|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Problem Chosen **E** | **2021 MCM/ICM Summary Sheet** | Team Control Number  **2104357** |

Who moved my food? A new food system optimization

### Summary

Hunger breeds discontent. As the population continues to increase, food scarcity becomes more and more serious. Thus, we established a new, effective and flexible food system, and used the planning model to optimize the system and give the solution.

Firstly, we build a new food system based on **food economics**. Among them, there are 4 first grade indexes, efficiency, profitability, equity and sustainability, and 12 second grade indexes. We used Analytic Hierarchy Process () to determine the weight of the index and obtain the coefficient of the object function. Taking China as an example, we only set up a **linear programming model** to optimize the equity and sustainability, get the optimized solution, and compare it with the original system. In estimating the time to reach this level, we obtain the function expression of the index change through regression. The results show that this time is around 4-6 years.

Secondly, we establish a **target planning model** and use priority factors to express the priority, and then to realize a food system that can adjust the priority flexibly. Here, we introduce the concept of **C**omprehensive **O**ptimized **I**ndex **()** to select which priority food system is optimized. We take China and the United States as examples. The results show that China’s priority is **efficiency>equity>profitability>sustainability**, and itsvalue is 13.75. The United States’ priority is **efficiency>profitability>equity>sustainability**, and its value is 9.78.

Then, we get that China’s food system reaches this level, and it will take 2-4 years. In the case of **Pareto optimized**, we introduce the concept of **A**gricultural **I**nvestment **E**ffectiveness **C**oefficient **()** from agricultural economic management to evaluate the benefits and costs of the food systems in China and the United States. The results show that the values of China and the United States are 0.83 and 0.46.

Finally, we conducted a sensitivity analysis of the model, adjusted the parameters of the constraint conditions with a fixed step length, evaluated the optimization effect, and then applied the model to a smaller area for solution. The advantages and disadvantages of the model are also analyzed.

**Keywords:** Linear programming; Priority Factors; Target planning model; Pareto optimum

**Contents**

[1 Introduction 1](#_Toc63689661)

[1.1 Problem Background 1](#_Toc63689662)

[1.2 Our Work 2](#_Toc63689663)

[1.3 Notation 1](#_Toc63689664)

[2 Assumptions and Glossary 1](#_Toc63689665)

[2.1 Assumptions 3](#_Toc63689666)

[2.2 Glossary 3](#_Toc63689667)

[3 Reinventing the Food System: a New Attempt 4](#_Toc63689668)

[3.1 A New Food System 4](#_Toc63689669)

[3.2 Optimization Only for Equity and Sustainability 4](#_Toc63689670)

[3.3 Characteristic Analysis of System Changes 6](#_Toc63689671)

[3.4 Estimates of the Time to Achieve the Optimized Goal 7](#_Toc63689672)

[4 A Flexible Food System Model 9](#_Toc63689673)

[4.1 A Food System Model: Changing the Priority of Goals 9](#_Toc63689674)

[4.2 Finding the Comprehensive Optimized Level 10](#_Toc63689675)

[4.3 Time Estimation to Realize the Comprehensive Optimized Level 12](#_Toc63689676)

[4.4 Differences Between the Benefits and Costs of a Food System: The Case of USA and China 12](#_Toc63689677)

[5 Sensitivity Analysis 14](#_Toc63689678)

[5.1 Scalability Analysis 14](#_Toc63689679)

[5.2 Adaptive Analysis 15](#_Toc63689680)

[6 Strengths and Weaknesses 16](#_Toc63689681)

[6.1 Strengths 16](#_Toc63689682)

[6.2 Weaknesses 17](#_Toc63689683)

[References 18](#_Toc63689684)

[Appendix 20](#_Toc63689685)

[Appendix A 20](#_Toc63689686)

[Appendix B 21](#_Toc63689687)

# 1 Introduction

## 1.1 Problem Background 背景

植物是地球上生命的重要组成部分，它们通过光合作用吸收阳光、水和二氧化碳，并将其转化为生命能量。然而，植物也面临着各种压力，其中包括气候变化和干旱等自然灾害。在干旱条件下，植物必须通过各种适应机制来生存。[1]

而不同植物物种对于群落的干旱适应性有着显著的影响。由于干旱条件下的土壤含水量显著降低，植物在这种情况下需要利用其根系吸收尽可能多的水分以维持生长和存活。然而，不同物种的根系形态和生理特性差异很大，导致它们在干旱适应性方面存在显著的差异。

我们希望了解在不同干旱条件下植物群落的使用能力以及变化情况的，并探索当植物群落的数量以及种类发生变化时，将对他们整体的生存产生什么样的影响。



**Figure 1：**干旱条件下的植物生长[2]

## 1.2 Restatement of the Problem 问题重述

考虑到问题陈述中确定的背景信息和限制条件，我们需要开发一个模型来确定不同类型的种群在干旱条件下的适应性，并解决以下问题：Considering the background information and restricted conditions identified in the probmlem statement; we need to develop a model to determine the adaptability of populations of different species under drought conditions and solve the following problems:

* 开发一个数学模型，来预测植物群落随着干旱时期的变化情况，需要考虑不规则天气变化和物种之间的相互作用。
* 探索物种数量对于群落整体抗干旱性的影响
* 当群落中的物种类型发生变化时，群落在干旱条件下会发生什么变化
* 当干旱的频率，强度发生变化时，物种的数量对总体种群影响会发生什么变化
* 当该区域存在污染，或者植物栖息地减小时，模型会产生什么样的变化
* 根据模型结论，可以采取什么样的措施来确保群落的可持续发展，是否可以扩展到更到的生态系统当中

## 1.3 Literature Review 文献综述

植物种群类型和其干旱适应性关系一直是植物生态学中的热点领域。随着对植物干旱适应性的深入研究，人们逐渐认识到不同植物种群具有不同的干旱适应性。

一些研究人员通过对不同植物物种的形态学和生理学特征的研究，揭示了它们对干旱的适应性。例如，Liu, H., Dai等人的研究表明，不同植物群落对干旱的响应能力，结果表明具有深根系统的植物群落在干旱条件下有更好的生存能力[3]。此外，一些研究人员将分子生物学方法应用于干旱适应性的研究中。例如，Nacer Bellaloui等人的研究发现，豇豆干旱适应性相关的基因表达受到了多种逆境胁迫的调控，并与干旱胁迫下的生理响应有关[4]。还有一些研究人员通过对不同植物物种形态和生理特性的研究，表明干旱条件下的树高、茎径、叶片数量和根系质量比均有所下降。例如，R. Serrano-Megías等人的研究表明，棕榈科植物物种的遗传多样性与干旱适应性存在着密切关系[5]。最近，一些研究人员将大数据技术应用于干旱适应性的研究中。例如，Kang Wang等人通过利用遥感和气象数据，研究了不同地区植被的干旱适应性，并提出了一种基于植被水分利用效率的干旱监测方法[6]。

植物种群类型和其干旱适应性之间的关系十分复杂，受到多种因素的影响。未来的研究需要更深入地探究植物干旱适应性的形成机制，以及不同环境和遗传条件下植物干旱适应性的变化规律。

## 1.4 Our Work

考虑一定时间内降水量的变化情况，考虑实际数据并进行一定的模拟，来衡量一个区域内的干旱情况，此外根据一定区域内的不同数量情况以及根系长度，来衡量不同物种之间的相互作用

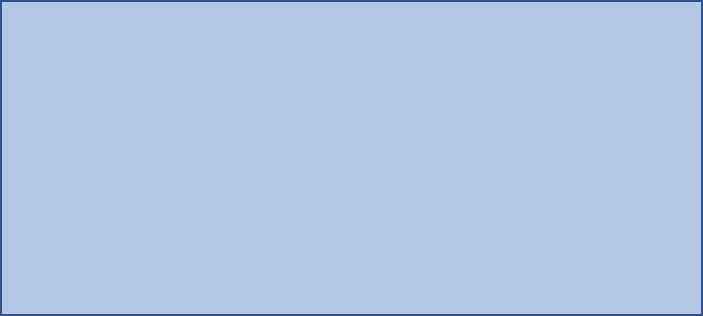
根据上述模型，来进行动态模拟，获得可以使得植物种群产生联系的最少植物物种，并继续增加其中的物种数量，探索变化规律。

研究荒漠群落、草原群落、森林群落之间的物种区别，考虑物种类型变化后，干旱对生物生存情况的作用效果。因此，模型需要考虑到不同类型的植物在干旱条件下的生长和适应性差异。

对干旱赋予更高的发生频率和更大的变化程度，探索是否会导致物种灭绝，或者对群落的整体稳定性产生更大的负面影响。如果环境条件相对稳定，那么植物群落的稳定性可能更多地取决于物种间的相互作用和竞争。

污染和栖息地减少等其他因素会削弱植物的生长和适应能力，考虑其对环境容纳量量的影响，从而导致物种数量的减少和群落的不稳定性增加。

最后，我们根据模型的分析，得到了一些增强植物种群可持续发展的措施，比如需要采取措施保护和维护植物多样性并减少污染和栖息地减少等其他因素的影响，以确保植物群落的长期生存能力，并保护整个生态系统。此外将其扩大到更大的环境中，考虑其物种之间的相互作用。



**Figure 2：**Problems with the food system and our purpose

# 2 Assumptions and Justifications

考虑到实际问题总是包含许多复杂的因素，我们做了以下假设来帮助我们进行建模：

**Assumption 1: 初始条件的影响。**需要考虑植物群落中不同物种的数量和分布对于模型的结果的影响，因此来更好的衡量他们之间的相互作用关系。

**Assumption 2: 物种的干旱适应能力是有限的。**每个物种只能适应一定程度的干旱或降水，当干旱的持续时间或强度超过一定阈值时，该物种将会消失或死亡。。

**Assumption 3: 不考虑除干旱与降水外的其它天气条件。**风力大小、光照强度、大气成分等其他天气因素也会影响植物群落中不同物种的生存和繁殖。为了更专注于对干旱的研究，我们将忽略这些因素的影响。

**Assumption 4: 物种之间存在相互作用。**多种物种之间存在相关联的作用，例如竞争或合作关系。他们之间的相互关系可能会影响整个种群的长期稳定性。例如，种类更多，关系更密切的物种可能会导致更稳定的群落。

**Assumption 5: 不考虑人为和随机因素的影响。**植物群落中物种的出现和消失可能会受到随机因素的影响，例如病毒的爆发、自然灾害的突发和人为干扰等。我们将不考虑这些情况的发生。

# 3 Notations

The primary notations used in this paper are listed in Table 1.

**Table 1：**Symbol description and explanation

|  |  |
| --- | --- |
| 符号 | 说明 |
|  | 第种植物的生物量 |
|  | 第种植物初始时刻的生物量 |
|  | 第种植物对第种植物的作用 |
|  | 时刻的降水量  第种植物的环境容纳量 |
|  | 时刻的土壤含水量 |
|  | 第个植物环境容纳量的比例系数 |
|  | 第个植物种群的固有增长率 |
|  | 物种数量 |
|  | 蒸发作用消耗的水量 |
|  | 植物蒸腾作用消耗的水量 |

# 4 分析和模型建立

## 4.1 模型I

### 4.1.1植物生长环境影响

降雨量是决定干旱发生的一个重要因素。当降雨量低于某一水平时，就会发生干旱。不同地区和不同季节的降雨量对干旱的影响程度是不同的。

* **土壤含水量**

为了考虑干旱对植物群落的影响，我们可以将土壤水含量为另一个变量。土壤水含量为降水量减去蒸发量再减去植物蒸腾作用的消耗量，我们乐意使用一下方程来表示土壤水分状况变化。

其中,A是土壤含水量,W是降水量,E是蒸发量,T是植物的蒸腾作用消耗量。

当土壤含水量越多时，水蒸发的越快。所以蒸发作用消耗的速率与土壤含水量成正比。

其中，为蒸发作用消耗的水，为蒸发系数。

当植物总量越高时，通过植物蒸腾作用消耗的水越多。

其中，为通过植物蒸腾作用消耗的水，为第i个植物的蒸腾作用系数

我们假设降水量直接全部转换成土壤含数量，然后才会通过蒸发等形式消耗。

综合以上各式。

* **土壤盐分，微生物等影响**

土壤中存在众多的微生物，它们能够改良土壤结构，促进土壤有机质、矿物质的分解。在植物根系周围生活的土壤微生物还可以调节植物生长。

无机盐三要素对植物的生长有着很关键的作用，含氮元素的无机盐能够促进植物细胞分裂和生长，使其枝繁叶茂。含有磷的无机盐可以促进植物幼苗的发育和花的开放，让果实、种子提早成熟。而含有钾的无机盐可以让植物茎秆更加健壮，促进淀粉的形成与运输。

* **植物受环境影响**

植物的种群密度有一个饱和水平。当种群密度达到一定数量时，对这种这个种群数量的增长也会饱和，同时由于水是制约植物生长的最关键因素，植物增长饱和值受土壤含水量影响最大，所以用土壤含水量来计算得到环境容纳量。

定义环境影响系数为，表示环境对植物生长的程度，与土壤含水量成正比：

其中，为第i中植物的环境容纳量，为第时刻的土壤含水量，为影响系数。

### 4.1.2 植物之间的相互作用关系

* **植物在水分上的相互作用关系**

我们认为在干旱地区，水是影响植物生存的主要因素，不同植物具有不同的吸水能力和储水能力，而吸水能力往往与植物的根部长度相关联，较长的根系通常可以吸收更深处的水分和养分，而较短的根系则更适合从浅层土壤中吸收水分。我们可以研究植物根系长度对其吸水强度的影响，进而更好地了解植物在干旱条件下的适应机制。

在这里我们列举了一些干旱地区常见植物，以及其根部的长度。

**Table 1：**常见植物以及其根长度:

|  |  |
| --- | --- |
| 植物名称 | 根长度（cm） |
| 草原柠檬草（Cymbopogon jwarancusa） | 440 |
| 桑树（Morus spp.） | 860 |
| 荒漠柠条（Tamarix aphylla） | 1100 |
| 紫穗槐（Robinia pseudoacacia） | 150 |
| 胡杨（Populus euphratica） | 80.5 |
| 羽叶冠麻（Tamarix ramosissima） | 59.7cm |
| 沙漠蒿（Artemisia desertorum） | 35.4cm |
| 沙漠松（Pinus edulis） | 170cm |

在一个植物群落中，如果存在根系长度不同的植物，那么它们之间的水分吸收能力也会有所不同。较长根系的植物可以在干旱条件下更好地维持其水分摄取需求，而较短根系的植物则更容易受到干旱的影响，这可能会对整个群落的生长和生存产生影响。因此，我们认为植物之间的根系长度的不同是它们决定竞争的主要因素，例如根系较长的植物可能会更容易占据水分和养分较深的土层，从而排挤其他植物的生长。因此，考虑植物群落中不同植物的根系长度对于研究植物间的相互竞争是非常重要的。

为了建立植物根系长度与吸水强度之间的关系，可以采用相关系数分析。相关系数p是用于描述两个变量之间线性相关性的统计指标，范围在-1到1之间，其中1表示完全正相关，-1表示完全负相关，0表示没有相关性。

假设吸水强度与根系长度之间存在线性关系，我们可以采用Pearson相关系数来描述它们之间的关系。假设我们有两种植物i和j，其根系长度样本集合分别为I和J。

Pearson相关系数的计算公式为：

其中，为样本数据的协方差，为标准差

当p>0时，植物A和B的根系长度存在正相关关系，即植物A和B根系长度增加时，它们的吸水强度也会增加。当p<0时，植物A和B的根系长度存在负相关关系，即植物A和B根系长度增加时，它们的吸水强度会减少。当p=0时，植物A和B的根系长度与吸水强度之间不存在线性关系。

* **植物在空间、空气上的相互作用关系**

植物的高度和阳光竞争量之间存在一定的关系，可以建立一个基于光合作用的数学模型，定义，这种竞争关系与两个植物的生物量成正比，其计算公式为。

其中，为实际两种植物阳光遮挡程度系数。为植物阳光竞争作用系数。

* 综合植物相互作用

### 4.1.3 植物群落密度随时间变化模型

我们要建立一个长期的数学模型来预测植物群落在不同干旱周期中的变化情况。植物群落的变化受许多因素的影响，包括植物之间的相互作用，土壤营养状况，气候变化等等。

首先，我们需要确定模型中包含的变量。在这个模型中，我们将考虑以下变量：

* + 植物的生物量
  + 不同植物物种之间的相互作用
  + 干旱发生的频率
  + 植物环境状况

我们可以将Lotka-Volterra模型改编为考虑不同植物物种之间的相互作用模型，植物生物量与植物的固有生长率成正比，与植物自身生物量和环境容纳量之差成正比，同时受到其他植物相互作用的影响，我们假设环境中一共有个植物类型，那么每个植物物种的数量关系如下：

其中，表示每个植物的生物量，是第i个植物的固有增长率，是第i个植物的最大种群密度。

* **植物群落密度随时间变化模型**

**4.1.4龙格库塔法求解模型**

对于复杂的微分方程，我们可以用MATLAB求解。MATLAB求解微分方程常用的方法有欧拉法、龙格库塔法、线性多步法等。其中，在使用龙格库塔法求解微分方程时,求解精度更高。但鉴于需要求在较长时间周期内对模型求解，我们直接对龙格库塔法进行改进，继而求出结果，具体步骤如下:

**Step1:初值条件的确定:**由题目信息得，模型参数是由统计学方法计算得出，具体见参考文献即:

**Step2:算法的迭代:**设置步长h=0.001s遍历长度为植物作物生长多年，按照递推公式依次求出上面四个一阶微分方程所对应的，然后求出对应的下一个离散值;

**Step3:算法的应用与模型的求解:**易知为第i个物种的种群密度，取其中以一天为间隔的时刻对应的值，保存到结果中。

**4.1.5求解过程及结果分析**

我们通过中国气象科学数据中心收集到新疆阿克苏地区多年的每日降水量数据，年降水量大概在50ml到200ml之间。观察发现每年降水量差异较大。根据降雨量大小，可以分为干旱年，正常降水年，较多降雨年。下图展示了新疆阿克苏地区一年内的降水量分布情况

**Figure 2：**新疆阿克苏地区一年内的降水量

我们对荒漠地区的植物生长进行分析，通过在论文[1]获取植物种类，植物物种密度，植物根长等数据，在收集的干旱区域天气数据的情况。通过中国气象科学数据中心收集到干旱地区多年的每日降水量数据。假设初始环境中，每种植物种群密度相等，利用这些参数带入模型，得到植物种群密度随时间的变化曲线。

形状, 矩形

描述已自动生成

**Figure 2：**Problems with the food system and our purpose

通过图像可以看出，在初始投入很多植物不能适应干旱环境，这些植物的种群密度很快就会降低到几乎为零，剩下的植物种群密度变化较大。可以发现，植物种群数量在降雨时期会明显上升，到达峰值后又开始逐渐下降，这体现了降雨时影响干旱地区植物数量变化的主要因素。

## 4.2 模型的应用

### 4.2.1 生态系统收益的种群临界值

生态学研究表明，增加植物物种数量可以提高生态系统的稳定性和功能，但具体需要多少不同的植物物种才能使生态系统受益取决于多种因素，例如生态系统类型、环境条件、物种相互作用等。

我们认为，当物种数量较低时，增加物种数量可以显著提高生态系统的生产力和稳定性。但当物种数量增加到一定数量后，新增物种对生态系统的效益逐渐降低。此外，随着物种数量的增加，不同物种之间的相互作用和竞争也会增加，因此在一定程度上增加了生态系统的复杂性。这可能会导致一些物种的数量减少，影响生态系统的稳定性。因此，存在一个最佳的种群数量，使社区收益最大。

物种多样性和生物量是表征和评价植物群落组成和功能的重要指标[12]。在干旱荒漠地区, 植物群落的物种多样性和生产力水平对于维持荒漠生态系统的功能稳定性, 以及改善区域生态环境具有重要作用[13]。[12] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and Stability in Grasslands. New York: Springer, 1996.[13] 程磊磊, 郭浩, 卢琦. 荒漠生态系统服务价值评估研究进展. 中国沙漠, 2013, 33(1): 281–287. DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00038因此，我们认为社区收益可以用生态环境中的总生物量来表示，当生态系统中的植物的总生物量大时，水土流失就会减少，同时提高固碳量，并且对于干旱地区环境的改善效果就好。我们定义植物的总生物量为，单位为克。

我们利用收集到的在同一干旱地区生长的两百种植物的植物种类，植物物种密度，植物根长等数据，在干旱环境中模拟植物生长，开始假设环境中只有一种植物，观察植物种群密度的变化，然后每次增加一种植物，直到环境中有两百种植物。对比植物物种数量不同时，生态系统中存活的植物物种数目和植物总的总生物量变化。

结果如下图表示:

形状, 矩形

描述已自动生成

**Figure 2：**Problems with the food system and our purpose

### 4.2.2 物种数量对生态系统的影响

我们通过植物群落物种多样性指数来研究植物物种数量对于生态系统的影响。对于不同的物种数量，分别计算物种多样性指标，并对结果进行分析，比较物种数量对生态系统的影响。

每个植物株数与生物量的关系为：

其中，表示第中植物的生物量，为第种生物的个体生物量,定义为第种植物株数。

定义为所有植物的总株数，其计算公式为：

定义为第中植物的株数占总株数的比例，其计算公式为：

**植物群落物种多样性指数计算公式如下：**

Margale指数

Simpson多样性指数:

Shannon-Wiener多样性指数:

Pielou均匀度指数:

我们同样利用已知的植物特性数据，在干旱环境中模拟植物生长，开始假设环境中只有一种植物，观察植物种群密度的变化，然后每次增加一种植物，直到环境中有两百种植物。对比植物物种数量不同时，植物的群落物种多样性指数。

结果如下图表示:

形状, 矩形

描述已自动生成

**Figure 2：**Problems with the food system and our purpose

### 4.2.3 物种类型的影响

群落中的物种类型会对干旱适应性指标产生影响，不同类型的群落在适应干旱的能力上也有所不同。我们分别对不同群落进行分析，不改变物种数目，改变物种种类，观察植物生物量的影响。

* 对于荒漠地区

在适合荒漠环境中生存的植物中随机挑选由20个物种，将植物参数带入模型，计算得到植物的总生物量在三年内的平均值，以此类推，共选取100个组合，比较最后结果的差异性。

结果如下图表示:

形状, 矩形

描述已自动生成

**Figure 2：**Problems with the food system and our purpose

在生存了三年后，荒漠地区物种类型的多样性往往较低，但由于其日常环境的恶劣，各种荒漠地区中的植物适应性很强，能够通过长根系和厚实的叶片来减少水分流失。这些植物能够在极度干旱条件下存活，并且在水分充足时能够快速生长和繁殖。因此具有很强的干旱适应性。

* 对于草原地区

同样随机选取100组适合在草原生活的20个植物，经过计算得到下图

形状, 矩形

描述已自动生成

**Figure 2：**Problems with the food system and our purpose

对于草原地区，物种类型的多样性较少，草原植物的干旱适应性也相对较弱。但是草原植物通常具有较深的根系和较低的生长点，以便在干旱条件下吸收地下水。因此，当面对较小幅度的干旱时，草原植物可以通过控制气孔的开合来减少水分流失，从而适应干旱的环境。但当干旱程度过大时，草原植物群落很可能会奔溃。

* 对于森林地区

同样随机选取100组适合在草原生活的20个植物，经过计算得到下图

形状, 矩形

描述已自动生成

**Figure 2：**Problems with the food system and our purpose

对于森林地区，物种类型的多样性很高，但由于林木通常具有较浅的根系和较大的蒸腾面积，因此相对于荒漠和草原，森林的植物干旱适应性较弱。然而，森林地区中的物种类型多样性可能会使得整个生态系统更加稳定，减少干旱等极端气候事件对生态系统的冲击。

# 5 干旱频率对模型的影响

## 5.1 干旱天气变化

在不规则的干旱天气周期下，植物群落随时间的变化趋势可以有多种可能性，具体情况取决于植物群落中各物种的生态特征和适应能力，以及干旱天气周期的特征。

为了研究天气变化对模型的影响，我们根据获取的干旱地区降水量数据，做出周期性的天气数据来检验模型，

定义如下降雨类型

多雨的季节为每年7~10月，每月均匀降雨4次，每次10ml。

正常雨季节为每年3~6月，每月均匀降雨2次，每次5ml。

少雨的季节为每年10~2月，每月降雨1次每次3ml。

通过这个基础降雨模型，通过改变周期来做以下研究。

初始阶段的损失：在干旱天气开始时，植物群落可能会经历较大的生长和繁殖损失。一些物种可能会死亡，另一些物种可能会经历生长缓慢或繁殖失败等问题。

物种组成的变化：在干旱天气周期持续时，植物群落的物种组成可能会发生变化。一些物种可能表现出更强的适应性，因此它们的种群数量可能会增加。另一些物种可能表现出较弱的适应性，其种群数量可能会减少或完全消失。

适应性的增强：一些物种可能会在干旱天气中逐渐适应，其生长和繁殖可能会慢慢恢复或增加。这些物种可能具有更深的根系、更高的水分利用效率或其他适应性特征。

稳定阶段：在干旱天气周期结束后，植物群落可能会逐渐恢复到之前的稳定状态。适应性较强的物种可能会增加种群数量，适应性较弱的物种可能会减少种群数量或消失，直到植物群落恢复到新的稳定状态。

总的来说，植物群落在不规则的干旱天气周期下，可能会经历较大的变化和适应过程。这些变化和适应可能会对植物群落的结构和功能产生重要影响

### 5.1.1 干旱频率变得更高

干旱频率更高意味着降雨量变小，导致环境更快进入到干旱状态。我们将每次降雨的雨量减为原先的一半，观察

当干旱频率更频繁时，种群的干旱适应性能力可能会受到负面影响。频繁的干旱可能会降低种群的生长率、繁殖能力和存活率，从而对种群的整体表现产生不利影响。此外，频繁的干旱可能会导致土壤贫瘠和水分流失，使种群更难以在环境中生存。

### 5.1.2 干旱变化更大

当干旱的强度变化更大时，种群的干旱适应性能力也可能受到影响，但影响的方向和程度会有所不同。较大的干旱强度变化可能会导致种群的适应性能力增强，因为这有助于促进种群对干旱的适应和适应能力的提高。但是，如果干旱强度变化太大，种群的适应能力可能会变得脆弱和不可靠，从而对其长期存活能力产生不利影响。

## 5.2 干旱减弱

### 5.2.1 干旱模型重新变化

### 5.2.2 种群的变化

# 6 模型的扩展

污染和栖息地减少等其他因素对模型结果的影响同样重要。这些因素可能对生态系统中物种的数量、分布和相互作用方式产生直接或间接的影响，从而影响生态系统的稳定性和功能。

1. 污染对生态系统的影响：污染可能导致土壤、水体和空气中的化学物质浓度超过安全水平，从而对植物和其他生物产生负面影响。在模型中，可以考虑对污染的不同水平进行建模，以了解其对生态系统的影响。

2. 栖息地减少对物种数量和分布的影响：随着城市化和人口增长，许多生态系统遭受破坏和损失，这可能导致许多植物物种的数量减少或从某些地区消失。在模型中，可以考虑不同栖息地减少的程度，以了解其对物种数量和分布的影响。

3. 生物之间相互作用的影响：栖息地减少和污染可能导致生态系统中生物之间相互作用的变化。在模型中，可以考虑这些变化对生态系统稳定性和功能的影响。

总的来说，污染和栖息地减少等其他因素的影响需要纳入模型中，以更准确地预测植物群落的变化。同时，需要针对这些因素采取有效的环境保护措施，以减少它们对生态系统的负面影响

在这里，我们考虑这些因素对于环境容纳量的影响，当污染物浓度的增加，栖息地的减少等情况发生时，会导致环境容纳量的减少，从而导致生物的干旱适应性减弱。

## 6.1 污染因素

Macfarlane模型是一个经典的环境污染浓度与环境容纳量之间的数学模型，它可以用来预测环境污染浓度和环境容纳量之间的关系。其基本假设是环境污染浓度的增加会导致环境容纳量的下降。

Macfarlane模型的具体形式如下：

其中，C是环境污染浓度，E是环境容纳量，R是环境中的污染物输入速率，k是污染物的分解速率，m是污染物浓度对环境容纳量的影响系数，p是环境容纳量的增长速率，K是环境容纳量的极限值，q是污染物浓度对环境容纳量增长速率的影响系数。

这个模型中，第一个方程描述了环境污染浓度的变化，第二个方程描述了环境容纳量的变化。模型的含义如下：

• 第一个方程表示环境污染浓度的变化率等于环境中的污染物输入速率R减去污染物的分解速率kC，再减去污染物浓度对环境容纳量的影响mCE。

• 第二个方程表示环境容纳量的变化率等于环境容纳量的增长速率pE乘以(1-E/K)，再减去污染物浓度对环境容纳量增长速率的影响qCE。

这个模型可以通过数值方法求解，得到污染浓度和环境容纳量随时间的变化

## 6.2 栖息地减少因素

栖息地变化可以对环境容纳量产生重要的影响。为了建立一个数学模型来探讨这个问题，需要考虑以下参数：

初始栖息地大小：初始栖息地的大小对群落容纳量的影响很大，因为更大的栖息地可以容纳更多的生物物种。这个参数可以用面积或体积来衡量，具体取决于所研究的栖息地类型。

栖息地变化速率：栖息地变化的速率越快，群落容纳量的下降也会越快。这个参数可以用年变化率或其他适当的时间尺度来衡量。

栖息地剩余大小：栖息地的剩余大小取决于变化速率和时间。随着时间的推移，栖息地的剩余大小会越来越小，从而影响群落的容纳量。

生物物种的竞争关系：不同生物物种之间的相互作用可以影响群落的容纳量。例如，一些物种可能会通过竞争和捕食来影响其他物种的数量。

这些参数可以用一个简单的数学模型来表示：

其中，C表示群落的容纳量，S表示初始栖息地的大小，r表示栖息地变化速率， t表示时间。

在这个模型中，每个参数的影响可以通过适当的数学函数来表示。例如，初始栖息地的大小可以通过一个线性函数来表示，即C = aS，其中a是一个常数。类似地，栖息地剩余大小可以用一个指数函数来表示，即e = exp(-rt)，其中，r是栖息地变化速率，t表示时间。

# 7 模型的应用

## 7.1 保障可持续发展的措施

## 7.2 生态系统范围的扩大

# 8 模型的总结

## 7.1 优缺点

## 7.2 未来的工作

# References

1. Galimberti, A., Cena, H., Campone, L., Ferri, E., Dell'Agli, M., Sangiovanni, E., ... & Labra, M. (2020). Rethinking urban and food policies to improve citizens safety after COVID-19 pandemic. Frontiers in Nutrition , 7 , 181.
2. Horton, S. (2006). The economics of food fortification. The Journal of nutrition , 136 (4), 1068-1071.
3. Béné, C., Prager, S.D., Achicanoy, H.A.E. et al. Global map and indexes of food system sustainability. Sci Data 6, 279 (2019).
4. Lee, Y. D. (2014). Global Food Systems: Diet, Production, and Climate Change Toward 2050 (Doctoral dissertation)
5. Yang, X., Wu, Y., & Dang, H. (2017). Urban land use efficiency and coordination in China. Sustainability , 9 (3), 410.

# Appendix

## Appendix A

## Appendix B

MATLAB Program: Linear Programming Model Solving (China)

|  |
| --- |
| c=[0.0571;0.0839;0.0927;0.0378;0.0558;0.0579;0.0914];  a=[0,1,-0.1,1,0,0,0;0,0,0,0,-1,1,0;1,0,0,0,0,0,0;0,1,0,0,0,0,0;0,0,0,0,-1,1,0]; b=[-700;5;700;0.08;0];  aeq=[0,1,0,1,0,0,0];  beq=6000  [x,y]=linprog(-c,a,b,aeq,beq,zeros(7,1)) |

LINGO Program: Objective Programming Model Solving (China)

|  |
| --- |
| model:  sets:  level/1..3/:p,z,goal;  variable/1..2/:x;  h\_con\_num/1..1/:b;  s\_con\_num/1..4/:g,dplus,dminus;  h\_con(h\_con\_num,variable):a;  s\_con(s\_con\_num,variable):c;  obj(level,s\_con\_num)/1 1,2 2,3 3,3 4/:wplus,wminus;  endsets  data:  ctr=?;  goal=? ? 0;  b=12;  g=1500 0 16 15;  a=2 2;  c=200 300 2 -1 4 0 0 5;  wplus=0 1 3 1;  wminus=1 1 3 0;  enddata  min=@sum(level:p\*z);  p(ctr)=1;  @for(level(i)|i#ne#ctr:p(i)=0);  @for(level(i):z(i)=@sum(obj(i,j):wplus(i,j)\*dplus(j)+wminus(i,j)\*  dminus(j)));  @for(h\_con\_num(i):@sum(variable(j):a(i,j)\*x(j))<b(i));  @for(s\_con\_num(i):@sum(variable(j):c(i,j)\*x(j))+dminus(i)-dplus(i  )=g(i));  @for(level(i)|i #lt# @size(level):@bnd(0,z(i),goal(i)));  end |