
建设马赛马拉人类与野生动物共同的天堂

概括

每年，世界上最壮观的野生动物大迁徙，也就是人们口口相传的“马拉河穿越”，都会在肯尼亚的马赛马拉保护区上演。该保护区最初是为了保护野生动物和自然资源而设立的，但同时也不能忽视当地居民的利益。

在所有模型建立之前，我们对大量可信度较高的数据进行了清洗和可视化，这对我们后续的指标选取工作有很大的帮助。另外，我们对“失去的机会”和“负面相互作用”等模糊概念进行了精准的定义。

对于问题1，为了便于建模，我们结合马赛马拉目前的自然资源和野生动物分布状况，将马赛马拉粗略地平均划分为36个网格。对于每个网格，我们选择建立4个功能区之一：野生动物保护区、农业区、狩猎区或旅游区。为了平衡区域内野生动物和人类的利益，我们提出了生态效益和经济效益的概念和计算方法，并以二者的最大值作为目标函数。建立了模型一：基于双目标规划的马赛马拉资源配置策略模型。约束条件为：（1）生态效益的大小制约着功能区的类型；（2）游客数量的限制；（3）居民收入的保障等。使用Lingo计算了3个情景。以情景2为例：建立13个野生动物保护区，13个农业区，2个狩猎区，9个旅游区。

对于问题2，为了确定产生最佳效果的管理方案，我们开发了模型二：基于Dijkstra的最小交互模型和经济影响评估模型。我们指定四种类型的交互，类似于四个功能区之间的影响关系，并确定有向图中路径的权重。基于问题1的解决方案获得的3种方案，我们利用改进的Dijkstra算法，通过分别计算其最短路径来衡量每种方案的交互影响。同时，考虑到马赛马拉地区的经济发展水平，我们分别计算出这三种方案的经济效益为141,274.438美元、154,948.974美元和130,180.760美元（单位：百万）。结果表明，方案2具有最佳的交互性和经济效率。因此，方案2为最优。

针对问题3，我们开发了模型三：马赛马拉地区的长期趋势预测模型。我们首先预测了人与动物负面互动减少可能导致的游客数量增加。然后我们拟合了一个二次非线性回归方程来预测2010-2019年肯尼亚旅游收入与游客数量之间的关系，进而预测了旅游收入的变化。以COVID-19疫情为例，在测试长期预测结果的准确性时，我们使用了t检验并计算出p值小于0.05，表明肯尼亚在COVID-19疫情前后的旅游收入存在显著差异。COVID-19疫情被认为影响了旅游业。由于讨论了丰富的影响因素和特殊案例，我们的模型具有很强的适应性。我们在黄石国家公园研究了它的应用。

最后对指标权重的敏感性分析表明，我们的模型对指标权重的变化不敏感。在讨论了该模型的优点和改进措施之后，为肯尼亚旅游和野生动物委员会撰写了一份两页的非技术性报告，内容涉及马赛马拉的资源重新分配计划及其价值。

关键词：网格法；双目标规划；Dijkstra算法；非线性回归

内容

1. 介绍	3
1.1 背景	3
1.2 问题重述	3
1.3 文献综述	3
1.4 我们的工作	3
2. 假设与论证	3
3. 符号和定义	4
3.1 符号	5
3.2 定义	5
4. 数据	6
4.1 数据概述	6
4.2 数据收集	6
4.3 数据筛选与可视化	6
5. 问题 1	7
5.1 问题分析	7
5.2 模型准备	7
5.3 模型建立	8
5.3.1 根据野生动物分布状况进行分区	8
5.3.2 决策变量与约束条件的确定	9
5.3.3 目标函数的确定	9
5.4 模型求解	11
6. 问题 2	11
6.1 问题分析	11
6.2 模型的准备	12
6.2.1 模型的建立	12
6.2.2 模型的求解	13
6.3 经济影响评价模型	15
7. 问题 3	15
7.1 问题分析	16
7.2 旅游收入变化	16
7.2.1 农业变化	17
7.2.2 新冠疫情对旅游业的影响	17
7.2.3 政策实施	17
7.2.4 模型迁移可行性分析	18
7.2.5 模型改进及解决方案	18
8. 问题 4	19
8.1 模型的敏感性分析	20
8.2 模型的评估与扩展	23
8.2.1 点	23
8.2.2 模型的局限性	23
9. 参考文献	24
10. 附录	25

1.引言

1.1 背景

肯尼亚作为经济欠发达的非洲国家，将大量的财政收入用于建设保护区。同时，以野生动物观赏为主的肯尼亚旅游业是国家财政的一大来源。马赛马拉作为肯尼亚最著名的野生动物保护区之一，以其壮丽的草原和丰富的野生动物种类而闻名。如何制定保护区不同区域相关的政策，在保护野生动物和其他自然资源的同时，平衡区域内居民的利益，成为政府需要考虑的问题。

1.2 问题重述

对于问题1，需要考虑是否针对现有保护区的不同区域改进具体的政策和管理策略。在考虑新的政策和管理策略时，需要平衡生态效益和经济效益，同时避免对因旅游而来保护区的人们造成负面影响。

对于问题2，我们需要确定哪些政策和管理策略最有效。我们需要建立一个模型来对任务1的结果进行排序和比较。排序和比较的原则包括该政策下的动物与人类的互动是否大多是积极的，以及它们是否对保护区及其周边的经济产生积极影响。

对于问题3，我们需要预测任务1中提出的规划对未来发展的影响，分析相应政策和管理策略的效果，以及这些管理策略应该如何应用到其他自然保护区中。

对于问题4，我们需要向肯尼亚旅游和野生动物委员会提供一份非技术报告。在报告中，我们需要描述我们提出的计划，并分析该计划对马赛马拉保护区的影响和价值。

1.3 文献综述

学者们对马赛马拉自然保护区的分区和周边产业发展进行了大量研究。Bob E.L. Wishitemi等人研究了肯尼亚马赛马拉保护区周边地区贫困、环境和生态旅游发展之间的联系^[1]。Kathleen Krafte Hollanda等人分析了旅游业对肯尼亚马赛马拉国家保护区周边保护支持、当地生计和社区恢复力的影响^[2]。J. O. Ogutu等人分析了1977年至2009年间肯尼亚马拉地区野生动物种群的变化^[3]。薛帆以戴云山国家级自然保护区为例，分析了自然保护区规划设计的网络选择算法^[4]。

1.4 我们的工作

为了避免复杂的描述，直观的反映我们的工作流程，流程图如下图1所示：

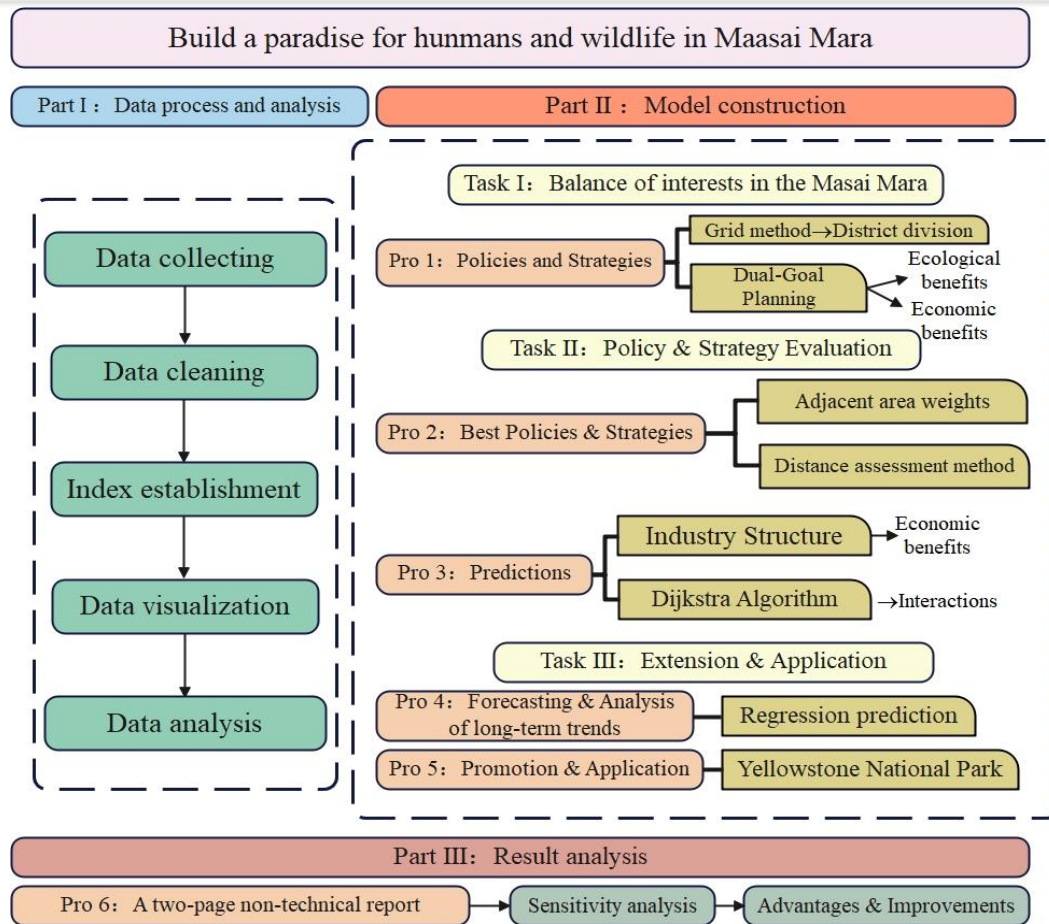


图 1. 我们的工作

2. 假设与依据

为了简化问题，我们做出以下基本假设，每个假设都是合理的。

假设1：本文中所有数据来源真实可靠。

理由：我们需要依赖马赛马拉及其周边地区的历史数据来分析该地区的经济、气候和生物多样性趋势，因此数据的可靠性非常重要。

假设2：未来50年内马赛马拉及其周边地区不会发生重大自然灾害。

理由：地震、泥石流、海啸等自然灾害属于不可抗力因素，我们无法准确预测或量化它们对模型稳定性的影响。

假设3：马赛马拉地区的人与自然之间的平衡并不受我们讨论过的影响之外的其他因素的支配。

理由：我们已尽可能预见到可能影响问题的相关因素，并说明其他因素的影响几乎不存在的原因。因此，为了简化模型，我们可以做出上述假设。

假设4：对于马赛马拉划分的36个区域，可以假设每个小区域内的环境、经济和其他条件都是相同的。

理由：对马赛马拉地区分区的合理理想化。假设该地区的条件相同，有助于我们计算相关的收益和成本。

假设5：对于马赛马拉地区部分难以获取的数据，可以用肯尼亚的数据替代。

理由：由于难以获取马赛马拉部分地区的数据，我们不得不用肯尼亚的相关数据替代，但基于已知数据的相似性，我们可以得出结论，这种做法对我们模型准确性的影响在合理的误差范围内。

· 注：下面将展示博弈论模型的相关假设。

3.符号和定义

3.1 符号

表 1. 符号

Notations	Descriptions
X_j	Whether to build a nature reserve in the j-th geographical area
V_x	Ecological benefit value
E_i	Power generation of the i-th hydropower station
P_j	Number of people in the j-th geographic area
P	The intensity of human-animal interaction
Q_{ix}	Construction of protected areas when implementing the i-th program

· 注：部分变量未列出，其具体含义将在下文介绍。

3.2 定义

题目描述中出现了一些模糊的概念，我们对这些可能产生歧义的单词或句子进行精确的定义。

资源：原文提到*the resources within and outside the current boundaries of the park*，我们在此将资源视为野生动植物（生物多样性）、植被资源、水资源、土地资源等生态价值。

失去的机会：原文提到*the impacts of lost opportunities experienced by the people who live near the preserve*。我们认为这里失去的机会是指由于保护区的存在，人们不得不失去一些可耕地。饲养的牲畜和他们自己的生命可能会免受一些危险的大型野生动物的伤害。

保护区吸引的人群：原文中提到*minimize negative interactions between animals and the people attracted to the preserve*，我们这里将保护区吸引的人群定义为从肯尼亚前往马赛马拉的国内外游客（不包括当地居民）。

负面互动：我们在这里将负面互动分为两类。

第1类（人类→野生动物）：部分游客可能会给野生动物喂食不洁食物。此外，还可能存在一些非法偷猎者。

第2类（野生动物→人）：一些游客在参观期间可能会被大象、狮子等危险的大型野生动物伤害。

4.数据

4.1 数据概览

问题并没有直接提供给我们数据，所以我们需要考虑在模型构建中需要收集哪些数据。通过问题的分析，我们需要收集马赛马拉的数据，比如动物种类、地质条件、气候条件、水文条件等信息。除此之外，还要收集该地区居民的经济状况和生活水平等。

由于数据量很大，不方便全部列出，所以将数据可视化进行展示是一个好的方法。

4.2 数据收集

我们从参考文献中收集了大量有用的数据。其他数据来源如表2所示。

表 2. 数据和数据库网站

Database Names	Database Websites
GDP&Employment	https://insights.ceicdata.com/Untitled-insight/views
Laws	http://kenyalaw.org/kl/index.php?id=3329
Terrain and species	https://www.masaimara.travel/maps.php#concervancy-map
Climate & Weather	https://zh.weatherspark.com/
Toursim	https://www.bea.gov/data/income-saving/personal-income-by-state;
	http://data.un.org/Default.aspx;
	http://data.un.org/DocumentData.aspx?id=481

注：未列出的数据来源在引用时将会标注。

4.3 数据筛选与可视化

我们对收集到的数据进行了统计分析，并剔除了异常值。下图展示了对无聊数据的可视化。

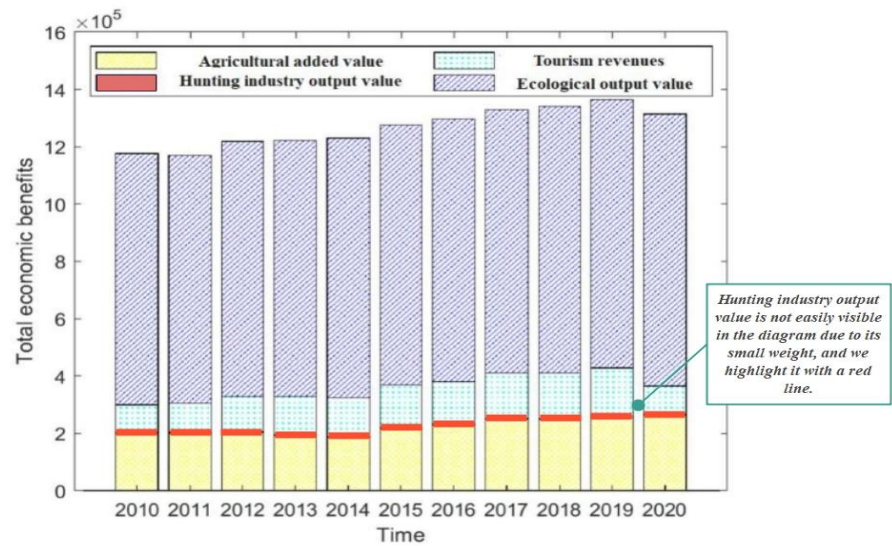


图 2. 数据可视化

其他数据的可视化如下所示。

5.问题1

5.1 问题分析

在问题1中，我们需要确定针对保护区内自然资源和野生动物的保护以及附近居民的经济利益的具体政策和管理策略。我们计划制定一个双重目标规划模型来划分马赛马拉自然保护区的区域，并建立一系列约束条件来实现这一目标。

5.2 模型准备

我们的模型中涉及到生态效益和经济效益的计算，具体如下：

(1) 经济效益计算

对于旅游收入，我们可以通过考虑游客数量、旅游时间、旅游费用等因素来计算。

$$Tr = Nt * Als * Ads * Lts \quad (1)$$

其中， Tr :旅游收入; Nt :游客人数; Als :平均停留日数; Ads :平均每日花费;; Lts :旅游季时长。

对于其他地理区域带来的经济效益，我们主要通过查找全国对应产值的数据，再根据该区域所覆盖的面积估算出大致的产值，对应指标的解读及数据来源如下：

捕猎业产出：即使是自然保护区也需要设立狩猎区来维持生态平衡，如肯尼亚的非洲象已基本失去了天敌，如果不进行人为捕猎，可能会破坏生态平衡[7]。对于国家来说，狩猎业的产值主要是合法的狩猎收入，人们猎捕野生动物后需要向国家缴纳相应的税收。

农业产出：这里的农业产出主要是指农作物生产所产生的经济收益，我们可以通过观察肯尼亚近几年农业对GDP的贡献来了解。

旅游产出：这主要指肯尼亚通过旅游业获得的收入，这是我们通过查阅肯尼亚旅游局和肯尼亚旅游报告的信息得出的。

· 注：具体数据值详见附录。

(2) 生态效益核算

为了便于在同一尺度上比较这些生态指标，我们对这些数据进行了归一化处理。对于植被覆盖度，我们可以将其归一化到[0,1]范围内。具体来说，我们可以先确定最小值和最大值，然后使用以下公式对其进行归一化：

$$Nvc = (Vc - MinVc) / (MaxVc - MinVc) \quad (2)$$

其中， Nvc :归一化植被覆盖度； Vc :植被覆盖度；

$MinVc/MaxVc$:最小/最大植被覆盖率。

对于动物种类和数量，我们可以考虑按照稀有程度对不同种类的动物进行加权，以便在同一尺度上进行比较。例如，我们可以将狮子的权重设置为1，大象设置为0.8，斑马设置为0.5，羚羊设置为-0.3，长颈鹿设置为0.4。然后，我们可以使用以下公式进行归一化。

$$Nai = (Asw * Na) / Sta \quad (3)$$

其中, Nai : 归一化动物指数; Asw : 动物物种重量; Na : 动物数量; Sta : 动物总数。

则生态效益计算如下:

$$V_x = B_1 * A_x + B_2 * P_x \quad (4)$$

其中, V_x : 保护区生态效益; B_1 : 动物权重; B_2 :

: 植物权重; A_x : 保护区标准化动物指数; P_x :

保护区标准化植被覆盖度。

本文计算时, 由于马赛马拉自然保护区位于草原地带, 我们假设各区域的植被覆盖度大致相同, 在计算各区域归一化动物群指数时, 我们参考了马赛马拉国家保护区内的大致动物群分布情况, 如图3所示。

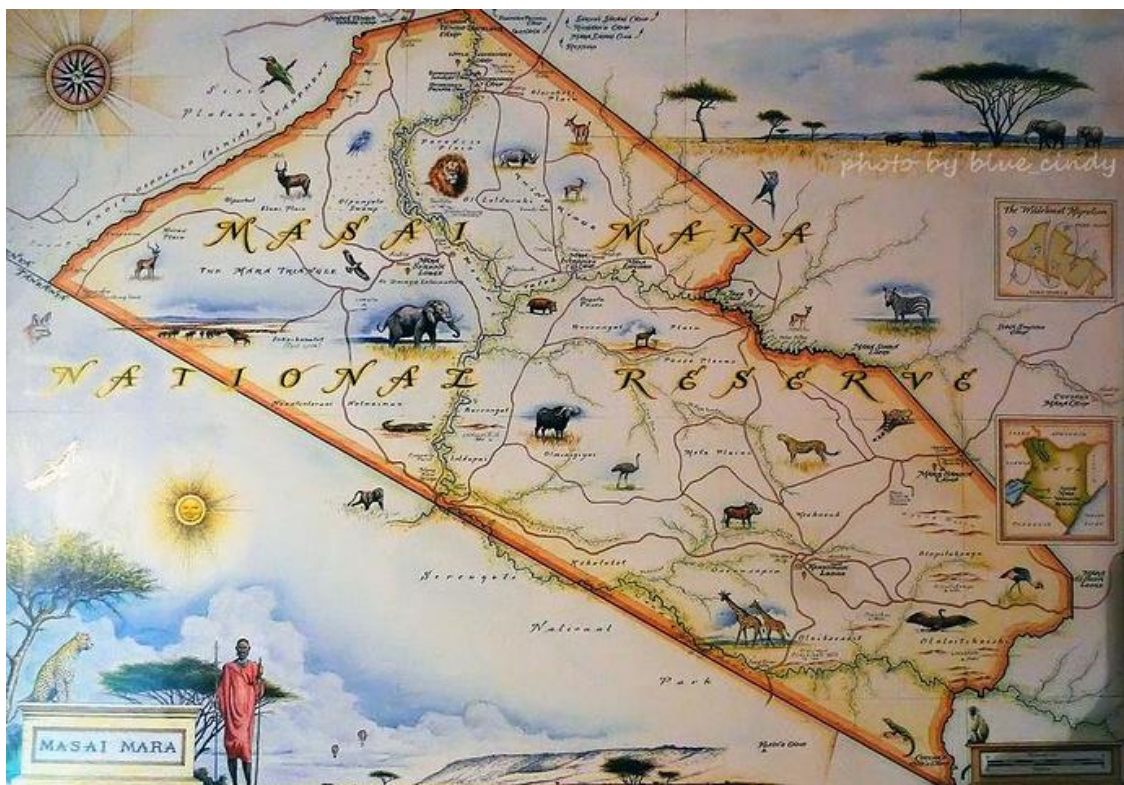


图3.马赛马拉国家公园野生动物分布

公园

5.3 模型的建立

5.3.1 根据野生动物分布状况进行分区

为了方便后续对不同区域进行划分分析, 并简化计算, 根据查阅的资料^[5], 我们将马赛马拉保护区划分为36个等距网格, 每个网格的面积为马赛马拉国家公园总面积除以36, 即50 km², 如图4所示。

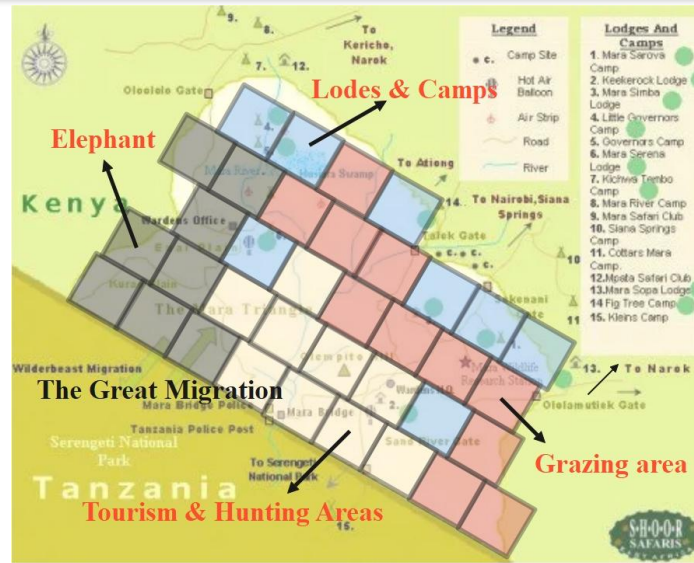


图4.网格划分

5.3.2 决策变量和约束条件的确定

在5.2.1节中我们根据野生动物的分布情况划分了36个区域。（1）首先我们需要构建一个0-1规划模型来确定这36个区域的建筑用途。设置决策变量如下：

表 3. 决策变量及其含义

Decision variables	Definitions
$X_j (X_j = 0, or 1)$	Conservation measures for the wildlife species in the j-th geographic area. When $X_j=1$, it means that the i-th species takes conservation measures in the j-th region, and when $X_j=0$, it means that the i-th species does not take conservation measures in the j-th region. The following decision variables Y_j , Z_j and W_j are the same.
$Y_j (Y_j = 0, or 1)$	Whether to build a hunting and gathering restricted area in the j-th geographical area.
$Z_j (Z_j = 0, or 1)$	Whether to build a tourism development zone in the j-th geographical area.
$W_j (W_j = 0, or 1)$	Whether to establish an agricultural expansion area in the j-th region. If an agricultural expansion area is built on this site, it should occupy no more than 50% of the area in order to ensure sufficient area for animals to survive.

在不同的地理区域中，只能选择一种建设用途，例如，如果某个区域用于建设保护区，则它不能同时用于建设狩猎区，对于任何相等的 j ，即：

$$X_j + Y_j + Z_j + W_j = 1 \quad (5)$$

由于马赛马拉国家公园的主要目的是保护野生动物，因此保护区的数量应该多于其他区域的数量，即：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{36} X_j \geq \sum_{j=1}^{36} Y_j \\ \sum_{j=1}^{36} X_j \geq \sum_{j=1}^{36} Z_j \\ \sum_{j=1}^{36} X_j \geq \sum_{j=1}^{36} W_j \end{cases} \quad (6)$$

(2)首先我们需要按照5.2节生态效益的计算方法，计算出图4中不同区域的近似生态价值 V_x ，再根据 V_x 的值，判断该地理区域适合建设哪种建筑用途。具体来说，当第 j 个区域的 V_x 大于0.5时，表示这个区域动物密度较大，适合建设保护区；当 $0.4 \leq V_x \leq 0.5$ 时，动物密度稍低，适合建设旅游区供人们欣赏；当 $V_x < 0.2$ 时，再考虑在这个区域内抽出一部分面积用于扩张农业。将此转化为约束，对于任何相等的 j ，即

当 $0.5 < V_x$ 时：

$$\begin{aligned} X_j &\leq 1 \\ Y_j, Z_j, W_j &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

当 $0.4 \leq V_x \leq 0.5$ 时：

$$\begin{aligned} X_j + Y_j &\leq 1 \\ Z_j, W_j &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

当 $0.2 \leq V_x < 0.4$ 时：

$$\begin{aligned} X_j + Y_j + Z_j &\leq 1 \\ W_j &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

当 $V_x < 0.2$ 时：

$$X_j + Y_j + Z_j + W_j \leq 1 \quad (10)$$

(3)另外，还应限制旅游区的游客数量，避免人数过多扰乱野生动物栖息地。肯尼亚旅游局的数据显示，每年到访马赛马拉的游客数量约为15万人^[6]，每天约有410人。而每天入住酒店的人次约有40人。假设酒店均匀分布在各个旅游区，我们可以假设每个旅游区有40人到访。根据以上数据，我们可以得出旅游区人数的约束条件：

$$\sum_{j=1}^{36} Z_j * 40 \leq 410 \quad (11)$$

(4)同时，我们还需要兼顾当地居民的利益，因此需要设置相关变量如下：

表4 变量及其含义

Variables	Definitions
V_{jx}	Ecological benefit from building the j-th protected areas
V_y, V_z, V_w	Economic value from building hunting areas, tourist areas, agricultural expansion areas

根据（2）中的描述，不同区域的 V_x 会有所不同。为简化计算，我们假设相同建设类型的其余区域的 V_y 、 V_z 和 V_w 相同。其中 V_y 、 V_z 和 V_w (经济效益)的计算方法详见5.2节。代入肯尼亚2022年相关数据，计算得出农业区单位面积价值为4,786,900美元/年，狩猎区单位面积价值为151,000美元/年，人均每日消费为364美元。结合每个旅游区的每日游客人数和不同区域的面积，我们可以计算出：

V_y = 每年 755 万美元, V_z = 每年 1,328.6 万美元, V_w = 每年 119.6725 亿美元

考虑到 V_y, V_z, V_w 中一部分分配给政府, 一部分分配给当地居民, 我们假设 V_{1y}, V_{1z}, V_{1w} 为分配给政府的利润, V_{2y}, V_{2z}, V_{2w} 为分配给当地居民的利润, 即:

$$\begin{aligned} V_1 &= V * r_1 \\ V_2 &= V * r_2 \\ r_1 + r_2 &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

其中, r_1, r_2 分别为政府获得的利润分配比例和居民获得的利润分配比例。参考地方税率, r_1 约为0.2, r_2 约为0.8。

为了平衡当地居民的利益, 我们需要保持居民的收入不低于人均收入水平。通过查找资料^[6], 我们得知肯尼亚的人均收入约为每年2082美元, 即。

$$\frac{\sum_{i=y,z,w} V_{2i}}{\sum_{j=1}^{36} P_j} \geq 2082 \quad (13)$$

其中, P_j 为第 j 个地理区域的人数, 参考当地人口分布获得。

5.3.3 目标函数的确定

该自然保护区的建立是为了保护该地区的动物和自然资源, 因此我们设立了一个最大化生态效益的目标函数, 即:

$$\max \sum_{j=1}^{36} X_j V_{jx} \quad (14)$$

此外, 为了平衡区域内居民的利益, 还应使保护区及其周边的经济效益尽可能大。我们假设建设不同分区的成本相同, 即:

$$\max \sum_{j=1}^{36} (Y_j V_y + Z_j V_z + W_j V_w) \quad (15)$$

5.4 模型求解

我们采用了lingo进行求解, 具体求解算法如下:

由于我们建立了双目标规划模型, 求解结果表明不存在最优解, 较好的解有三种方案, 分别为(数字表示对应建设目的所采用的细分数):

表5 求解得到的最优解

Construction use / Quantity	Scenario1	Scenario2	Scenario3
Tourist area	8	9	10
Agricultural expansion areas	11	12	10
Hunting area	6	2	4
Wildlife Sanctuary	11	13	12

6.问题2

6.1 问题分析

在本问题中，我们需要建立一个综合评价模型来确定哪种分区策略最好，需要分析哪种策略在保护区及其周边地区具有尽可能低的人与动物的相互作用和尽可能大的经济效益。6.2.基于Dijkstra算法的最小相互作用模型。

6.2 模型准备

首先，我们需要确定与动物的互动具体有哪些类型。本文中，我们需要考虑的动物与人互动类型如下表所示：

表6. 人与动物的四种相互作用

Behavior	Explanation
Tourist ornamental animals / Animal attacks on tourists	Excessive disturbance by tourists can also have a negative impact on the animals, for example by disturbing their rhythm of life or causing them to become frightened. In addition, attacks by animals on people staying or camping near the reserve have been known to occur.
Artificial rearing and feeding	Some sanctuaries may raise or feed animals in captivity to ensure their health and survival in order to facilitate visitors' viewing of animals. However, such practices may also lead to animals becoming dependent on humans and losing their natural survival instincts.
Animal attacks on humans or domesticated livestock	In the Masai Mara, there are often cases of animal attacks causing crop damage, livestock loss and human casualties in the Masai Mara National Park.
Hunting and poaching	Some illegal hunting, poaching, and vandalism can cause wildlife populations to plummet.

从上表可知，当动物栖息地距离人类居住地过近时，可能会产生一系列的负面影响。因此，我们采用距离评估法来衡量人与动物相互作用的影响。我们利用这四个区域的相对距离来计算人与动物的相互作用，并使用Dijkstra算法建立模型，寻找每个动物保护区与每个人类活动区之间的总距离最大（即相互作用可能性最小）的分区方案，从而降低野生动物袭击人类和家畜的可能性。

举例来说，野生动物保护区和旅游区之间的最短距离定义如下。

$$\text{最短距离} = \text{最短距离}_{pq} (p \in \text{野生动物保护区和 } q \in \text{旅游区}) \quad (16)$$

其中, p 为野生动物保护区边界上的点, q 为旅游区边界上的点。参考情景 1, 马赛马拉自然保护区重新划分前后野生动物保护区与旅游区之间的最短距离如图 5 和图 6 所示。

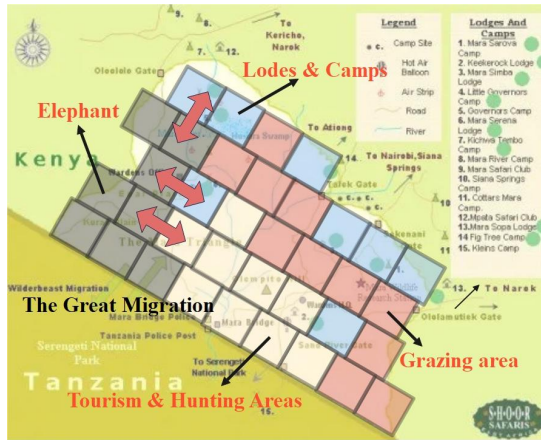


图 5. 初始状态最小距离

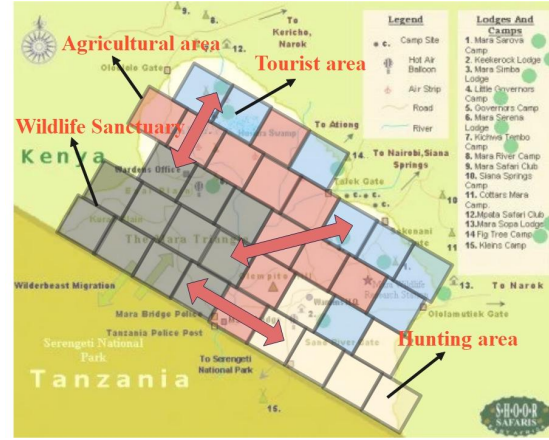


图 6. 场景 1 最短距离

当野生动物保护区与旅游区之间的最小距离增大时, 游客与一些危险的大型野生动物接触的机会就减少了, 这些动物袭击游客的可能性也随之降低, 在一定程度上减轻了野生动物与游客之间互动带来的负面影响。

6.2.2 模型的建立

首先, 我们将保护区抽象为一个无向图, 每类保护区为图中一个节点, 网格边长 d 表示相邻保护区之间的距离。然后, 通过计算节点间的最短路径长度来衡量不同保护区之间的距离, 从而评估不同保护区之间人与动物相互作用的影响。具体建模过程如下。

(1) 无向图的构建。

设保护区分为自然保护区 (x_i)、狩猎区 (y_i)、农业区 (z_i) 和旅游区 (w_i) 四种类型, 可表示为无向图 $G(V, E)$ 中的节点, $V = \{x_i, y_i, z_i, w_i\}$, E 表示边的集合, 表示节点间的连接关系。边的权重可以表示节点间的距离, 可根据实际情况确定。为了建模方便, 我们假设相邻节点间的边长相同, 为 d 。

(2) 考虑相互作用的影响。

考虑到人与动物相互作用的影响, 可以对不同节点之间的边赋予不同的权重, 权重的大小可以反映人与动物相互作用的强度。根据查阅的一些资料, 我们设置了各类区域之间的权重, 如表所示。权重越大, 两类区域之间的距离越远。

表 7. 不同区域之间的权重

	Nature Reserves	Hunting area	Agricultural area	Tourist area
Nature Reserves		1	0.5	0.8
Hunting area	1		0.2	0.4
Agricultural area	0.5	0.2		0.6
Tourist area	0.8	0.4	0.6	

(3) 人与动物互动的建模。

考虑到人与动物互动的强度可能受到多种因素的影响，可以采用线性回归模型来模拟人与动物的互动，互动强度越低越好。公式如下。

$$P = \sum_{(i, j) \in E} d_{ij} \times w_{ij} + \sum_{n=1}^3 b_n w_n \quad (17)$$

其中， P 表示人与动物相互作用的强度； E 表示保护区组成的无向图的边集合； i, j 分别表示无向图中两个相邻节点； $d(i, j)$ 表示节点 i 和节点 j 之间的距离，可以用最短路径长度来表示； $w(i, j)$ 表示节点 i 和节点 j 之间的权重，用来反映人与动物相互作用的影响； $b_1 \sim b_3$ 表示其他因素的系数； $w_1 \sim w_3$ 表示其他因素的权重。这些其他因素包括环境因素、气候因素、人口密度等。

(4) 计算最短路径

我们使用Dijkstra算法，按照如下过程计算不同节点之间的最短路径长度。

Algorithm 2: Dijkstra's Algorithm

Input: $u; v; s; S; V$

Output: $\text{new_}d(v) \& d(v')$

1. **Let** S be the set of explored nodes. **do**
2. **For each** $u \in S$, we store a distance $d(u)$
3. **Initially** $S = \{s\}$ and $d(s) = 0$
4. **While** $S \neq V$
5. Select a node $v \notin S$ with at least one edge from S for which
6. $d'(v) = \min_{e=(u,v): u \in S} d(u) + l_e$ is as small as possible
7. Add v to S and define $d(v) = d(v')$
8. **结束**

Repeat steps 4 and 5 until all nodes are marked as visited, or the target node is found.

6.2.3 模型求解

我们利用MATLAB进行求解，结果显示场景2导致人与动物的互动最少，此时具体划分如图7所示。

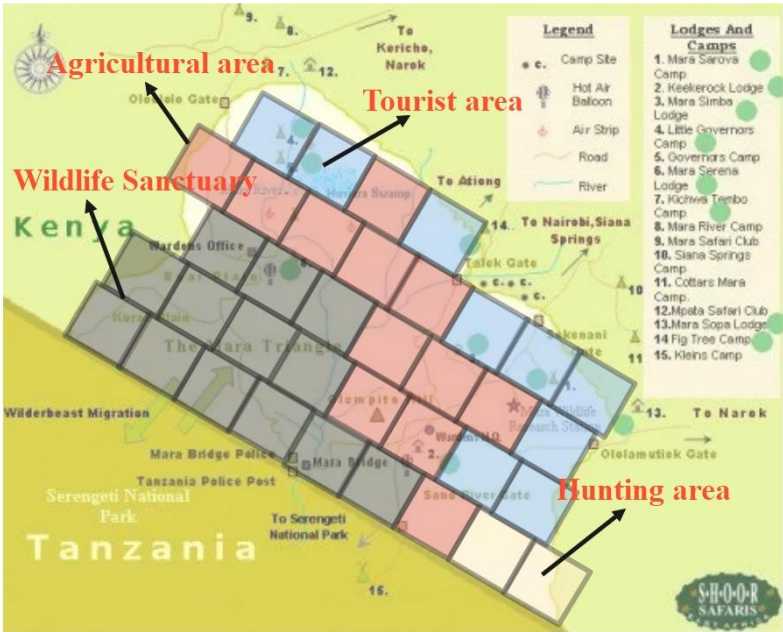


图7 场景2分区情况

6.3 经济影响评价模型

根据5.3.2计算，建设狩猎区、旅游区、农业扩展区的经济价值为：

V_y = 每年 755 万美元， V_z = 每年 1,328.6 万美元， V_w = 每年 119.6725 亿美元

然后我们代入肯尼亚2022年的数据，得到自然保护区单位面积（1km²）的价值为17,242,130,000美元，即保护区 V_x 的生态价值（区别于生态效益）为8.621亿美元。

不同情景下总经济价值 E_i 的计算公式为：

$$E_i = Q_{ix} * V_x + Q_{iy} * V_y + Q_{iz} * V_z + Q_{iw} * V_w \tag{18}$$

其中， Q_{ix} ， Q_{iy} ， Q_{iz} ， Q_{iw} 分别是实现不同场景时需要构建的不同分区的数量。

代入问题 1 的结果，可得出不同情景下获得的经济价值如下。

表8 不同方案的经济价值

Plan	Economic Value
Scenario1	141274.438million
Scenario2	154948.974million
Scenario3	130180.760million

从结果来看，方案二带来的经济收益最大，而从6.2中的计算可知，方案二带来的人与动物的负面互动最少，因此方案二为最优策略。

7.问题3

7.1 问题分析

在这个问题中，我们需要衡量政策变化给马赛马拉公园带来的变化。首先，我们需要确定政策实施前一些行业的总体情况，然后在此基础上预测政策实施带来的变化。然后，我们还需要分析一些因素的影响，比如新冠疫情可能带来的不确定性。最后，我们会分析政策实施对整个国民经济可能带来的影响。7.2 最优政策下保护区的长期发展。

7.2.1 旅游收入变化

政策实施之后，马赛马拉不同区域的运作方式将与之前有所不同。正如我们在6.3.2中提到的，核心保护区与旅游业正在发展的区域（包括一些游客住宿酒店地点）之间的距离增加，将导致一些可能发生的野生动物袭击游客的事件减少，从而在一定程度上吸引更多的人前往该地区。游客数量的增加最直观的体现就是旅游收入的增加。为了更准确地描述游客数量与旅游收入之间的关系，我们收集了2010-2019年的数据（由于2020年旅游业受到新冠疫情的影响，我们将在下一节进行进一步的分析），这些具体数据在附录中呈现。我们分别进行了以游客数量为自变量 x 、以旅游收入为因变量 y 的线性回归和用二次曲线拟合的非线性回归。

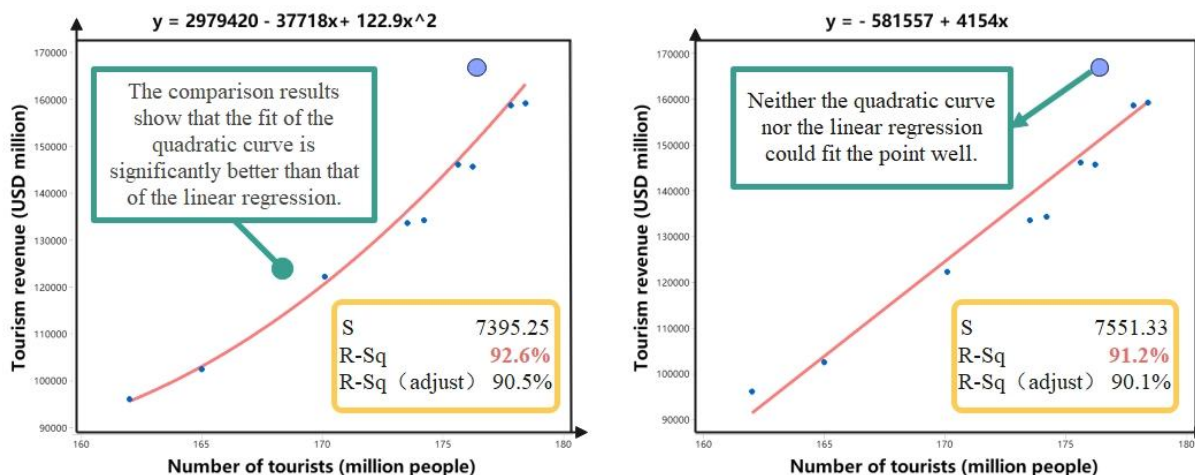


图8 不同方程的拟合效果

拟合结果显示，二次曲线拟合方程的 R^2 为0.926，一元线性回归方程的 R^2 为0.912，说明二次非线性回归效果较好；此外，参数检验结果表明，回归方程的系数均通过检验，拟合效果良好。

$$y = 2979420 - 37718x + 122.9x^2 \quad (19)$$

肯尼亚旅游局报告称，肯尼亚最著名的国家公园马赛马拉是所有前往肯尼亚旅游的游客的首选目的地，因此我们估计该政策实施后前往肯尼亚旅游的人数将增加 1%

与前几年相比（之前每年增长约0.3%）以2019年（176.2万人次、1.678亿美元旅游收入）为基线，不受新冠疫情影响，未来三年游客量分别约为178万人次、179.7万人次、181.5万人次，代入回归方程，此时的旅游收入分别为1.5979亿美元、1.70193亿美元、1.82205亿美元，与2019年的旅游收入相比，实现了较大幅度的增长。

7.2.2 农业的变化

本政策中的农业，广义上指农业（包括畜牧养殖）。动物袭击造成农作物受损、牲畜损失、人员伤亡的事件在马赛马拉国家公园屡见不鲜。随着政策的实施，农业区与保护区之间的距离将有所缩短，从而减少因野生动物袭击牲畜等情况造成的损失。

7.2.3 新冠疫情对旅游业的影响 主义

我们收集了新冠疫情前三年（2017年至2019年）和新冠疫情爆发三年（2020年至2022年）前往肯尼亚的旅行者人数数据，如表9所示。

表 9. 新冠疫情前后肯尼亚的旅客数量

Year	Number of visitors (million)	Year	Number of visitors (million)
2017	177.8	2020	77.4
2018	178.4	2021	65.2
2019	176.2	2022	130

我们对新冠疫情爆发前后的数据进行了t检验，结果如下。

表 10. T 检验结果

	Group (mean±standard deviation)		<i>t</i>	<i>p</i>
	Pre-covid-19 (n=3)	After the covid-19 (n=3)		
Number of tourists	177.47±1.14	90.87±34.44	4.354	0.049*

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

检验结果显示，新冠疫情对于游客数量的影响在0.05水平上表现出显著性（ $t=4.354$ ， $p=0.049$ ），且具体的比较差异表明，新冠疫情前的均值（177.47）会显著高于新冠疫情后的均值（90.87）。

这表明一些不可抗力因素会对我们的长期趋势预测结果造成一定影响，比如流行病导致旅游业萎缩。

7.2.4 政策实施的长期影响

我们的方案保证了该地区的生态效益、当地居民的经济效益，同时最大限度地减少了人与动物之间的负面互动。一旦动物袭击人类的事件减少，就意味着周围的农业和畜牧业将发展得更快，来该地区的游客数量将增加，旅游收入也将增加。这些产业价值的增加将推动

国家经济，这反过来又会产生更多的资金来投资野生动物保护，形成良性循环。

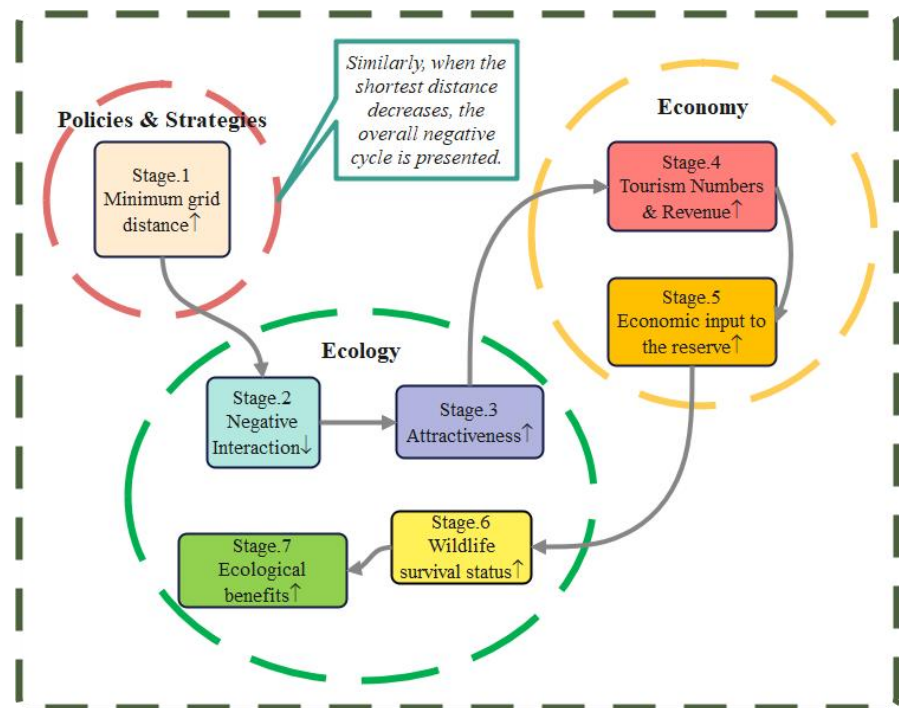


图 9. 该政策的长期影响

7.3 模型迁移：黄石国家公园

7.3.1 模型迁移可行性分析

我们的模型以世界上第一个国家公园黄石国家公园作为迁徙的对象，通过收集黄石国家公园和马赛马拉的相关数据，确定模型迁徙的可行性。

表 11. 黄石国家公园和马赛马拉

	Yellowstone National Park	Masai Mara
Land area	Approx. 8983.49 km ²	Approx. 1800 km ²
Location	The border of Wyoming, Montana and Idaho, USA	Oloomimutiek Gate Masai Mara,Narok
Establishment time	1972.3.1	-----
Climate	Highland mountain climate	Tropical grassland climate
Level	World Natural Heritage, U.S. National Parks	National level
Ticket Price	\$25/car, \$12/person	1400Ksh/person
Opening time	Open basically all year round	Open year-round, all day
Resources	69 species of mammals, inhabited by American bison, white-tailed deer, gray wolves, brown bears, moose, horse deer,bighorn sheep, antelope,antelope,North American grizzly bears, cougars and other wildlife.	The five beasts of Africa: elephant,lion,leopard,rhinoceros andbuffalo.The uncountable antelopes,giraffes, hippos, baboons and wolves.

· 数据来源： <https://yellowstone.net/> & www.maasaimara.com/

从上表我们可以看出，黄石国家公园和马赛马拉在很多方面有很多相似之处。同时它们又各有特色。这为我们的迁徙模型奠定了基础。

7.3.2 模型改进及解决方案

通过以上分析，验证了我们的模型在黄石国家公园应用的可行性。该地区的地形条件和物种分布如图10和图11所示。

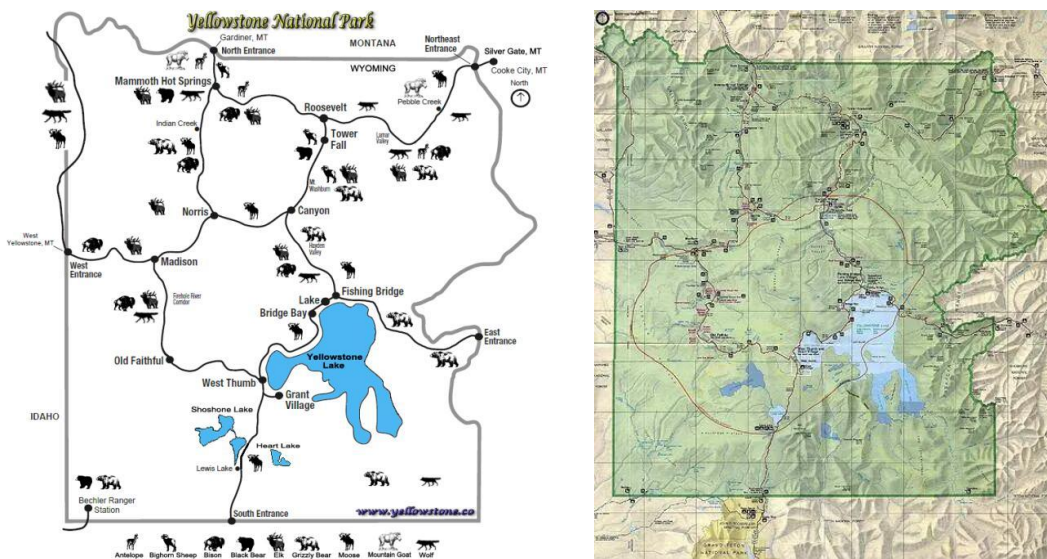


图10. 黄石国家公园野生动物分布（左）图11. 黄石国家公园地形（右）

考虑到黄石国家公园和马赛马拉地区在经济、环境和生物多样性方面的差异，我们对问题 1 中的约束条件进行了如下修改。

(1) 对于约束条件 (3)，我们需要考虑黄石国家公园所在地附近的美国公民的平均收入。由于黄石国家公园主要位于怀俄明州，部分位于蒙大拿州和爱达荷州。我们咨询了这三个州 2020-2021 年的人均收入：

表 12. 2020-2021 年人均收入

State	2020	2021
Wyoming	\$61855	\$65627
Montana	\$53361	\$56672
Idaho	\$48759	\$51379

数据来源：<https://www.bea.gov/data/income-saving/personal-income-by-state>;
<http://data.un.org/Default.aspx> ;

另外，鉴于黄石国家公园约 96% 的土地面积位于怀俄明州境内（65,627 美元），2021 年美国人均收入为 65,133.7 美元。因此，约束 (3) 修改为：

$$\frac{\sum_{i=y,z,w} V_{2i}}{\sum_{j=1}^{36} P_j} \geq 65627 \quad (20)$$

(2) 对于约束条件(4)，我们重新考虑黄石公园的游客数量。2018-2020年，黄石公园全年接待游客人数分别为411万人、402万人、408万人。取平均值，计算得出黄石公园日均接待游客人数为10904人。基于以上分析，我们得到：

$$\sum_{j=1}^{36} Z_j * 40 \leq 10904 \quad (21)$$

通过这种方式，我们得到了黄石国家公园自然资源综合利用的模型，采用同样的方法，最终对黄石国家公园的划分如图13所示。

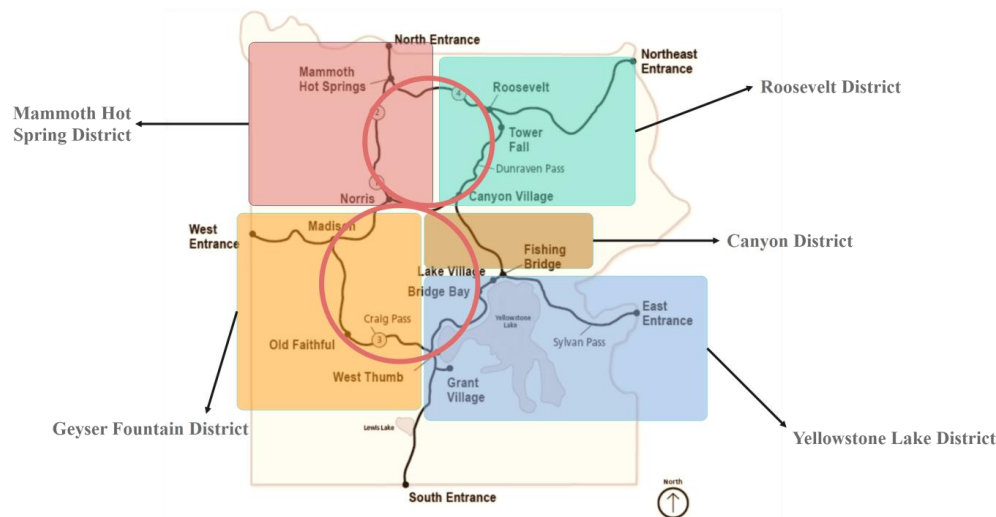


图 13.黄石国家公园分区

我们将黄石公园划分为五个区，分别是：猛犸温泉区；间歇泉区；黄石湖区；峡谷区；罗斯福区。

针对黄石公园与马赛马拉管理政策的差异，我们分析了以下可能的原因。

动物大迁徙：每年6月至10月，坦桑尼亚的马赛马拉和塞伦盖蒂大草原都会经历动物大迁徙。黄石公园由于属于封闭性质，不会发生类似的大规模迁徙。

经济发展：根据世界银行2022年发布的最新统计数据，肯尼亚2021年的GDP为1103.47亿美元，比2020年增长9.62%，位居世界第61位。美国以22.94万亿美元的GDP排名第一，同比增长6%。因此，黄石国家公园可以更加专注于野生动物保护。

历史起源：世界上第一个国家公园黄石国家公园于1872年3月1日正式命名，马赛马拉保护区则于1961年成立。相比之下，历史悠久、法律法规和管理经验相对更加成熟。

8.问题4

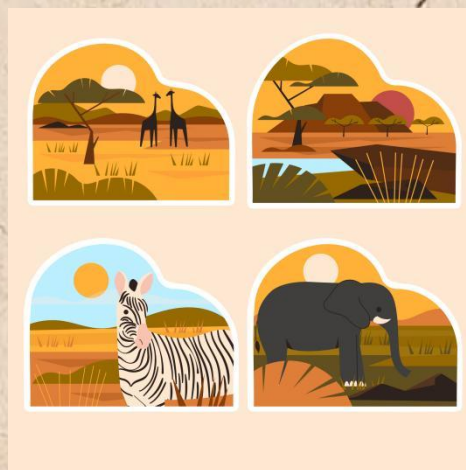
我们为肯尼亚旅游和野生动物委员会撰写了一份非技术报告。

Dear Kenyan Tourism and Wildlife Committee :

肯尼亚是全球公认的看非洲野生动物最好的国家，在马赛马拉野生动物保护区，非洲五霸——非洲象、犀牛、野牛、狮子和猎豹随处可见；在纳库鲁湖国家公园，红色的火烈鸟成群翱翔在蓝天碧水中；在安博塞利国家公园，海明威笔下的乞力马扎罗山倒映在绿草如茵的大地上……这里最为著名的是每年6月中旬到9月的动物大迁徙。

肯尼亚除了每年的动物大迁徙之外，还有雄伟的山脉、洁白的沙滩、丰富多彩的赤道自然风光和宜人的春天般的气候，吸引着来自世界各地的游客。

马赛马拉是肯尼亚最著名的野生动物保护区之一，以其壮丽的草原和丰富的野生动物种类而闻名。充分利用自然保护区的资源，在保护野生动物的同时发展旅游业，同时避免损害周边人民的利益是需要考虑的问题。



我们首先根据马赛马拉保护区目前的野生动物分布情况，划分了不同的地理区域。我们将这些地理区域划分为四种用途，分别是：

类型.1 *For the construction of nature reserves.*

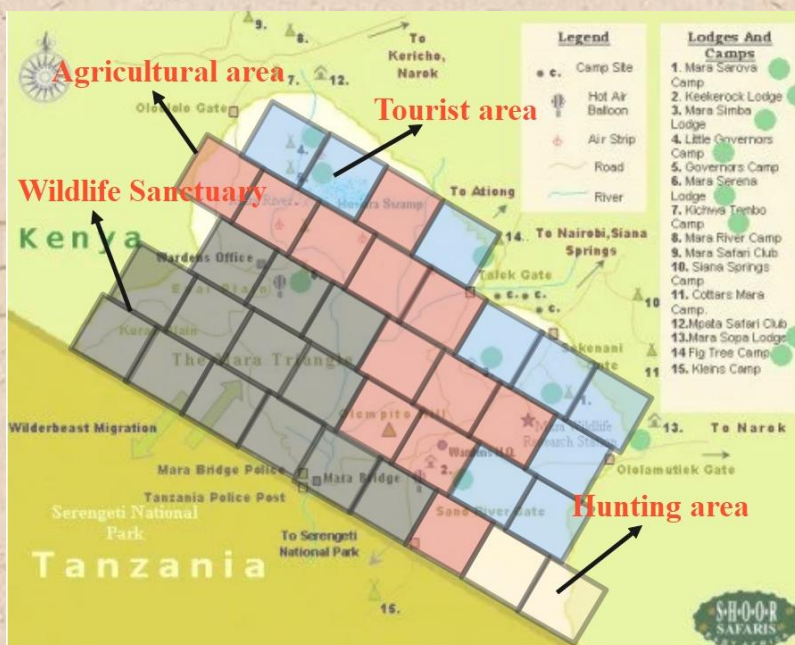
类型.2 *For the construction of hunting and gathering areas.*

类型.3 *For the construction of tourist development areas.*

类型.4 *For the construction of agricultural expansion areas.*

A model was developed and calculations were made to derive construction plans for different geographical areas. It was finally obtained that the resources of Masai Mara are fully utilized when the following scheme is adopted. That is, the number of blocks of the four types mentioned above are: 13,2,9,12.

该方案极具价值，因为它兼顾了马赛马拉原始格局和该地区经济发展水平，方案具体实施方案可参考下图。



该计划兼顾了野生动物保护的生态价值，可以实现野生动物保护生态价值的经济价值最大化。

根据建设规划，我们提出以下建议，以更好地平衡人与动物的利益：

1. Increase community cooperation and participation with local people to ensure that they derive more economic and social benefits from the resources and tourism of the reserve.

2. Develop tourism planning and management strategies to ensure that visitors adhere to the visitor code of conduct and that appropriate safety measures are taken to protect wildlife and the visitors themselves.

3. The policies and management strategies adopted must be in line with the relevant regulations and policies of the protected areas, such as no deforestation of primary forests, no exploitation of mineral resources, etc.

4. The policies and management strategies adopted must balance wildlife and natural resource conservation with the livelihoods of the inhabitants, e.g. no total closure and no total opening.

Yours sincerely
#2315379 2023.2.20

9. 模型敏感性分析

本文基于Dijkstra算法的最小相互作用模型和经济影响评估模型是在极其理想的情况下建立的。由于现实情况往往不那么理想，尤其是在非洲，为了保证评估模型更加客观、相关、独立、实用和科学，需要考虑特殊情况的发生。我们综合了非洲大陆各特殊情况发生的频率，选择考虑粮食危机、自然灾害、政策变化和金融危机四种情况对模型的影响，并讨论相关权重向量对建立水电站可行性的影响。

我们共做了四个特殊情况进行比较，只需要适当改变相关因素的权重，并且为了保证实验的公平性，我们只做了很小的改变（上下不超过0.1）。这里我们通过上调农业价值0.1个权重组、下调自然价值0.1个权重组、下调狩猎价值0.1个权重组、下调旅游价值0.1个权重组进行测试，结果见表13。

表13 各方案降低权重后的经济价值

Special Events	Scenario 1	Scenario 2	Scenario3
Food crisis	1169270.29	1341207.52	1235496.24
Natural Disasters	1064894.04	1220047.77	1126019.24
Policy Change	1146495.89	1315332.72	1214462.64
Financial crisis	1136358.51	1305004.51	1202584.02

从上表中可以看出，无论出现哪种特殊情况，情景2的经济价值都是最大的，同时，针对每种特殊情况，我们找出了方案2的模型拟合优度，结果如表14所示。

表14 方案2在不同特殊情况下的模型拟合优度

	Food crisis	Natural Disasters	Policy Change	Financial crisis
R^2	0.879086	0.979658	0.999959	0.955990

我们可以看到，每个案例的 R^2 都大于 0.8，模型拟合度良好，并且我们的模型是稳定的。
结论：这些因素的权重对我们的模型的影响很小，并且我们的模型是稳定的，不受特殊情况的影响。

10.模型的评估与扩展

10.1 优点

经过仔细审查，我们的模型具有以下优点：
我们的模型有效地实现了所有目标，建立了一个平衡野生动物和人类利益的马赛马拉资源重新分配的综合模型。

其主要优点是其巨大的可扩展性以及将所有因素纳入统一、强大的框架中。

可视化工作我们做的很好，比如马赛马拉地区的资源分布，一些结构化的示意图。枯燥的数据也许能体现出规律，但不如那么多图片直观。

此外，我们的模型考虑了时间维度，具有良好的可扩展性。

10.2 模型的局限性和扩展

我们的模型有以下局限性及相关改进：

马赛马拉部分地区的数据收集非常困难，不得不使用肯尼亚国家的数据作为替代，这在一定程度上降低了模型的准确性。我们的模型具有极高的相关性，可以广泛应用于世界各地的大型野生动物保护区。此外，我们在问题 3 中将模型应用到了美国黄石公园，取得了良好的效果。

11. 参考

[1] Wishitemi B E , Momanyi S O , Ombati BG 等. 肯尼亚马赛马拉和安博塞利保护区周边地区贫困、环境与生态旅游发展之间的联系[J]. 旅游管理视角, 2015.

[2] Holland KK , Larson L R , Powell R B , 等. 旅游业对肯尼亚马赛马拉国家保护区保护、当地生计和社区恢复力的影响[J]. 可持续旅游杂志. [3] Ogutu J O , Owen-Smith N , Piepho H P , 等. 1977-2009年肯尼亚马拉地区野生动物种群数量持续下降、活动范围缩小[J]. 动物学杂志, 2011, 285(2):99-109. [4] 薛峰. 自然保护区规划设计的网络选择算法[D]. 福建农林大学, 2014. [5] 涂文华. 泉州湾保护区静态与动态优化模型研究[D]. 福建农林大学, 2019. [6] Li, W. 、 Buitenwerf, R.、 Munk, M.、 Bøcher, P. K. 和 Svenning, J. C. (2020). 基于深度学习的高分辨率制图显示大马赛马拉生态系统中木本植被的致密化. 环境遥感, 247, 111953. [7] 2013 年《野生动物保护和管理法》。肯尼亚共和国，肯尼亚公报补编第 181 号（第 47 号法案），2013 年。[8]《野生动物保护和管理法》（2013 年第 47 号）。法律通知第 155 号。肯尼亚共和国，肯尼亚公报补编第 141 号（第 47 号法案），2020 年

12.附录

Appendix 1**Introduce: Tools and software**

Paper written and generated via Office 2019.

Graph generated and calculation using MATLAB R2021b & Python 3.8. & Lingo17.0

Appendix 2**Introduce: Data Industries**(Unit: \$ million, 10,000 people)

Year	Agricultural output	Hunting output	Tourism revenue	Ecological output	TouristsNumber
2010	200120	3892	96006	876483	162
2011	200730	3902	102359	862563	165
2012	205045	4056	122187	886616	170.1
2013	193612	4079	133560	891854	173.5
2014	185804	4088	134231	906923	174.2
2015	218125	4102	146124	907231	175.6
2016	230072	4123	145670	917559	176.2
2017	249057	4251	158720	917826	177.8
2018	248506	4198	159231	928042	178.4
2019	256200	4362	167800	938231	176.2
2020	263280	4532	83500	948317	77.4

Appendix 3**Introduce: Modell: Dijkstra Algorithm**

```

function
[min,path]=dijkstra(w,start,terminal)
n=size(w,1); label(start)=0; f(start)=start;
for i=1:n
    if i~=start
        label(i)=inf;
    end
end
%sThe array holds the set of vertices
already searched, initialized with only start
s(1)=start; u=start;
while length(s)<n
    for i=1:n
        ins=0;
        for j=1:length(s)
            if i==s(j)
                ins=1;
            end
        end
        if i==s(j)
            ins=1;
        end
        %Determine if there are relay vertices that
        make the distance between them shorter, if
        so update the distance and update the
        precursor node
        if ins==0
            v=i;
            if label(v)>(label(u)+w(u,v))
                label(v)=(label(u)+w(u,v));
            end
            f(v)=u;
        end
    end
end

```