t^{cul}$  month 中的总用水量。  $t$

$G_t^{water}$   $t$

#### 7.1.2 熵权法确定指标权重 熵权法作为一种客观的赋权方法,确定指标

权重

根据每个指标数据提供的信息进行分类。

对所有指标进行归一化和标准化,得到 计算第  $i$  个样本在  $\widehat{G}_j^{CO_2}, \widehat{G}_j^{cul}, \widehat{G}_j^{water}$  .

第  $i$  个项目下的概率。  $j$

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}}$$

计算每个指标的信息熵。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij})$$

计算各指标的权重。

信息熵越大,指标的信息越少,因此权重也越小。我们定义信息效用值来得到每个指标的权重。

$$\begin{cases} W_j = (d_j) / \sum_{j=1}^m (d_j), & \sum_{i=1}^m W_j = 1, & W_j \in [0, 1] \\ d_j = 1 - e_j \end{cases}$$

基于以上权重确定,我们可以定义一个国家当月的可持续发展指标为

$t$

$$Sustainable_t = W_1 \widehat{G_t^{co_2}} + W_2 \widehat{G_t^{cul}} + W_3 \widehat{G_t^{water}} \quad (8)$$

## 7.2 权益指标

关于公平,我们理解每个公民都能公平地吃到食物,不会因为价格过高或食物供应不足而挨饿。根据模型 III,计算出一个国家所有地区月饥饿人口的矩阵

$H$ ,

$t$  可以表示为:

$$Pop_{hunger} = \sum_{i=1}^M H(i, t)$$

然后是净值指标

$Eqity_t$  一个月内的国家/地区可以定义为:

$$Eqity_t = Pop_{hunger} / Pop_{sum} \quad (9)$$

在哪里

$Pop_{sum}$  代表全国总人口。

## 7.3 盈利指标

在我们上面定义的食品系统中,盈利能力指标可以量化为市场上销售的食物总价格与食品生产成本之间的差值。

我们定义国家在  $t$  月的利润如下:

$$Profit_t = \sum_{p=1}^n (QB_t^p - PC_t^p) \quad (10)$$

在哪里

$QB_t^p$  代表第  $p$  种食品在该国的销售收入。代表该国第  $p$  种食物的生产成本。

$PC_t^p$

## 8 案例研究:印度和法国

为了验证我们的食物系统模型并解决提出的问题,我们选择了两个典型的国家来应用我们的模型:印度和法国。

8.1 国家现行粮食体系评价

在将我们的食物系统应用于国家之前,我们先确定生活区的含义。  
示范点下的生活区在这里被确定为全国的省份。因为如果把生活区定义在一个较小的空间尺度上,它的数据就很难收集,也无法建模;如果选择更大的空间尺度,则误差太大。

两国应用的数据均以2019年的数据为基础,根据模型中的省份数定义两国对应的居住区数。

8.1.1 模型 结果

为了获得两国的粮食产量和食物热量的分布,我们找到了法国和印度共同的食物来源。在这里,我们只统计占1%以上的食物。如图6所示,法国食物主要包括大麦、小麦和玉米,而印度食物主要包括大米、玉米、大麦、小麦和高粱。

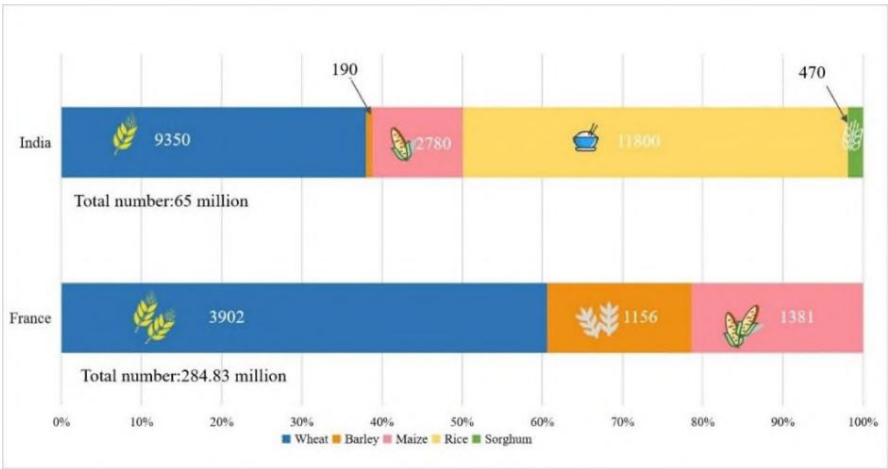


图6:全国粮食产量对比

从粮食生产的分布可以看出,法国和印度的粮食生产中都有大量的小麦。而印度也有将近一半的粮食总产量是稻米。

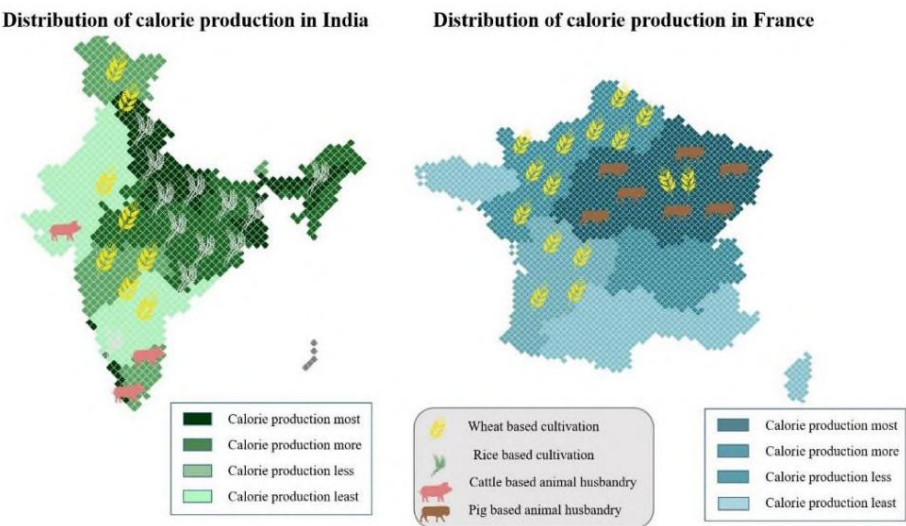


图 7:两国卡路里产量分布



如图7所示,法国的主要食物热量集中在北部,这里地势多为平原,适合发展畜牧业和种植业。

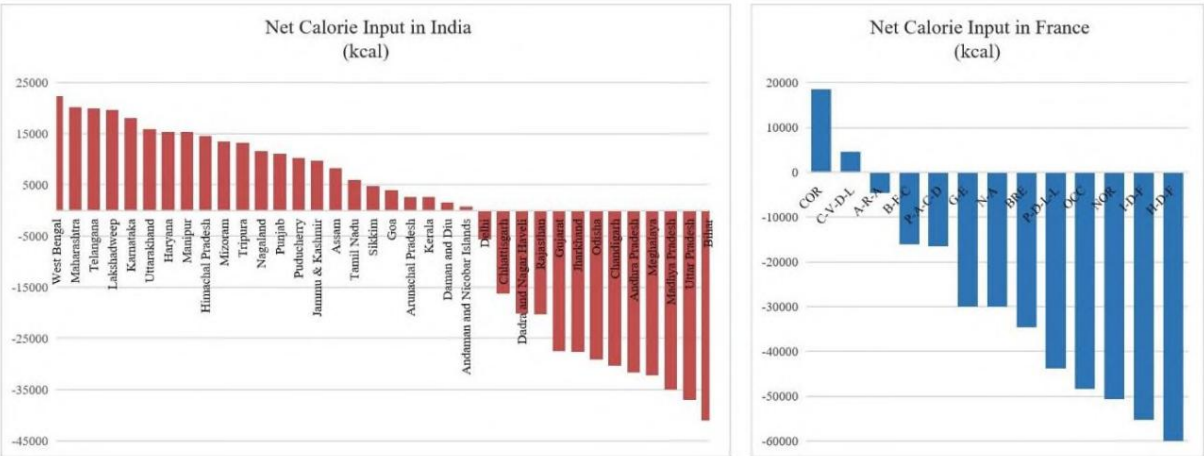
也符合我们查阅的资料。印度食物热量的分布是集中在适合种植粮食的东北平原。但是,在人均卡路里方面,印度和法国有一定程度的差距,因为印度的人口密度远大于法国。

8.1.2 模型 I 结果

为了弄清两国的粮食分布情况,我们首先将居住区之间的距离抽象为不同省份省会之间的直线距离。同时,生活区当月第p种食品的收购价和销售价参考两国国家统计局的数据

$i$   $t$ ,  
2019 年[2][3]。对于参数  $k_1, k_2$ , 我们还查询数据以相应地确定它们。

我们将数据代入模型2,得到一年后两国各生活区的粮食运输情况。为了使食物分配结果的展示更加形象,我们用一个生活区的食物热量运输和生产的差值作为它每年的净热量输入。结果如下表3所示:表3:两国不同生活区域的净热量输入



可以看出,印度的食物卡路里流入和流出明显较少（相对于庞大的食物生产）。我们认为,这是因为印度的粮食空间不均问题并不严重。而另一方面,印度的基础设施不足,食物空间分配成本过高。在法国,净食物卡路里输入值甚至大多为负数。我们查阅资料发现,法国的粮食自给率过高,大部分粮食用于出口,这也印证了我们的模型与现实的吻合。

8.1.3 模型 II 结果

为了详细得到两国的饥饿人口,我们找到了两国各省的人口数据[4][5]。然后,对于每个区域,我们通过供需关系模型和食物选择算法得到每个区域饥饿人口的估计值。具体结果如下图所示:

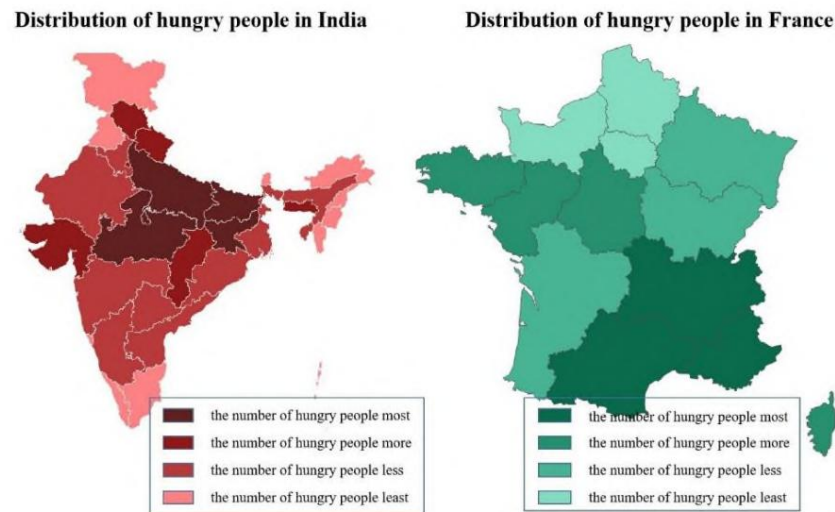


图8:两国饥饿人口分布

如图 8 所示,两国都有不同程度的饥饿人口。印度的饥饿人口主要集中在中部和北部地区。我们推测这可能是由于这些地区的粮食产量不足。而且地处山区,粮食运输成本高。运输者不会根据利益的选择倾向于将食物运送到这个地方,这导致饥饿人口增加。法国的饥饿人口主要集中在东南部。我们认为这是因为它靠近法国重要的出口港口马赛。

出口粮食的收入可能比在当地销售高很多,所以大部分粮食都出口了。出口导致当地粮食生产不足,该地区位于阿尔卑斯山。从其他地区运输到该地区的成本太高,导致当地食物短缺。

## 8.2 优化公平和可持续性

在这里,基于我们的食物系统模型,优化模型建立在法国和印度朝着公平和可持续性的方向优化粮食系统。

首先,我们确定可持续性指标中的权重参数。根据近10年的可持续发展指标数据,我们采用 7.1.2 中的熵权法,确定评价法国和印度可持续发展水平的指标权重为

$$W = [0.5213, 0.2511, 0.2276]$$

### 8.2.1 基于多目标规划的优化模型

根据潜在分析,公平和可持续优化将不可避免地损害粮食系统的利润。为了防止公平和可持续指标的无限优化,我们确定了食物系统在优化过程中的利润不应该小于0。同时,公平和可持续优化在一定程度上存在冲突。例如,为了可持续优化,会倾向于减少粮食生产以改善环境,但这势必会进一步加剧欠发达国家粮食分配的不公平。为了权衡这两个方面,我们将目标函数设置为:

$$\text{Min} = \gamma \overline{\text{Equity}} / \text{Equity} + (1 - \gamma) \overline{\text{Sustainable}} / \text{Sustainable}$$

$$s.t. \begin{cases} Profit > 0 \\ Area_{i,t}^p > 0 (i = 1, \dots, M, t = 1, \dots, 70, p = 1, \dots, N) \\ k_1, k_2 > 0 \\ \alpha > 0 \\ \rho > 0 \\ \sigma^2 > 0 \end{cases}$$

在哪里

*Eqity* 代表各国5年公平指标的平均值。

*Sustainable* 代表各国可持续发展指标的平均值

5年内。代

*M* 表居住区的总数。代表食物种类的总数。

*N*

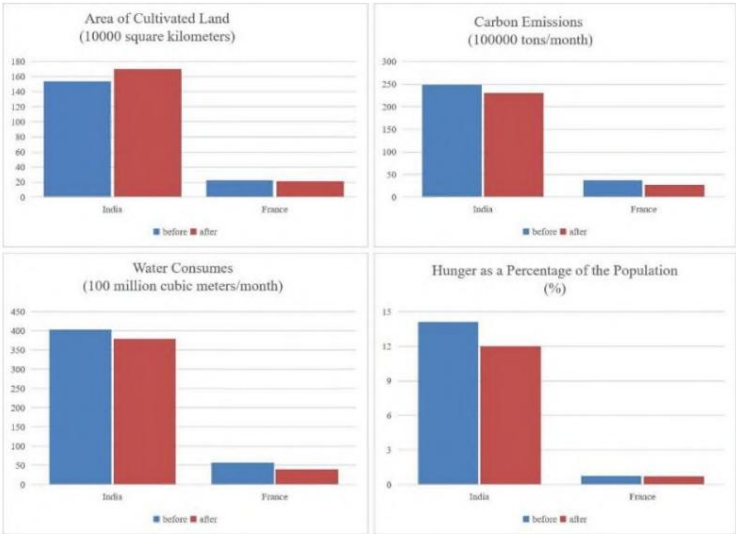
除以均值是去除维度的主要方法,变换多代表只代表公平优化。

目标优化转化为单目标优化。同时,只进行面向可持续发展的优化,以及8.2.2 优化后  $\gamma = 0$  的结果为了使模型更具普适性,我们遍历从0到1的值,以0.1为区间。由于公平指标的取值取决于饥饿人口,无法用具体的公式表示,需要通过Matlab代码对粮食系统进行仿真运算得到。我们使用遗传算法来逼近模型的最优解。  $\gamma$

我们的优化模型的参数包括耕地面积、耕地类型百分比、单位产量、劳动力成本指标、燃料成本指标、市场调整参数、分配收入差异和时间。虽然这些在上述约束中没有以公式的形式量化,但它们要么是可持续性指标的组成部分,要么是计算公平指标的模拟模型中的参数,需要在粮食系统模型中运行。

在这部分,我们只展示对权益进行相同程度优化后的结果和可持续性,并给出我们的分析。

表 4:可持续性指标的变化和贫困人口的比例



如表4所示,法国在优化前后,该国总体耕地面积变化不大,仅略有下降,减少了6.7%。因为法国目前的粮食产量非常充足,所以优化的结果并不是粮食产量减少造成的。印度方面,随着优化的推进,土地面积有所增加,增加了11.1%。我们认为,土地面积增加带来的公平指标的增加大于可持续指标的下降。

在衡量环境因素的指标方面,两国都有不同程度的下降。其中,法国的跌幅远大于印度。如表 4 所示,在法国,用水量从每月 370 万吨下降到每月 270 万吨,用水量从每月 57.62 亿下降到每月 40 亿。在印度,用水量从每月 240.91 万吨下降到每月 230.7 万吨,用水量也从每月 403.3 亿下降

$CO_2$

$m^2$

$m^2$

$m^2$

其实,这是因为法国目前的粮食水平足以自给自足。如果通过减少耕地面积和牲畜饲养数量来改善环境水平,不会造成饥饿人口的增加,但印度不同。在改善环境因素时,我们还必须考虑到公平性。考虑到粮食产量是否足够国内人口,增幅应该不大。

至于饥饿人口,我们发现法国和印度的饥饿人口总数都有一定程度的下降。由于法国饥饿人口基数小,减少并不明显,从50万减至47万。印度的优化效果非常显着。饥饿人口从1.896亿减少到1.505亿,有效改善了粮食公平问题。

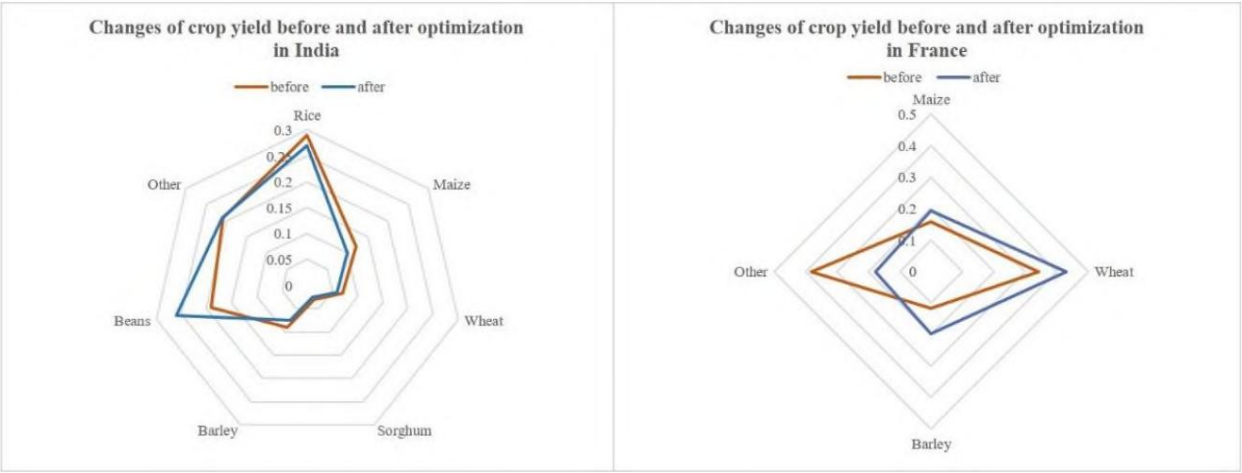


图9:两国优化前后作物产量变化

如图9所示,从土地结构看,四季豆种植面积大幅增加。对于印度来说,玉米和大麦的耕地面积大幅减少,而小麦的耕地面积大幅增加。我们推测,豆类和小麦的单位产量所含热量较高,对促进公平,即使更多人免于饥饿的贡献更大。同时,其单位面积的污染比其他的少,这将提高可持续性水平。

下面将介绍食物系统优化的差异。

我们决定量化食物系统模型中特定参数的变化。优化前后我们的模型参数值如下表所示 :表5 :两县模型参数变化优化前 优化后

$\alpha$	$k_1$	$k_2$	$\sigma$	$\alpha$	$k_1$	$k_2$	$\sigma$
印度	37.26708	6.584	5.591	3.76	21.73913	5.923	4.821
法国	25.46583	6.128	5.272	2.11	20.52795	5.762	4.837

从市场调整参数来看,法国变化较小,印度变化较大。我们认为,降低市场调节参数,减缓食品价格随供需关系变化的幅度,将有助于运输商不倾向于将食品同时运往一个地方,从而避免一个地方的食品浪费。

在平均人工成本参数和燃料参数方面,我们发现两国的参数都有一定程度的下降。事实上,降低劳动力成本参数和燃料参数,会降低运输商长途运输的成本,从而增加运输商将食品远距离运输的意愿,促进食品的合理分配。

在收入分配的方差参数中  $\sigma$  ,我们还发现两国都有一定程度的减少。按照常理,方差越小,整体贫富差距越小,越多的穷人才有足够的钱买菜。

食物系统优化需要花费的时间如下所述。

我们以印度和法国2019年12月的数据为起点,然后将上述模型估算的参数代入到食品系统中。随着时间的推移,我们得到了我们的目标函数优化值,如下图所示

下图10: 如图10所示,我们模拟了未来5年 (70个月)的情况,发现法国的价值在第37个月开始上涨。同样,印度在第43个月稳步增长。

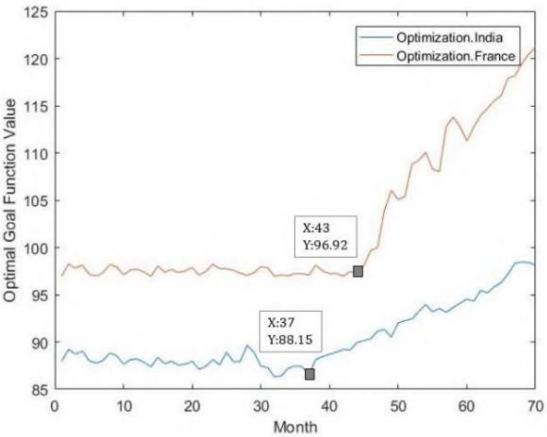


图10:目标函数值变化曲线当然,时间考虑到以上所有参数 (如土地结构等)都可以瞬间完成。在实际问题中,相应参数的执行可能需要一定的时间。

<sup>2</sup>食品系统优化的收益和成本将在下面进行描述。

根据7.3我们确定的效益指标,结合实际运营情况对食品系统模型,我们将针对公平和可持续性优化的参数代入模型,得到法国和印度的利润和成本随时间变化的折线图

年。

如图11所示,经过优化后,其食物系统的利润有所下降。但是,印度下降的速度远超法国。在成本增加方面,印度的增幅也高于法国。同时,根据我们的模型,它们分别发生在第 19 个月和第 29 个月。

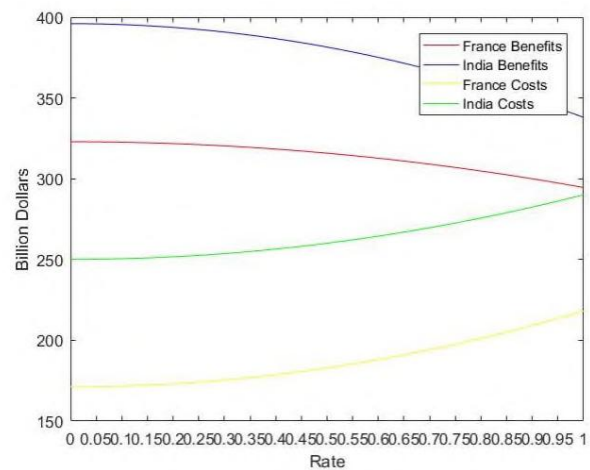


图11:成本收益变化曲线为避免个别国家误差的影响,我们选

取了5个主要发达国家和5个主要发展中国家。根据我们的食物系统模型,我们计算了他们优化前后的成本和利润。变化趋势如下图所示:

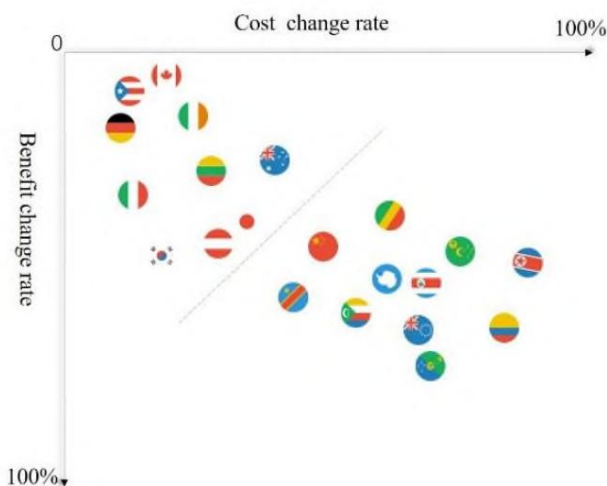


图12:多国成本效益优化图可以看出,图12左上部分为部分发达国家,如德国、日本、加拿大等;右下部分是

中国和印度等一些发展中国家。整体上可以发现,优化前后发达国家的利润下降和成本增加幅度并不大。但发展中国家的利润下降和成本上升幅度远大于发达国家。这是因为发展中国家在科技方面落后于发达国家,而且大多人口众多,可持续性和公平性问题严重。为了可持续和股权优化,必然会带来一些更高的成本和更低的利润。



## 8.3 政策建议

提供交通补贴,加强基础设施建设。

从我们的模型可以看出,优化前后的饥饿人口都有一定程度的下降。这在很大程度上是由于运输过程中劳动力成本和燃料成本参数的改善,以降低运费。我们相信,政府可以通过补贴运输商和加强基础设施建设,有效降低运输成本,从而使运输商更愿意向偏远地区运输,缓解“最后一公里”问题。调整市场波动和收入分配。

在我们的模型中,减少市场食品价格对供需的敏感参数可以优化食品系统。我们认为,降低该参数本质上是一种调整市场价格波动的手段。如果市场价格波动更加稳定,更多的穷人就可以有足够的钱购买食物,从而缓解饥饿问题。同时,缩小收入分配的差异,实质上就是缩小国家的贫富差距。如果国家贫富差距过大,一些特别贫困的人买不起基本的食物。

减少耕地面积。

在我们的优化模型中,印度和法国的优化最终倾向于减少耕地面积。虽然减少耕地面积可能会在一定程度上加剧粮食不平等问题,但我们仍然认为,减少耕地面积带来的可持续性提升远高于此。

关于粮食公平问题,我们认为可以通过运输和机械化提高单位产量来解决。

提高机械化水平。

虽然在我们的模型中没有量化机械化的使用,但我们认为这是非常重要的一点,特别是对于发展中国家。通过提高粮食系统的机械化水平,可以在不增加耕地面积的情况下增加粮食产量,从而提高公平性,同时最大限度地减少对可持续水平的影响。

## 9 可扩展性和适应性分析

首先,我们相信我们的模型在较小的食物系统上会表现更好。根据我们模型对生活区的定义,如果在更小的空间维度上会更准确。我们目前以一个省作为生活区,但实际上省内的交通成本是不可忽略的,同样的食品在省内的价格也很难接近。如果将生活区应用到村庄等空间维度上,精度会提高很多。当然,这可能会带来数据采集困难、模型运行困难等问题。

在更大的食物系统上,我们的模型也能表现良好。如果我们将我们的模型应用到世界上,我们可以更详细地考虑国家之间的交流和贸易。当然,更大的食物系统也有一个缺点,就是我们的优化是建立在整个世界的可持续性和公平性之上的。但就具体国家而言,其可持续能力和公平水平可能会下降。现实不符合他们的利益。

在对其他国家或地区的适应性方面,我们认为该模式可以适用于大多数国家和地区。但对于一些极端的地方,我们需要特别考虑。

我们试图将我们的模型应用到索马里,但是我们得到了一系列与真实数据有很大差异的数据。我们深入分析了其内在原因,得出的结论是,在运输食品时,运输成本不仅与路途远有关,还与某些特殊地形有关。

基于此,我们认为我们的模型可以改进。例如,食品运输过程中的运输成本,不仅要考虑运输距离,还要考虑地形、道路畅通度等因素来修改运输成本模型。

## 10 模型评价

### 10.1 优势

我们按照生产、运输、销售环节分别对食品系统进行建模,更全面地识别食品系统的关键环节。量化可持续性、公平性、盈利能力等指标,将各种优化场景可视化,直观反映优化现象。我们设计仿真算法,模拟运输者的交通场景和人们的购物场景,贴近现实生活,具有一定的借鉴意义。

### 10.2 弱点

考虑到实际国家的交通模型,由于数据原因,我们将每个省份视为一个生活区,这在一定程度上影响了模拟的准确性。市场上的食品价格只考虑供求关系

需求,而不考虑更多的因素。  
不同居住区之间的距离以直线距离衡量,  
不考虑实际地形因素。

## 11 结论

总之,粮食系统不是一个可以简单地用单一模型衡量的系统。相反,它需要细化其食品生产、运输和销售流程,然后单独构建模型。我们在模型 I 中分别对其生产、运输、销售进行建模,分析各种可能出现的情况。然后,我们在指标定义中建立了评估这个食物系统的指标,包括可持续性、公平性和盈利能力。随后,我们建立了一个规划模型来优化食品系统的公平性和可持续性。最后,在案例研究中,我们代入了印度和法国两个真实国家的条件,并根据公平和可持续性的权重对其进行了优化。

我们在结果展示中得出了结论,包括发生了什么,食物系统的差异以及它发生了多长时间。当公平和可持续性时,我们还优化了遍历



占不同的权重,得到不同国家的收益和成本的变化。

我们将模型迁移应用于更大或更小的系统,并且表现良好。搬到一些特殊的国家,我们做了一些更正。总的来说,我们的模型在定义和评估食物系统方面具有相对较好的表现。通过我们的模型,可以有效地衡量和优化一个国家的粮食系统。

## 参考

- [1] 2021 年联合国粮食系统峰会,2020 年。摘自: “<https://www.un.org/sustainabledevelopment/food-systems-summit-2021/>” [2] 为负担得起的健康饮食转变粮食系统,联合国,2020 年。检索自: “<http://www.fao.org/publications/sofi/en/>” [3] 食品,联合国。检索自: [https://www.un.org/en/sections/issues\\_](https://www.un.org/en/sections/issues_)

---

[深度/食物/index.html](#)

- [4] 马可斯普林曼。将食物系统保持在环境限制内的选择[J]. 自然,2018 年,33(562):519-542。
- [5] 阿布舍克·乔杜里、大卫·古斯塔夫森、亚历山大·马蒂斯。全球粮食系统的多指标可持续性评估[J]. 自然通讯, 2018, 9: 1-13.
- [6] 何塞·路易斯·维森特·维森特、安妮特·皮奥尔。转向区域和有机饮食能否减少食品系统的温室气体排放?以卡塔尔为例[J]. 碳平衡与管理, 2021, 16(2): 2-19.