

基于 DPSIR 和非线性规划的可持续旅游模型 ——以美国阿拉斯加州朱诺市为例

王嘉蔚^{1*}, 赵淑媛¹, 顾子林²

1. 广州大学 经济与统计学院, 广东 广州 510006

2. 广州大学 数学与信息科学学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.12187

摘 要 : 随着世界范围内旅游业的蓬勃发展, 可持续旅游正被越来越多的国家和个人所推崇。本文以美国阿拉斯加州朱诺市为例, 首先指出影响其可持续旅游的三大指标分别为住房供应率、交通流和当地人收入, 并使用熵权 TOPSIS 法得出三者的重要性分别为 19.29%、45.69% 和 35.02%; 然后基于 DPSIR 构建非线性规划模型, 并使用遗传算法求解得出在满足朱诺市旅游可持续发展的前提下, 当游客数量为 1873921、居住方式为短期客房租赁 (入住时间少于 30 天) 时, 年收入达到最大值 167930393.12 美元。由此, 本文建议朱诺市采取建立资源-游客动态调控机制、推进基础设施智慧化与低碳化升级、创新文旅产品与生态服务体系、深化区域协作与人才培育四条措施, 以促进其旅游的可持续发展。

关 键 词 : DPSIR; 遗传算法; 熵权 TOPSIS; 非线性规划; 可持续旅游

Sustainable Tourism Model Based on DPSIR and Non-linear Programming ——A Case Study of Juneau, Alaska, USA

Wang Jiawei^{1*}, Zhao Shuyuan¹, Gu Zilin²

1. School of Economics and Statistics, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006

2. School of Mathematics and Information Sciences, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract: With the robust growth of the global tourism industry, sustainable tourism is increasingly being advocated by numerous countries and individuals. Taking Juneau, Alaska, in the United States as a case study, this paper first identifies three key indicators influencing its sustainable tourism: housing supply rate, traffic flow, and local residents' income. Using the Entropy Weight TOPSIS method, the respective importance of these factors is determined to be 19.29%, 45.69%, and 35.02%. Subsequently, a nonlinear programming model is constructed based on the DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) framework. By employing a genetic algorithm to solve the model, it is found that under the premise of ensuring sustainable tourism development in Juneau, when the number of tourists reaches 1,873,921 and the accommodation mode is short-term vacation rental (stay duration of less than 30 days), the maximum annual revenue of \$167,930,393.12 can be achieved. Consequently, this paper proposes four measures for Juneau to promote the sustainable development of its tourism sector: establishing a dynamic resource-tourist regulation mechanism, advancing the intelligent and low-carbon upgrading of infrastructure, innovating cultural tourism products and ecological service systems, and deepening regional collaboration and talent cultivation.

Keywords: DPSIR; genetic algorithm; Entropy-Weighted TOPSIS; nonlinear programming; sustainable tourism

引言

朱诺 (Juneau) 是美国阿拉斯加州的首府, 位于朱诺山脚下, 拥有约 3 万居民 (2022 年), 是一个闻名国际的旅游城市, 深受大众喜爱, 其著名景点有门登霍尔冰川 (Mendenhall Glacier)、特雷西手臂峡湾 (Tracy Arm Fjord) 和阿拉斯加州博物馆 (Alaska State

作者简介:

赵淑媛, 广州大学经济与统计学院统计学专业本科生, 研究方向为数学建模;

顾子林, 广州大学数学与信息科学学院信息与计算科学专业本科生, 研究方向为数学建模;

通讯作者: 王嘉蔚, 广州大学经济与统计学院统计学专业本科生, 研究方向为经济统计、数学建模。

Museum)等。然而旅游业迅速发展带来了过度旅游的问题,使得政府不得不思考相应的对策以保证经济和环境效益两不误^[1]。朱诺市只有约3万居民,但在2023年接待了创纪录的160万游轮乘客,在最繁忙的日子里甚至有7艘大型游轮同时停靠,游客数量高达2万左右。虽然大量游客为朱诺市带来了可观的经济收益,但同时也引发了一系列环境和社会问题,如基础设施压力增大、自然资源受损、当地居民生活质量下降等,这些问题已经产生了有目共睹的影响,亟需采取措施进行改善。

可持续旅游是一个涵盖完整旅游体验的概念,涉及经济、社会和环境问题^[2],旨在改善游客体验并满足社区的需求,同时关注环境保护、社会福利和文化保存。作为一个旅游资源丰富但承载能力有限的城市,朱诺市需要在促进经济发展和保护环境之间找到平衡,以实现可持续旅游。

一、文献综述

早在1987年,世界环境与发展委员会在关于人类未来的报告《我们共同的未来》中便提出“可持续发展”理念,随后,该理念逐渐应用于旅游业,形成现在常说的“可持续旅游”。2015年12月4日,联合国大会通过决议,将2017年定为国际可持续旅游发展年,这表明人类对可持续旅游的重视程度日渐提高。李燕琴^[3]等站在多元文化视野的角度,强调地方性知识是可持续旅游得以发展的吸引物与驱动力;孙业红^[4]等使用韧性作为刻画旅游业不确定性的属性,强调生物和文化多样性在可持续旅游良性发展的重要作用;宋雨新^[5]等则将旅游和农业文化遗产结合,构建农业文化遗产地旅游承载力指标体系,为其旅游开发和可持续发展提供建议。

在可持续发展理念的基础上,诸多学者利用跨学科理论方法和模型,从定量的角度对生态可持续、旅游可持续等领域展开研究。薛景文^[6]等根据DPSIR模型构建指标体系,采用TOPSIS法对我国山西省水资源脆弱性的时空变化展开分析;类似地,王毅勇^[7]等同样基于DPSIR构建评价指标体系,使用综合指数法、TOPSIS法和VIKOR等方法对我国陕西省各地级市的水生态安全进行评价,并进行障碍度分析及障碍因子识别;杨友宝^[8]等以长江中游城市群为例,基于DPSIR构建旅游生态安全评价指标体系,然后采用熵值法、地理空间分析方法和面板回归模型等,刻画分析环境规制对旅游生态安全的影响,进而对可持续旅游提出建议。

基于此,本文聚焦美国阿拉斯加州朱诺市的可持续旅游管理问题,结合其他学者针对类似问题的研究方法,旨在根据现有数据构建一套科学合理的评价指标体系,并运用熵权TOPSIS法得出影响朱诺市可持续旅游的三大指标住房供应率、交通流和当地人收入的重要性差异,然后基于DPSIR构建非线性规划模型,计算得出在满足朱诺市旅游可持续发展要求的前提下,使得其旅游总收入达到最大的条件,结合当地旅游业发展现状,为促进旅游业可持续稳定发展提出参考。

二、模型假设

考虑到实际问题往往较为复杂,包含诸多因素,本文首先做出一些合理的假设以简化模型,以下是假设内容及其解释:

假设1:本文中使用的数据均准确。

解释1:数据来源于各大政府官网,政府作为公共权力的代表,其官方网站发布的数据通常具有高度的权威性。这些数据

往往经过政府相关部门的严格审核和把关,确保其真实性和准确性。

假设2:使用游客平均支出乘不同商品税率及对应的是否购买该商品的0-1变量的线性组合来表示来自每位游客的税收收入。

解释2:这一假设简化了税收收入的计算过程,同时考虑到了游客支出、税率以及商品购买情况等多个因素,使得税收收入的估算更加贴近实际情况。

三、部分变量符号解释

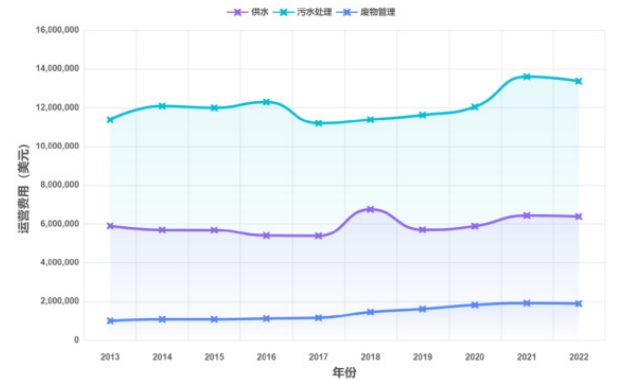
表1 部分变量符号含义及其单位

变量符号	含义	单位
x_1	游客数量	人
x_2	基础设施	/
x_3	承载能力	/
x_4	隐性成本	元/日
x_5	当地人满意度	/
x_6	游客人均支出	元/人

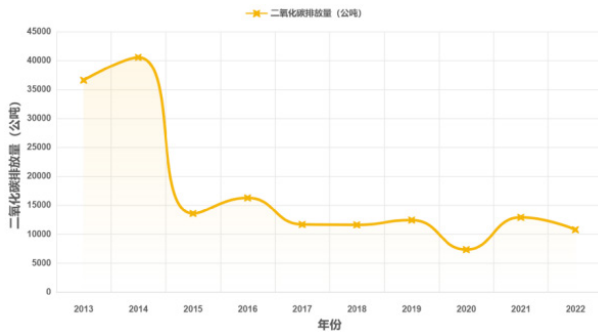
四、数据可视化描述

为使得所建模型更加合理,本文的数据来源均为政府和数据公司等官方网站,包括但不限于朱诺市政府、DATA US平台、Rain Coast数据公司等。例如,本文在专门针对朱诺市旅行预算的官方网站中找到了预算成本,以此作为游客的人均支出数据;在国会大厦垃圾填埋场提供的温室气体排放详情网站中找到了和其他温室气体的排放数据,以此作为碳足迹的衡量标准等。

为更好地呈现所用数据,本文使用图表对部分重要数据进行可视化处理。



(a) 2013—2022年朱诺市旅游业隐性成本数据折线图



(b) 2013—2022年朱诺市温室气体每单位比较的吨排放量（以当量计）

> 图1 部分重要数据折线图

五、模型1：基于熵权 TOPSIS的评分模型

在构建可持续的旅游模型之前，为深入了解变量下面各二级指标的重要性，本文使用熵权 TOPSIS法，对模型中的重要变量当地人对于大力发展旅游业的看法的3个二级指标进行打分，它们分别是住房供应率、交通流（包括主要道路日均流量和日均乘客量）、当地人收入。当地人的看法可大致分为4类：积极、中立、消极和无影响，并进行如下量化赋值，针对朱诺市对应指标2015—2021年的数据进行求解。

$$attitude = \begin{cases} 1, & \text{积极态度} \\ 0, & \text{中立或无影响态度} \\ -1, & \text{消极态度} \end{cases}$$

熵权 TOPSIS是一种综合评价方法，它结合了熵权法和 TOPSIS（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution）模型的优势^[9]。其实现步骤为：

（一）数据标准化

在本问题中，住房供应率和交通流（包括主要道路日均流量和日均乘客量）均为负向指标，当地人收入为正向指标。设原始数据矩阵，为消除各指标的量纲和取值范围的不同对最终结果可能造成的影响，本文采用以下标准化方法进行处理并得到标准化矩阵 $Z=(z_{ij})_{n \times m}$ ：

- 对于正向指标，标准化后的数据

$$z_{+}^{*} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

- 对于负向指标，标准化后的数据

$$z_{-}^{*} = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}$$

这里和分别表示数据的最大值和最小值。

（二）计算熵值和熵权

第项指标的信息熵为

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \cdot \ln p_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$$

这里

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$$

根据信息熵计算各指标的权重为

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j}$$

（三）构建加权标准化决策矩阵

将标准化矩阵按照熵权加权得到加权标准化矩阵 $V=(v_{ij})_{n \times m}$ ，

这里

$$v_{ij} = w_j \cdot z_{ij}$$

（四）计算到正理想解和负理想解的距离。

$$1. \text{到正理想解的距离 } D_i^{+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^{+})^2}$$

$$2. \text{到负理想解的距离 } D_i^{-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^{-})^2}$$

（五）计算相对邻近度 C_i 并排序

$$\text{这里 } C_i = \frac{D_i^{-}}{D_i^{-} + D_i^{+}}$$

根据 C_i 的大小对方案进行排序， C_i 的值越大表示方案越优。

针对2015—2021年的数据，求解该模型并得出三大指标的权重如表2所示：

表2 三大指标权重

指标名称	权重
住房供应率	19.29%
交通流	45.69%
当地人收入	35.02%

由此可见，交通流的重要性最高，占45.69%，表明当地居民非常看重交通的便利性和效率；当地人收入的权重较高，占35.02%，仅次于交通流，表明经济收入对当地居民的生活满意度有着显著影响，这可能是因为该市的经济活动水平较高，或者居民对生活质量有较高的期望；住房供应率的重要性最低，仅占19.29%，可能表明该市的住房供应相对稳定或不是居民最关心的首要问题。

TOPSIS评分与排名如表3所示：

表3 TOPSIS评分与排名

年份	TOPSIS评分	排名
2015	0.2510	6
2016	0.3653	4
2017	0.2858	5
2018	0.4027	3
2019	0.2432	7
2020	0.5417	2
2021	0.7819	1

由此看出，从2015年到2021年，朱诺市当地人的满意度评分整体呈现上升趋势。特别是从2019年开始，评分显著增长，到2021年达到最高值0.7819。随着评分的增加，各年份的排名也相应发生变化。2015年和2019年排名较低，分别为第6和第7；而2020年和2021年则分别位居第2和第1，显示出显著的改善。

六、模型2：基于DPSIR的可持续旅游非线性规划模型

DPSIR模型，全称为“驱动力-压力-状态-影响-响应”（Driving forces-Pressure-State-Impact-Response）模

型，是一种系统性分析框架^[10]。它最早由经济合作与发展组织（OECD）在1993年提出，并随着全球环境问题的日益严峻而得到广泛应用。针对此问题，驱动力包括提升当地人满意度等方面；压力包括环境、资金和隐性成本等方面；状态主要是指在驱动力和压力的作用下，可持续旅游的发展状况，本文用承载能力来衡量。对于影响和响应，本文将针对模型的结果进行分析，深入挖掘可持续旅游对人类社会经济活动和生态系统产生的影响以及人类的应对措施，以此应对朱诺市正面临的挑战。

非线性规划（Nonlinear Programming，简称NLP）是运筹学的一个重要分支，它研究一个n元实函数在一组等式或不等式的约束条件下的极值问题，且目标函数和约束条件中至少有一个是未知量的非线性函数。

本研究希望在对自然和当地人的负面影响最小的约束下，年收入达到最大，而年收入包括旅游收入、税收收入并减去隐性成本和来自税收的额外收入用于某些方面的支出。由于本文找到的游客数量和人均支出均为日数据，需要乘365以转化为年数据。由此，针对朱诺市可持续旅游问题，本文将结合DPSIR的思想，构建如下非线性规划模型：

$$\max z = 365y_1 + 365y_2 - y_3 - x_4$$

该模型满足以下约束条件：

约束一：日均旅游收入等于日均游客数量和游客人均日支出的乘积，即

$$y_1 = x_1 \cdot x_6$$

约束二：日均税收收入等于每日总收入和税率的乘积，即

$$y_2 = x_1 \cdot x_6 \cdot x_7$$

约束三：来自税收的额外收入被用于支持保护、改善基础设施和发展社区项目，具体地，由朱诺市财报，本文分成社会服务、公共安全、公共工程、公共交通、社区发展、可负担住房、旅游与会议7个指标，并分别设为 c_1 、 c_2 、……、 c_7 。即

$$y_3 = \sum_{i=1}^7 c_i$$

约束四：状态方面，承载能力包括自然资源承载力和当地政府资金的承载力，具体地，本文选取较为重要的4个指标纳入模型，分别是游客人数上限、生活用水（自来水）供应预算、废物管理预算、目的地碳足迹。游客数量不大于已经对可持续旅游造成威胁的游客数量2060000，即

$$x_3 = t_0 + x_{31} + x_{32} + f_0$$

$$x_1 \leq t_0 = 2060000$$

约束五：为保证可持续性，生活用水（自来水）供应预算不大于当前预算4695526，这里将当前预算看作该方面的当地政府资金的承载能力（下文废物管理和目的地碳足迹同理），即

$$x_{21} \leq x_{31} = 4695526$$

约束六：废物管理预算不大于当前预算1465072，即

$$x_{22} \leq x_{32} = 1465072$$

约束七：目的地碳足迹不大于当前数据341，即

$$x_{23} \leq f_0 = 341$$

约束八：压力方面，隐性成本主要包括温室气体（包括但不限于 CO_2 ）、垃圾处理、供水、污水处理4个方面的成本，分别设为 x_{41} 、 x_{42} 、 x_{43} 、 x_{44} 。即

$$x_4 = x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44}$$

约束九：驱动力方面，当地人看法主要包括三个方面，分别是住房供应率、交通流（包括主要道路日均流量和日均乘客量）、当地人收入。为保证当地人满意度，其看法的打分不小于当前数值，即

$$x_5 \geq x_{50}$$

约束十：根据朱诺市政府官网，所有商户均须在购买时征收销售税，所有商品、所有服务和所有非住宅租赁的销售税率均为5%（租金包括商业不动产和有形动产）；所有酒精饮料销售均需加收3%的税，这意味着这些饮料，无论何种形式，均按8%的税率征税；所有居住方式为短期客房租赁（入住时间少于30天）的游客均须征收9%的附加税，这意味着酒店、汽车旅馆和其他短期住宅租赁的总税率为14%。为描述这种不同商品或服务税率不同的现象，本文采用 x_{71} 和 x_{72} 这两个0-1变量进行处理。即

$$x_7 = 0.08x_{71} + 0.14x_{72} + 0.05(1 - x_{71} - x_{72})$$

$$x_{71} = \begin{cases} 1, & \text{酒精饮料} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$x_{72} = \begin{cases} 1, & \text{居住方式为短期客房租赁（入住时间少于30天）} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

约束十一：为保护门登霍尔冰川，其消融速度不应大于当前消融速度5，即

$$v \leq v_0 = 5$$

本文以前述数据为例，使用遗传算法求解该模型。遗传算法（Genetic Algorithm，GA）是一种模拟达尔文生物进化过程的优化算法，通常用于解决复杂的优化问题^[11]。它通过对问题的解空间进行搜索，以找到最优解或近似最优解。

由此求得 $x_1=1873921$ ， $x_{71}=0$ ， $x_{72}=1$ ， $x_7=0.14$ ， $\max z=167930393.12$ 。即当游客数量为1873921，居住方式为短期客房租赁（入住时间少于30天）时， z 有最大值167930393.12，这便是基于DPSIR的可持续旅游总收入最大值。

七、结束语

本文基于DPSIR模型和非线性规划方法，构建了可持续旅游模型，以朱诺市为例进行了深入研究，并通过遗传算法进行编程求解。由此我们得到了以下主要结论，并针对这些结论提出相关建议。

（一）朱诺市可持续旅游模型结论

1. 当游客数量为1873921时，朱诺市的年收入达到最大值167930393。这表明在当前的旅游结构和资源承载能力下，存在一个最优的游客数量使得年收入最大化。

2. 通过熵权TOPSIS综合评价方法，本文发现交通流在影响朱诺市旅游业发展的三大指标中权重最高，说明交通设施的便利

性和效率对提升旅游业竞争力至关重要。

3. 居民满意度评分从2015年到2021年整体呈现上升趋势，特别是在2019年后显著增长，这可能与朱诺市在旅游管理和与服务方面的改进有关。

（二）朱诺市可持续旅游发展建议

1. 建立资源－游客动态调控机制。结合生态敏感性分区，在核心保护区采用预约制限制客流，降低生态环境压力；设立碳足迹监控系统，测算在景区就餐、行车、住宿等的碳排放，以便确定合理的游客量。

2. 推进基础设施智慧化与低碳化升级。综合运用“互联网

＋”公交动态调度、共享电动车电子围栏管理、无人接驳车路径规划等，将各种智慧交通功能聚合，统一调度管理。

3. 创新文旅产品与生态服务体系。在景区粘贴醒目的绿色旅游标识，并积极向社会宣传绿色旅游思想，增强旅客绿色旅游意识；设立智能垃圾分类回收点，通过积分换取纪念品等方式鼓励更多游客积极参与。

4. 深化区域协作与人才培育。与邻近城市联合发行区域旅游通票，延长游客在本地民宿的住宿时间；建立社区旅游创新中心，培训社区志愿者，提供多语种服务等。

参考文献

[1] Yin, W., & Weng, G. (2023). Research on the evaluation and improvement path of sustainable carrying potential of tourism environment in Beijing Tianjin Hebei under the background of dual carbon. *Journal of Tourism Management*, 45(2), 123–145.

[2] Faucheux, S., O’ Connor, M., & van der Straaten, J. (Eds.). (2013). *Sustainable development: Concepts, rationalities and strategies* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.

[3] 李燕琴, 徐晓. 多元文化视野中的地方性知识与可持续旅游 [J]. *旅游学刊*, 2021, 36(05):4–5.

[4] 孙业红, 宋雨新. 从韧性看可持续旅游发展 [J]. *旅游学刊*, 2021, 36(05):8–10.

[5] 宋雨新, 孙业红, 姚灿灿, 等. 农业文化遗产地旅游承载力研究——以浙江青田稻鱼共生系统为例 [J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(05):894–902.

[6] 薛景文, 陈攀, 张洪斌, 等. 基于 DPSIR–TOPSIS 的山西省水资源脆弱性时空变化分析 [J]. *水电能源科学*, 2025, (05):48–52.

[7] 王毅勇, 周超凡, 黄榕, 等. 基于 DPSIR–熵权的陕西省水生态安全评价及障碍诊断分析 [J]. *环境科学*, 1–16.

[8] 杨友宝, 王梦瑶. 长江中游城市群环境规制对旅游生态安全的影响效应研究 [J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2024, 47(05):11–20.

[9] Mateusz, P., Danuta, M., Małgorzata, Ł., Mariusz, B., & Kesra, N. (2018). TOPSIS and VIKOR methods in study of sustainable development in the EU countries. *Procedia Computer Science*, 126, 1683–1692.

[10] Carr, E. R., Wingard, P. M., Yorty, S. C., Thompson, M. C., Jensen, N. K., & Roberson, J. (2007). Applying DPSIR to sustainable development. *International journal of sustainable development & world ecology*, 14(6), 543–555.

[11] 吉根林. 遗传算法研究综述 [J]. *计算机应用与软件*, 2004, (02):69–73.