

在马赛马拉为人类和野生动物建立一个共同的天堂

摘要：每年，世界上最壮观的野生动物迁徙，被称为“穿越马拉河”，发生在肯尼亚的马赛马拉保护区。该保护区最初是为了保护野生动物和自然资源而建立的。然而，生活在该地区的人们的利益也不容忽视。

在所有模型建立之前，我们对大量高可靠性的数据进行了清理和可视化，这对我们后续的选择工作有很大的帮助。此外，我们对“失去的机会”和“负面互动”这两个模糊的概念进行了精确的定义。

对于问题 1，我们将马赛马拉大致平均地划分为 36 个网格，以便于建模，同时考虑到其当前的自然资源和野生动物分布。对于每个网格，我们选择建立 4 个功能区中的一个：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，并以其最大值为目标函数。我们建立了模型一：马赛马拉

基于双目标规划的资源配置策略模型。约束条件为：(1)生态效益大小约束功能区类型；(2)游客数量限制；(3)居民收入的保障等。使用 Lingo，计算出 3 个 scenarios。以场景 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，为了确定能够产生最佳结果的管理解决方案，我们开发了模型 II：基于 Dijkstra 的最小交互模型和经济影响评估模型。我们指定了四种类型的交互，类似于四个功能区之间的影响关系，并确定了有向图中路径的权重。基于问题 1 的解得到的 3 个场景，我们使用改进的 Dijkstra 算法，通过分别计算每个场景的最短路径来衡量每个场景的交互影响。同时，考虑到马赛马拉地区的经济发展水平，三种情景的经济效益分别为 141,274.438 美元、154,948.974 美元和 130,180.760 美元(单位:百万)。结果表明，情景 2 具有最佳的互动和经济效率。因此，场景 2 是最好的。

对于问题 3，我们开发了模型 III：马赛马拉地区的长期趋势预测模型。我们首先预测了游客的增加，这可能是由于人与动物之间的负面互动减少而导致的。然后，我们拟合了一个二次非线性回归方程，预测了 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 大流行为例，在检验长期预测结果的准确性时，我们采用 t 检验，计算出 p 值小于 0.05，表明 COVID-19 大流行前后肯尼亚的旅游收入存在显著差异。COVID-19 大流行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。我们考察了该模型在黄石国家公园的应用情况。

最后，对指标权重的敏感性分析表明，我们的模型对它们的变化并不敏感。在讨论了该模式的优点和改进之后，一份关于马赛马拉资源再分配计划及其价值的两页非技术报告已被撰写给肯尼亚旅游和野生动物委员会。

关键词:网格法;双重目标规划;Dijkstra 算法;非线性回归

目录

1. 引言.....	3
1.1 背景.....	3
1.2 问题阐述.....	3
1.3 文献综述.....	3
1.4 我们的工作.....	3
2. 假设和理由.....	4
3. 符号和定义.....	5
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 数据筛选和可视化.....	6
5. 问题 1.....	7
5.1 问题分析.....	7
5.2 模型的准备.....	7
5.3 模型的建立.....	8
5.3.1 根据野生动物分布状况进行分区.....	8
5.3.2 决策变量和约束条件的确定.....	9
5.3.3 目标函数的确定.....	11
5.4 模型的解决方法.....	11
6. 问题 2.....	12
6.1 问题分析.....	12
6.2 模型的准备.....	12
6.2.1 模型的建立.....	13
6.2.2 模型的解决方案.....	15
6.3 经济影响评价模型.....	15
7. 问题 3.....	16
7.1 问题分析.....	16
7.2.1 旅游收入变化.....	16
7.2.2 旅游收入变化.....	17
7.2.3 新冠肺炎疫情大流行对旅游业的影响.....	17
7.2.4 政策执行的长期影响.....	17
7.3 模范迁移：黄石国家公园.....	18
7.3.1 模型迁移的可行性分析.....	18
7.3.2 模型改进与解决方案.....	19
8. 问题 4.....	20
9. 模型的灵敏度分析.....	23
10. 模型的评估和扩展.....	23
10.1 优势.....	23
10.2 模型的限制和扩展.....	24
11. 参考文献.....	24
12. 附录.....	25

1.介绍

1.1 背景

肯尼亚作为非洲经济不发达的国家，将大量财政收入用于保护区建设。与此同时，以观赏野生动物为重点的肯尼亚旅游业是国家财政的主要来源。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物种而闻名。如何制定与保护区不同区域相关的政策，使其在保护野生动物和其他自然资源的同时，能够平衡该地区居民的利益，成为政府需要考虑的问题。

1.2 问题的重述

对于问题 1，我们需要考虑是否要针对当前保护区的不同区域，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，我们需要平衡生态效益和经济效益，同时避免对旅游吸引到保护区的人产生负面影响。

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 task1 的结果进行排序和比较。排名和比较的原则包括，在这一政策下，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内外的经济产生积极影响。

对于问题 3，我们需要预测 task1 中提出的计划对未来发展的影响。我们需要分析相应的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。

对于问题 4，我们需要为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周边的自然保护区分区和产业发展进行了大量的研究。Bob E.L. Wishitemi 等人研究了肯尼亚马赛马拉保护区附近地区的贫困、环境和生态旅游发展之间的关系[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的保护支持、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 年肯尼亚马拉地区野生动物种群的变化[3]。薛凡以岱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

为避免复杂描述，直观反映我们的工作流程，流程图如下图 1 所示:

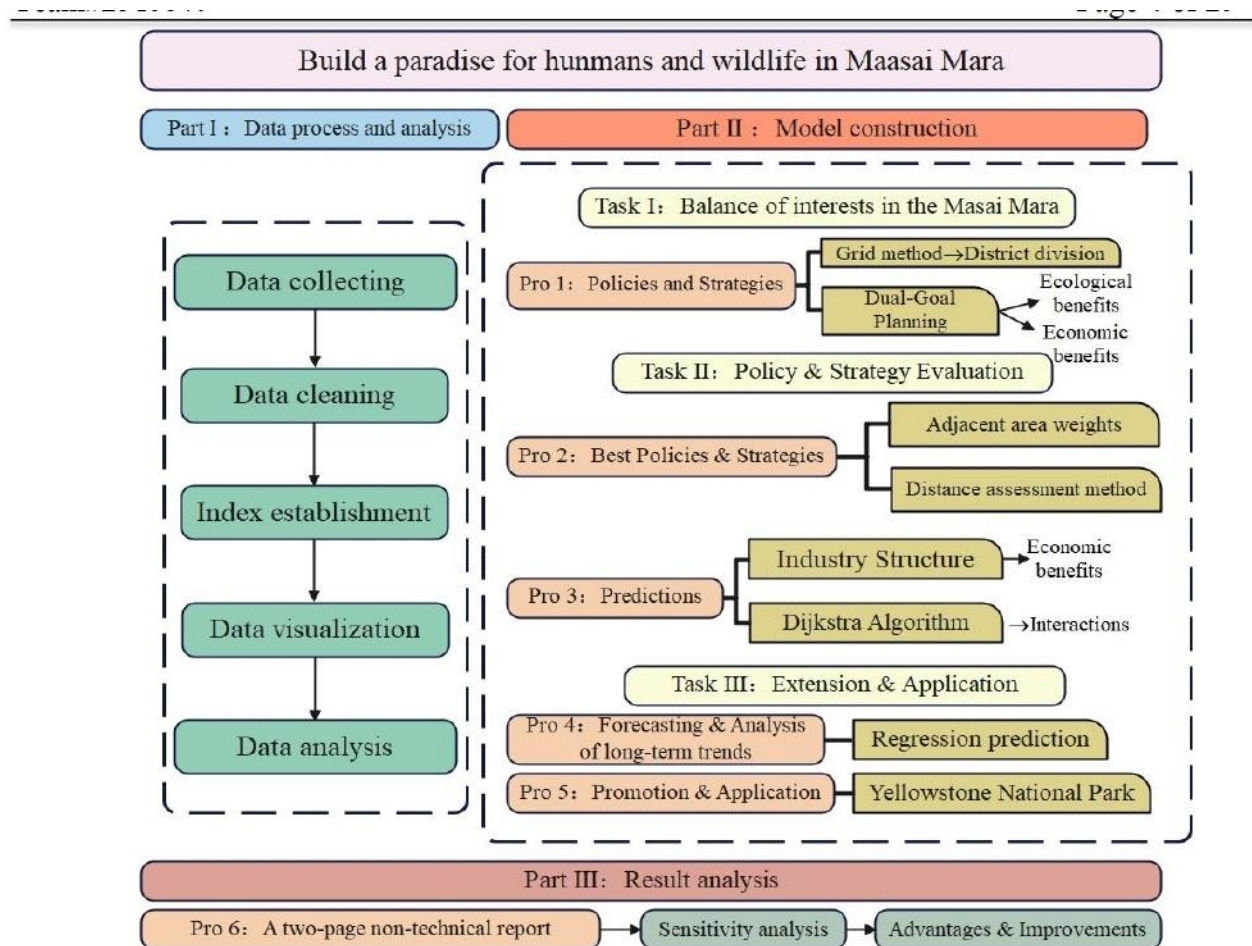


图 1 我们的工作

2.假设与证明

为了简化问题，我们做了以下基本假设，每一个假设都是合理的。

假设 1:本文中的所有数据源都是真实可靠的。

理由:我们需要依靠马赛马拉和周边地区的历史数据来分析其经济、气候和生物多样性的趋势。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其对模型稳定性的影响。

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

论证:我们已经尽可能地设想了可能影响问题的相关因素，并给出了其他因素几乎不存在影响的原因。因此，为了简化模型，我们可以做出如上的假设。

假设 4: 每个小区域内的环境、经济等条件都是一样的。

理由:马赛马拉地区分区的合理理想化。假设区域内的条件相同，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得的数据，可以用肯尼亚的数据代替。

理由:由于难以获得马赛马拉部分地区的数据,我们不得不替换肯尼亚的相关数据,然而,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:博弈论模型的相关假设将在下文中展示。

3.注释和定义

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
• Note: Some variables are not listed. Their specific meanings will be introduced below.	

3.2 定义

在主题的描述中出现了一些模糊的概念。我们精确地定义那些可能模棱两可的单词或句子。

资源:原文提到的是目前公园边界内外的资源,我们在这里考虑的资源是生态价值的野生动物(生物多样性)、植被资源、水资源、土地资源等。

失去的机会:原文提到了生活在保护区附近的人们所经历的失去机会的影响。我们在这里认为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不会受到一些危险的大型野生动物的伤害。

被保护区吸引的人:原文提到要尽量减少动物和被保护区吸引的人之间的负面互动,我们认为被保护区吸引的人是来自肯尼亚到马赛马拉的国内外游客(不包括当地居民)。

负面互动:我们把这里的负面互动分为两类。

第一类(人→野生动物):一些游客可能会给野生动物喂食不干净的食物。除此之外,还可能有一些非法偷猎者。

第 2 类(野生动物→人):部分游客在游览过程中可能会被大象、狮子等危险的大型野生动物伤害。

4.数据

4.1 数据概述

这个问题并没有直接为我们提供数据,所以我们需要在模型构建中考虑收集哪些数据。通过对问题的分析,我们需要收集马赛马拉的数据,比如动物物种、地质条件、气候条件、水文条件等信息。除此之外,我们还应该收集生活在该地区的人们的经济状况和生活水平等。

由于数据量大，不方便全部列出来，所以将数据可视化进行展示是一个很好的方法。

4.2 数据收集

我们从参考文献中收集了很多有用的数据。而其他数据来源如表 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进行标记。

4.3 数据筛选与可视化

对收集到的数据进行统计分析，剔除异常值。下图是我们对无聊数据的可视化处理。

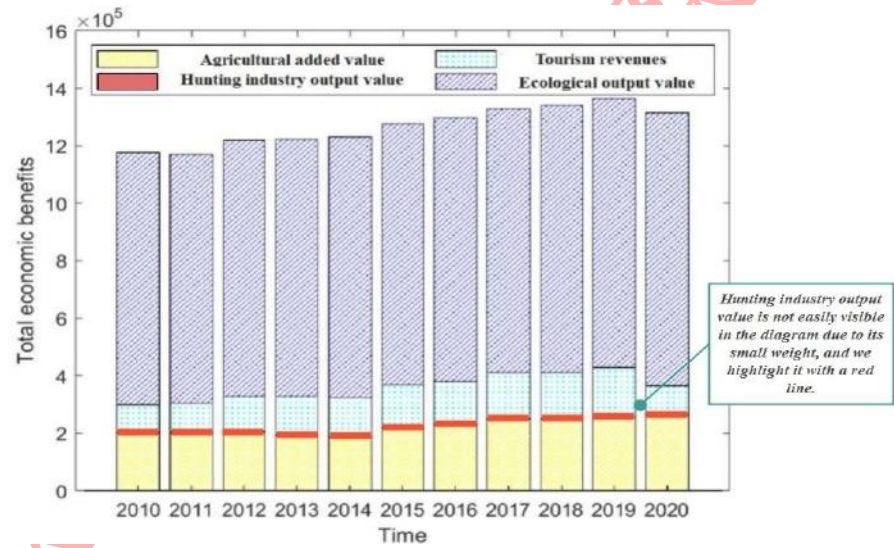


图 2 数据可视化

其他数据的可视化将在下面显示。

5.问题 1

5.1 问题分析

在问题 1 中，我们需要确定具体的政策和管理策略，以保护保护区的自然资源和野生动物，以及附近居民的经济利益为目标。我们计划开发一个双目标规划模型，对马赛马拉自然保护区进行分区，并建立一系列约束条件来实现这一目标。

5.2 模型的准备

在我们的模型中，涉及生态效益和经济效益的计算，具体如下：

(1)经济效益的计算

对于旅游收入，我们可以综合考虑旅游人数、旅游时长、旅游费用等因素来计算。

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

式中, Tr:旅游收入;Nt:游客人数;Als:平均停留时间;Ads:日均消费;;Lts:旅游季时长。

对于其他地理区域带来的经济效益,我们主要是通过查找全国相应产值的数据,再根据该区域所覆盖的面积估算出近似的产值。对相应指标和数据来源的解读如下:

①捕获产业产出: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经大量失去了自然捕食者,如果不进行人工捕猎,可能会破坏生态平衡[7]。对于国家来说,狩猎产业的产值主要是合法的狩猎收入,人们在捕猎野生动物后需要向国家缴纳相应的税款。

②农业产出:这里的农业产出主要是指生产农作物所获得的经济收益。我们可以通过观察近年来农业对肯尼亚 GDP 的贡献来得出这个结论。

③旅游产出:这主要是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)生态效益计算

为了便于在同一尺度上对这些生态指标进行比较,我们对这些数据进行归一化处理。对于植被覆盖,我们可以将其归一化到[0,1]的范围内。具体来说,我们可以先确定最小值和最大值,然后用下面的公式进行归一化:

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

式中, Nvc:归一化植被覆盖度;Vc:植被覆盖度;

MinVc/MaxVc:最小/最大植被覆盖度。

对于动物种类和数量,我们可以考虑对不同物种的动物进行加权

根据它们的稀有程度,这样它们就可以在同一尺度上进行比较。比如,我们可以把狮子的体重设为 1,大象的体重设为 0.8,斑马的体重设为 0.5,羚羊的体重设为-0.3,长颈鹿的体重设为 0.4。然后,我们可以用下面的公式进行归一化。

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

式中, Nai:归一化动物指数;Asw:动物物种权重;Na:动物数量;Sta:动物总数的总和。

那么对于生态效益的计算如下:

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

Vx:保护区生态效益;

B1:动物重量;

B2:植物的重量;

Ax:保护区归一化动物指数;

Px:保护区植被覆盖度归一化

在本文的计算中,由于马赛马拉自然保护区位于草原上,我们假设每个植被覆盖范围大致相同。在计算不同地区归一化的动物群指数时,我们参考了马赛马拉国家保护区的近似动物群分布,如图 3 所示。

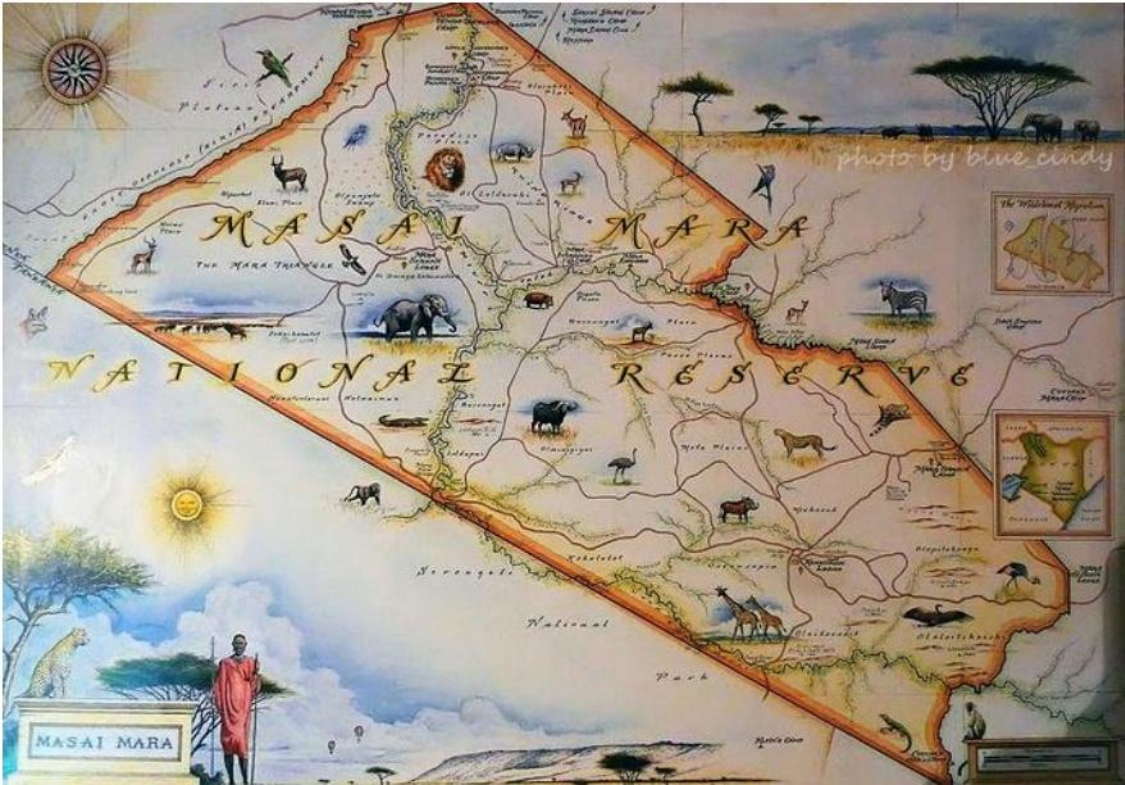


图 3 马赛马拉国家公园野生动物分布

5.3 模型的建立

5.3.1 根据野生动物分布状况进行分区

为了便于后续对不同区域进行分类分析，简化计算，我们在查阅资料[5]的基础上，将马赛马拉保护区划分为 36 个等长网格，将马赛马拉国家公园总面积除以 36，即 50 km²，得到每个网格的面积，如图 4 所示。

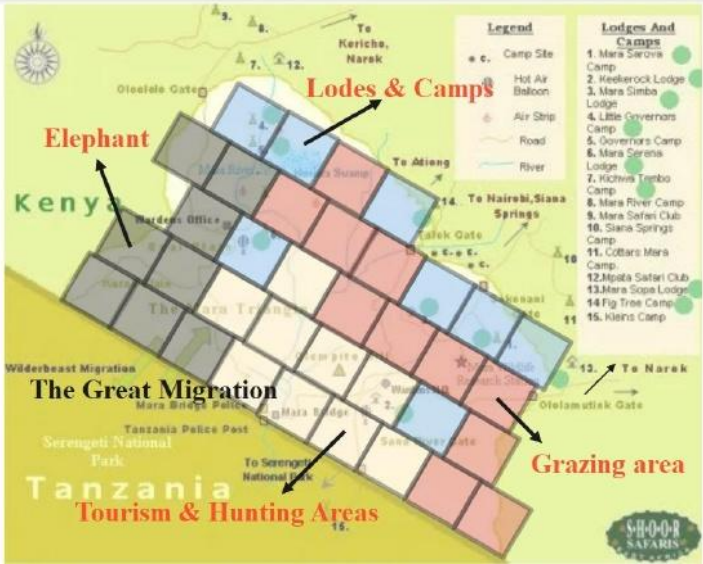


图 4 网格划分

5.3.2 决策变量和约束的确定

在 5.2.1 节中，我们根据野生动物的分布划分了 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。将决策变量设置如下：

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 ith 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，只能选择一种建筑用途，例如，如果一个区域被用来建造保护区，那么它不能也被用来建造狩猎区，对于任意相等的 j，即：

$$X_j + Y_j + Z_j + W_j = 1$$

(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大于其他区域的数量，即：

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

(6)

首先为我们计算出需要建设的一个受保护的近似面积;当生态 0.4 值≤0.5 的不同时，根据 5.2 节中生态效益的计算方法计算图 4 中的动物区域密度，然后根据值确定哪个建筑用途适合该地理区域。具体而言，当第 j 个区域中的“”大于 0.5 时，表示该区域动物密度较高，略低，适合建设旅游区

$$V_x > 0.5 :$$

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

$$0.4 < V_x < 0.5:$$

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

$$0.2 < V_x < 0.4:$$

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

$$V_x < 0.2$$

$$X_j + Y_j + Z_j + W_j \leq 1 \tag{10}$$

(3)此外，旅游区的游客数量应受到限制，避免过多的游客干扰野生动物栖息地。肯尼亚旅游局的数据显示，每年到访马赛马拉的游客人数约为 15 万人[6]，每天约 410 人。而每天约有 40 人入住酒店。假设酒店平均分布在各个旅游区，我们可以假设每个旅游区有 40 人到访。根据上述数据，我们可以得到以下对旅游区人数的约束：

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

(4)同时，我们还需要平衡当地居民的利益，所以需要将相关变量设置如下：

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， V_x 不同地区的情况也会有所不同。为了简化计算，我们假设为 V_y, V_z 和 V_w 对于相同构造类型的其余区域都是相同的。其中 V_y, V_z 和 V_w （经济效益）的计算方法详见第5.2节。用肯尼亚2022年的相关数据计算，农业面积单位面积价值计算为4786900美元/年，狩猎面积单位面积价值为151000美元/年，人均日消费量为364美元。结合每个旅游区的每日游客数量和不同地区的面积，我们可以计算出： $V_y=\$7.55$ ，每年有755万人， $V_z=\$13.286$ ，每年1328.6万美金， $V_w=\$11.967.25$ 每年1196725亿
 考虑到一些 V_y, V_z, V_w 会分配给政府，一些给当地居民，我们假设 V_{1y}, V_{1z}, V_{1w} 利润是否分配给政府和 V_{2y}, V_{2z}, V_{2w} 利润是否分配给当地居民，即：

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

其中， r_1, r_2 分别为政府收到的利润分配比和居民收到的利润分配比。参考当地税率， 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。在[6]搜索信息时，我们发现肯尼亚的人均收入约为2082美元。

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

其中， P_j 为第j个地理区域内的人数，参照当地人口分布得到。

5.3.3 目标函数的确定

建立自然保护区是为了保护该地区的动物和自然资源，因此我们建立了一个生态效益最大化的目标函数，即：

$$\max \sum_{j=1}^{36} X_j V_{jx} \tag{14}$$

此外，为了平衡该地区居民的利益，我们还应该使保护区及其周围的经济效益尽可能大。我们假设建造不同分区的成本是相同的，即：

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

5.4 模型的解

我们使用行话进行求解，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，较优解有三种选择，分别是(数字表示用于相应构建目的的细分数量)：

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

在这个问题中，我们需要建立一个综合评价模型，来确定哪种分区策略是最好的。我们需要分析哪种策略在保护区及周边区域内人兽互动最小，经济效益最大。

6.2 模型的准备

首先，我们需要确定与动物的相互作用有哪些具体类型。在本文中，我们需要考虑的动物与人类互动的类型如下表所示：

表 6 人与动物之间的四种互动

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.

从上表可以看出，当动物栖息地离人类居住地太近时，可能会产生一系列的负面影响。因此，我们使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之间的相互作用，并利用 Dijkstra 算法建立模型，找到每个动物保护区与每个人类活动区之间总距离最大(即相互作用可能性最小)的分区方案，从而减少野生动物攻击人类和家畜的可能性。

举个例子，野生动物保护区和旅游区之间的最短距离定义如下。

$$\minDistance = \min d_{pq}(p \in \text{Wildlife Sanctuary} \ \& \ q \in \text{Tourist Area}) \tag{16}$$

其中，p为野生动物保护区边界上的一个点，q为旅游区边界上的点。根据情景1，图5和图6显示了马赛马拉自然保护区重新规划前后野生动物保护区和旅游区之间的最短距离：野生动物保护区和旅游区。

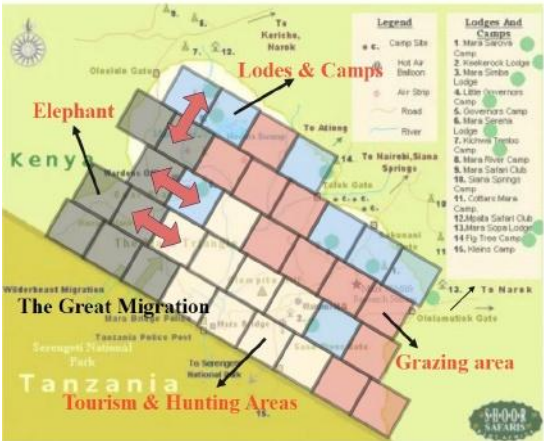


图 5 初始状态最小距离

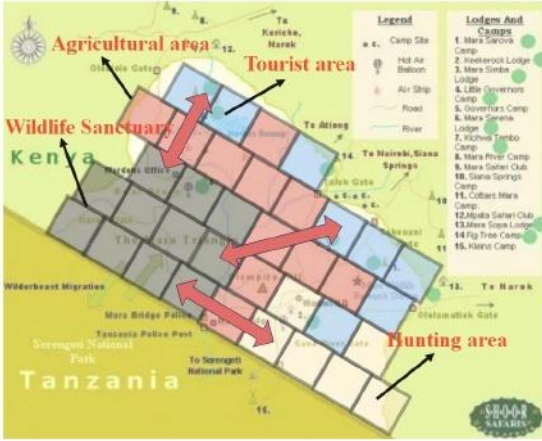


图 6 情景 1 最短距离

当野生动物保护区与旅游区之间的最小距离增加时，游客与一些危险的大型野生动物接触的机会就会减少。这些动物攻击游客的可能性随之降低，野生动物与游客负面互动的影响也在一定程度上得到缓解。

6.2.2 模型的建立

首先，我们将保护区抽象为一个无向图，将每种类型的保护区作为图中的一个节点，网格边缘长度 d 表示相邻保护区之间的距离。然后，通过计算节点之间的最短路径长度来测量不同保护区之间的距离，从而评估不同保护区之间人-动物相互作用的影响。具体建模过程如下。

(1)无向图的构造。

假设保护区分为四种类型：自然保护区 (X_i)，狩猎区域(Y_i)，农业面积(Z_i)和旅游区 (W_i)，可以表示为无向图 $G(V, E)$ ， $V = \{X_i, Y_i, Z_i, W_i\}$, E 为边集，表示节点之间的连接关系。边的权值可以表示节点之间的距离，这可以根据实际情况来确定。为了便于建模，我们假设相邻节点之间的边长相同，且为 d

(2)考虑交互的影响。

考虑到人与动物交互的影响，可以对不同节点之间的边分配不同的权重，权重可以表示人与动物交互的强度。根据我们复习过的一些信息，我们设置了各类型区域之间的权重，如下表所示。权重越大，说明这两个区域之间的距离越远。

表 7 不同区域间权重

	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)人与动物相互作用的建模。

考虑到人与动物互动的强度可能受到多个因素的影响，可以采用线性回归模型对人与动物互动进行建模，并且互动强度越低越好。方程如下。

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

(17)

式中， P 表示人与动物相互作用的强度， E 表示由保护区组成的无向图的边集， i, j 分别表示无向图中相邻的两个节点， $d(i, j)$ 表示节点 i 与节点 j 之间的距离，可以用最短路径长度表示， $w(i, j)$ 表示节点 i 与节点 j 之间的权值，用来反映人与动物相互作用的影响。 $B1 \sim b3$ 表示其他因素的系数， $w1 \sim w3$ 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，通过以下步骤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: $new_d(v) \& d(v')$

1. Let S be the set of explored models. 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. EndWhile

重复步骤 4 和步骤 5，直到所有节点都被标记为访问过，或者找到目标节点。

6.2.3 模型求解

我们使用 MATLAB 对解进行求解，结果显示场景 2 导致人与动物之间的交互最少，此时的具体分区如图 7 所示。

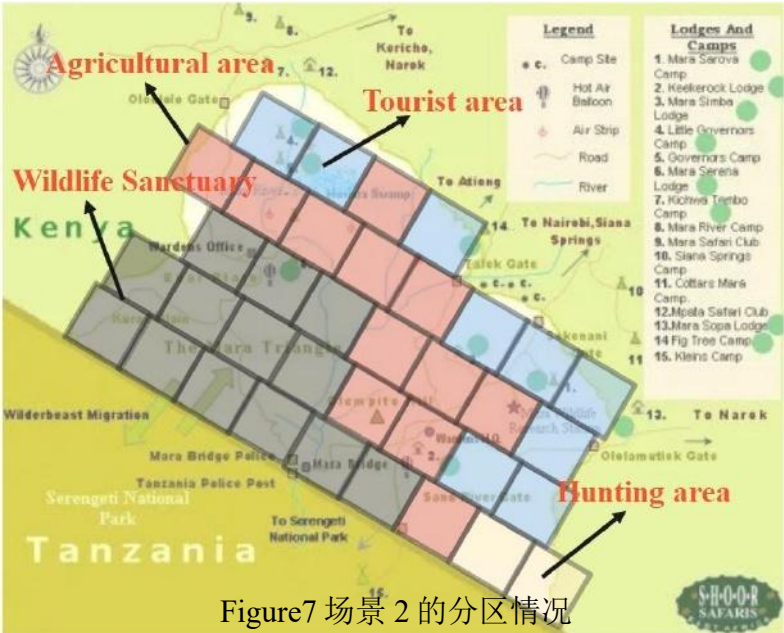


Figure7 场景 2 的分区情况

6.3 经济影响评价模型

根据5.3.2的计算，从建筑狩猎区、旅游区、农业扩张区得到的经济价值为：

Vy=每年有755万美元，Vz=每年1328.6万美元，Vw=每年1196725万美元

然后用数据代替肯尼亚2022，得到一个自然保护区的单位面积（1平方公里）的价值17242130000美元，即一个保护区的生态价值（与生态效益不同）Vx是8.621亿美元。

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

其中，Qi x, Qi y, Qi z, Qi w分别是在实现不同场景时要构建的不同分区的数量。

代入问题 1 的结果，得到不同场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 2 带来的经济收益最大。而根据 6.2 的计算，可以得出结论，方案 II 造成的人与动物的负面互动最小。因此，选项 2 是最佳政策。

7.问题 3

7.1 问题分析

在这个问题中，我们需要衡量马赛马拉公园因政策变化而发生的变化。首先，我们需要在政策实施前确定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 旅游收入的变化

在执行该政策之后，马赛马拉不同地区的功能将与以前不同。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地区(包括一些旅游住宿酒店场地)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，这反过来又会在一定程度上吸引更多的人来到该地区。这种游客的增加，最直观的表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(由于旅游业受到 2020 年 COVID-19 大流行的影响，我们将在下一节进行进一步分析)，这些具体数据列在附录中。我们分别以游客人数为自变量 x，以旅游收入为因变量 y 进行线性回归，并采用二次曲线拟合进行非线性回归。

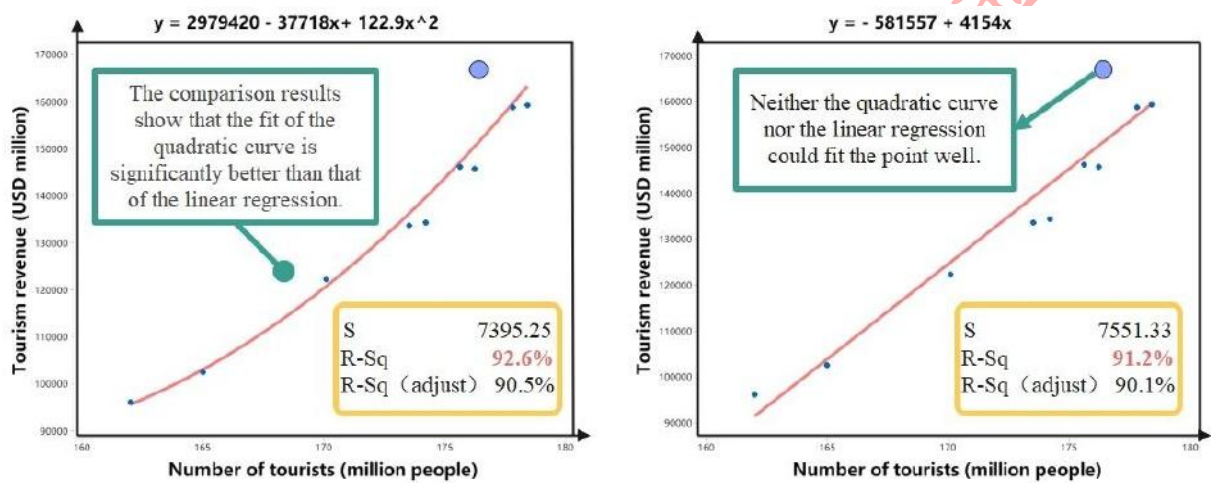


图 8 不同方程的拟合效果

拟合结果表明，二次曲线拟合方程的 r 平方为 0.926，单变量线性回归方程的 r 平方为 0.912，表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了检验。拟合结果为。

$$y = 2979420 - 37718x + 122.9x^2 \tag{19}$$

肯尼亚旅游局报告说，马赛马拉，肯尼亚最著名的国家公园，是所有到肯尼亚旅游的人的首选目的地，所以我们假设政策实施后到肯尼亚旅游的人数将增加 1%

与前几年（以前每年增长约0.3%）相比，以2019年的数据（176.2万游客和1.678亿美元的旅游收入）为基准，不受2019冠状病毒病大流行的影响，未来三年约为178万、179.7万和181.5万游客。根据回归方程，目前的旅游收入分别为1.5979亿美元、1.70193亿美元和1.82205亿美元。与2019年的旅游收入相比，增长幅度相对较大。

7.2.2 农业的变化

这里的农业被广义地定义为农业(包括畜牧业)。在马赛马拉国家公园，动物袭击造成农作物受损、牲畜损失和人员伤亡的情况并不少见。随着政策的实施，农业区与保护区之间的距离将在一定程度上缩短，从而减少因野生动物袭击牲畜等情况造成的损失。

7.2.3 COVID-19 大流行对旅游业的影响

我们收集了新冠疫情前三年(2017-2019 年)和 COVID-19 大流行前三年(2020-2022 年)前往肯尼亚的游客人数数据

表 9 COVID-19 大流行前后肯尼亚的旅客人数

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)		t	p
	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

检验结果表明，COVID-19 大流行对游客人数具有 0.05 的显著性水平(t=4.354, p=0.049)，并且存在具体的比较差异，表明 COVID-19 大流行前的平均值(177.47)将显著高于新冠疫情后的平均值(90.87)。

这说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的影响，比如大流行性疾病导致的旅游业的枯萎。

7.2.4 政策执行的长期影响

我们的建议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人与动物之间的负面互动。一旦动物袭击人的次数减少，就意味着周边的农牧业发展更快，来该地区的游客数量会增加，旅游收入也会增加。这些产业产值的增加，将带动国家的经济，这反过来又会产生更多的钱来投资野生动物保护，创造一个良性循环。

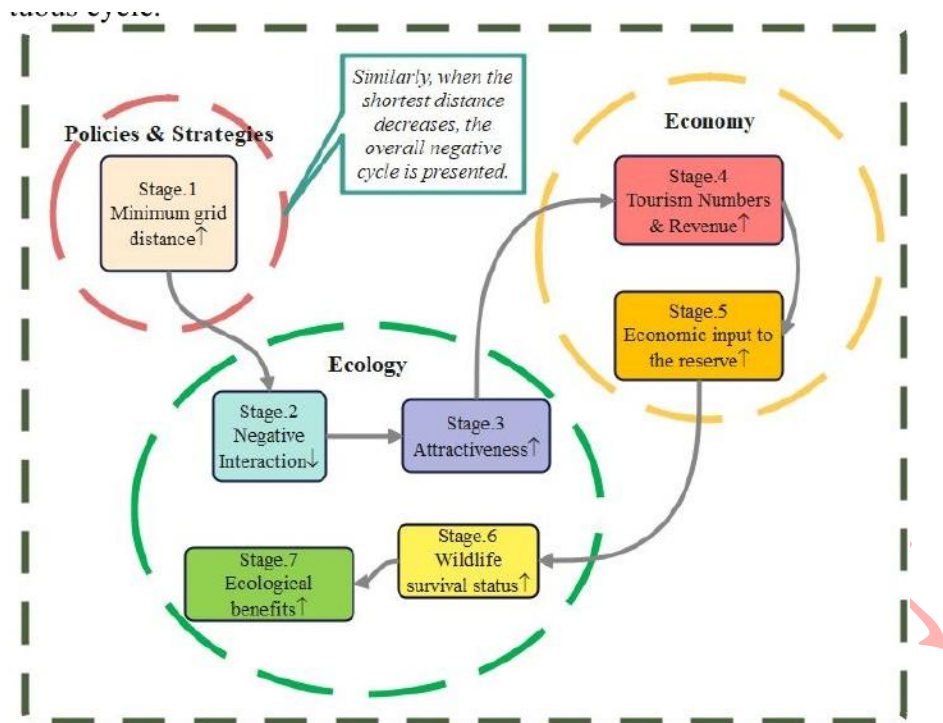


Figure 9. The long-term impact of the policy

7.3 模型迁移:黄石国家公园

7.3.1 模型迁移可行性分析

在我们的模型中，我们以黄石国家公园为目标，它是世界上第一个国家公园。通过收集黄石国家公园和马赛马拉的相关数据，我们可以确定模型迁移的可行性。

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/

从上表中我们可以看出，黄石国家公园和马赛马拉在很多方面都有很多相似之处。而它们又各具特色。这为我们的迁移模型奠定了基础。

7.3.2 模型的改进和解决

通过以上分析，验证了该模型在黄石国家公园应用的可行性。该区域的地形条件和物种分布如图 10 和图 11 所示。

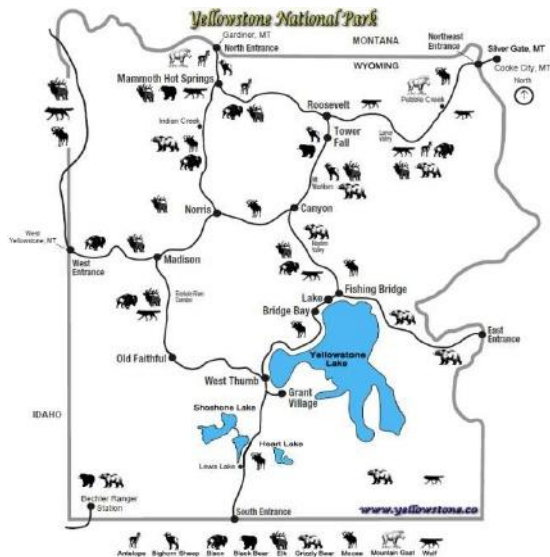


图 10 黄石国家公园野生动物分布(左)



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，我们将问题 1 中的约束条件修改如下。

(1)对于约束(3)，我们应该考虑黄石国家公园附近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。我们进行了咨询，得到了这三个州 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

此外，考虑到黄石国家公园约 96%的土地面积位于怀俄明州(65,627 美元)，美国 2021 年的人均收入为 65,133.7 美元。因此，约束条件(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国家公园的游客数量，2018-2020 年，黄石公园国家公园的游客数量分别为 411 万、402 万和 408 万。取平均值，计算得出黄石公园国家公园平均每天接待 10,904 人。根据以上分析，我们得到：

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

通过这种方式，我们在黄石公园国家公园开发了一个综合利用自然资源的模式。黄石公园国家公园的最终分区如图 13 所示，采用相同的方法。

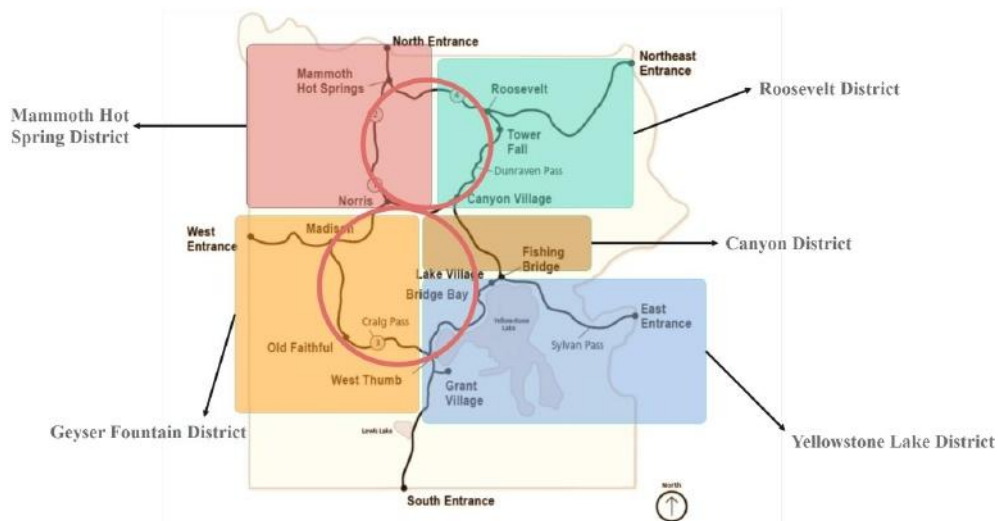


图 13 黄石公园国家公园分区

我们把黄石公园国家公园划分为五个区，分别是:猛犸温泉区、间歇泉区、黄石公园湖区、峡谷区、罗斯福区。

针对黄石公园国家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 月到 10 月，坦桑尼亚的马赛马拉和塞伦盖蒂大草原都会发生动物大迁徙。由于封闭的性质，在黄石公园国家公园没有发生类似的大规模迁徙。

经济发展:根据世界银行 2022 年最新发布的统计数据，2021 年肯尼亚 GDP 将达到 1103.47 亿美元，比 2020 年增长 9.62%，排名世界第 61 位。美国以 22.94 万亿美元的 GDP 排名第一，同比增长 6%。因此，黄石公园国家公园可以把更多的注意力放在野生动物保护上。

历史起源:黄石国家公园是世界上第一个国家公园，于 1872 年 3 月 1 日正式命名。马赛马拉保护区成立于 1961 年。相比之下，黄石公园国家公园历史悠久，有着相对成熟的法律法规和管理经验。

8.问题 4

我们为肯尼亚旅游和野生动物委员会写了一份非技术报告。

亲爱的肯尼亚旅游和野生动物委员会:

肯尼亚被公认为世界上观赏非洲野生动物最好的国家，在马赛马拉野生动物保护区，非洲五大霸主非洲象、犀牛、野牛、狮子和猎豹随处可见;在纳库鲁湖国家公园，红色的火烈鸟成群地在蓝天碧水中翱翔;在安博塞利国家公园，海明威笔下的乞力马扎罗山映照在绿草如茵的大地上.....这里以每年 6 月中旬至 9 月的动物大迁徙而闻名。

除了一年一度的动物迁徙，肯尼亚还拥有雄伟的山脉、白色的沙滩、丰富多彩的赤道自然和习俗，以及宜人的春天般的气候，吸引着来自世界各地的游客。

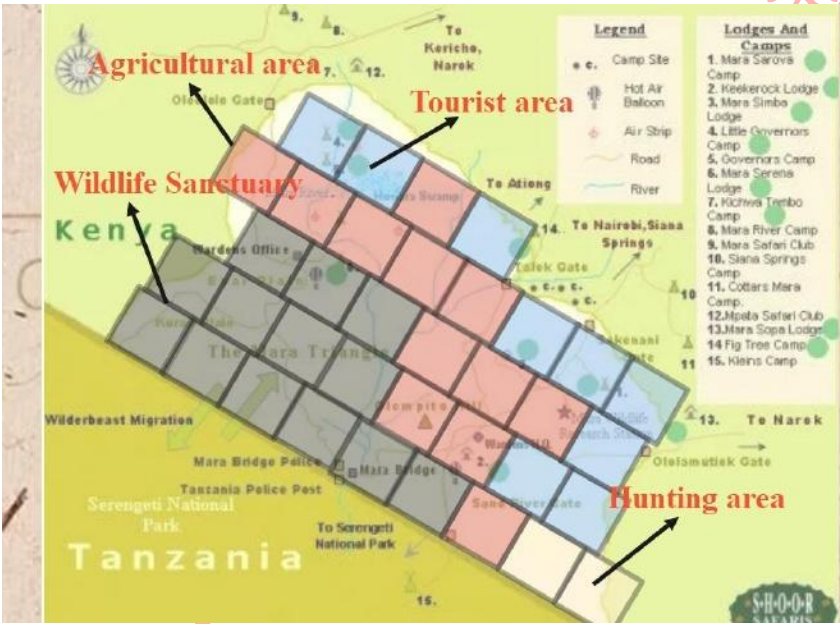
马赛马拉是肯尼亚最著名的野生动物保护区之一，以其壮丽的草原和种类丰富的野生动物而闻名。在保护野生动物的同时，充分利用自然保护区的资源，发展旅游业，同时避免损害周边地区人民的利益，是需要考虑的问题。

我们首先根据马赛马拉保护区野生动物的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：

- 第一类用于建设自然保护区。
- 第二类狩猎聚集区建设。第三类用于旅游开发区建设。
- 类型3、为旅游开发区的建设。
- 类型4、为农业扩张区的建设。

建立了模型并进行了计算，得出了不同地理区域的建设规划。采用以下方案，最终得到马赛马拉的资源得到充分利用。也就是上面提到的四种类型的区块数量分别是:13、2、9、12。

该方案非常有价值，因为它考虑到马赛马拉的原始 pattern 和该地区的经济发展水平。该方案的具体实施参考如下图。



在这个兼顾了野生动物保护生态价值的方案下，野生动物保护生态价值的经济价值可以得到最大化。

根据建设规划，我们提出以下建议，以帮助更好地平衡人与动物之间的利益：

- 1.加强社区与当地人民的合作和参与，确保他们从保护区的资源和旅游业中获得更多的经济和社会效益。
- 2.制定旅游规划和管理策略，确保游客遵守游客行为准则，并采取适当的安全措施来保护野生动物和游客本身。
- 3.所采取的政策和管理战略必须符合保护区的有关法规和政策，如不得砍伐原始森林，不得开采矿产资源等。
- 4.所采取的政策和管理战略必须在野生动物和自然资源保护与居民生计之间取得平衡，例如，不能完全关闭，也不能完全开放。

9. 模型的敏感性分析

本文基于 Dijkstra 算法建立的最小交互作用模型和经济影响评价模型是在极其理想的情况下建立的。由于现实往往不太理想，特别是在非洲，为了保证评价模型更加客观、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，需要讨论相关权重向量对建立水电站可行性的影响。

我们一共做了四个特殊案例进行比较，我们只需要适当改变相关因素的权重，并且为了保证实验的公正性，我们只进行小幅度的改变(上下不超过 0.1)。在这里，我们通过向上调整农业价值 0.1 权重组、向下调整自然价值 0.1 权重组、向下调整狩猎价值 0.1 权重组、向下调整旅游价值 0.1 权重组进行测试，结果如表 13 所示。

表 13 各方案减重后的经济价值

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

从上表可以看出，无论发生哪种特殊情况，方案 2 的经济价值都是最大的，同时我们发现方案 2 对于每种特殊情况的模型拟合优越性，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，每种情况下的 R^2 都大于 0.8，模型拟合良好，我们的模型是稳定的。

结论:这些因素的权重对我们模型的影响很小，我们的模型是稳定的，不受特殊情况的影响。

10.模型的评价与扩展

10.1 优势

经过仔细考察，我们的模型有以下优点:

我们的模型有效地实现了所有的目标。已经建立了一个全面的模式来重新分配马赛马拉的资源，以平衡野生动物和人类的利益。

它的主要优势在于其巨大的可扩展性，并将所有因素纳入一个统一的、健全的框架。

我们的可视化工作做得很好，比如马赛马拉地区的资源分布和一些结构化的示意图。无聊的数据或许能反映规律，但不如那么多图像那么直观。

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 模型的局限性与扩展

我们的模型有以下局限性和相关改进:

马赛马拉部分地区的数据收集非常困难，我们不得不使用肯尼亚国家的数据作为代理，这在一定程度上降低了模型的准确性。我们的模型相关度极高，可以广泛应用于世界各地的大型野生动物保护区。此外，我们已经将该模型应用到美国的黄石公园，在问题 3 中取得了很好的效果。

参考文献

- [1] Wishitemi B E , Momanyi S O , Ombati B G , et al. The link between poverty, environment and ecotourism development in areas adjacent to Maasai Mara and Amboseli protected areas, Kenya[J]. Tourism Management Perspectives, 2015.
- [2] Holland K K , Larson L R , Powell R B , et al. Impacts of tourism on support for conservation, local livelihoods, and community resilience around Maasai Mara National Reserve, Kenya[J]. Journal of Sustainable Tourism.
- [3] Ogutu J O , Owen-Smith N , Piepho H P , et al. Continuing wildlife population declines and range contraction in the Mara region of Kenya during 1977–2009[J]. Journal of Zoology, 2011, 285(2):99-109.
- [4] XUE F. Network selection algorithm for nature reserve planning and design [D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [5] Tu W H. Study on static and dynamic optimization model of Quanzhou Bay Reserve [D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [6] Li, W., Buitenwerf, R., Munk, M., Bøcher, P. K., & Svenning, J. C. (2020). Deep learning based high-resolution mapping shows woody vegetation densification in greater Maasai Mara ecosystem. Remote Sensing of Environment, 247, 111953.
- [7] The Wildlife Conservation and Management Act, 2013. Republic of Kenya, Kenya Gazette Supplement No. 181 (Acts No. 47), 2013.
- [8] The Wildlife Conservation and Management Act (No. 47 of 2013). Legal Notice No. 155. Republic of Kenya, Kenya Gazette Supplement No 141 (Acts No. 47), 2020

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
<pre>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 %The 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 %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</pre>

<pre>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</pre>	<pre>if i==s(j) ins=1; end end end %Determine if there are relay vertices that make the distance between them shorter, if so update the distance and update the</pre>
--	---

<pre>%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;</pre>	<pre>precursor node if ins==0 v=i; if label(v)>(label(u)+w(u,v)) label(v)=(label(u)+w(u,v)); f(v)=u; end end end</pre>
---	---

公众号: 数学建模老司机