

基于投影寻踪模型的云南省旅游资源环境承载力评价

张博文*, 骆曼*, 冯佳佳, 张豪, 易则宇, 林锦屏#

云南大学地球科学学院, 云南 昆明

收稿日期: 2022年7月2日; 录用日期: 2022年8月1日; 发布日期: 2022年8月11日

摘要

研究旅游资源环境承载力对云南的旅游资源的可持续发展具有重要意义。本研究基于云南省旅游承载力相关数据, 从生态环境、社会经济环境以及旅游基础设施三方面建立指标体系, 运用投影寻踪模型和障碍度模型对2010~2020年云南省旅游资源环境承载力进行量化分析。研究结果表明: 1) 在十年的时间内, 云南省生态环境承载力从0.605上升为1.620, 社会经济承载力从0.744上升为1.439, 旅游基础设施承载力从0.237上升为2.018; 总体承载力从1.330上升为2.627, 说明云南省旅游资源环境承载力持续向好; 2) 通过障碍度模型研究发现, 云南省旅游资源环境承载力在持续向好的过程中, 仍受到人口自然增长率、人口密度以及空气质量的制约。

关键词

旅游资源环境承载力, 投影寻踪模型, 障碍度模型, 云南省

Evaluation of Environmental Carrying Capacity of Tourism Resources in Yunnan Province Based on Projection Pursuit Model

Bowen Zhang*, Man Luo*, Jiajia Feng, Hao Zhang, Zeyu Yi, Jinping Lin#

School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Jul. 2nd, 2022; accepted: Aug. 1st, 2022; published: Aug. 11th, 2022

*共同第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张博文, 骆曼, 冯佳佳, 张豪, 易则宇, 林锦屏. 基于投影寻踪模型的云南省旅游资源环境承载力评价[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(4): 721-731. DOI: 10.12677/aep.2022.124090

Abstract

The research on the carrying capacity of tourism resources and environment is of great significance to maintaining the sustainable development of tourism resources and the steady state of tourism environment functions in Yunnan Province. Based on the relevant data of tourism carrying capacity in Yunnan Province, this research establishes an indicator system from three aspects: ecological environment, socio-economic environment and tourism infrastructure. The projection pursuit model and the obstacle degree model are used to quantitatively analyze the carrying capacity of tourism resources and environment in Yunnan Province from 2010 to 2020. Research indicates: 1) In ten years, the ecological environment carrying capacity of Yunnan Province has risen from 0.605 to 1.620, the social and economic carrying capacity has risen from 0.744 to 1.439, and the tourism infrastructure carrying capacity has risen from 0.237 to 2.018; the overall carrying capacity increased from 1.330 to 2.627, indicating that the carrying capacity of tourism resources and environment in Yunnan Province continued to improve; 2) Through the study of the obstacle degree model, it is found that the carrying capacity of tourism resources and environment in Yunnan Province is still constrained by the natural population growth rate, population density and air quality in the process of continuous improvement.

Keywords

Environmental Carrying Capacity of Tourism Resources, Projection Pursuit Model, Obstacle Degree Model, Yunnan Province

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着近年来旅游业的迅猛发展, 旅游资源是否合理开发, 旅游资源环境承载力的大小逐渐成为衡量旅游可持续发展的评价标准之一。旅游资源环境承载力是指在一定的条件下, 旅游资源对游客正常的活动所支撑的能力, 具体表现为可承受的最大游客数量[1]。

国内有关旅游环境承载力研究始于 1995 年, 崔凤军对旅游环境承载力的定义、特征以及组成体系进行论述, 并将其作为旅游可持续发展的判据之一。旅游资源环境承载力最初以定性研究为主, 直到 20 世纪 90 年代, 多数学者开始进行定性与定量相结合的研究。席玮[2]运用熵权 TOPSIS 法对桂林旅游业可持续发展进行评价; 文波[3]利用物元分析理论, 模糊线性规划模型来测度旅游环境的承载力大小; 李强[4]运用层次分析法构建西湖生态旅游环境指标体系, 探究西湖名胜风景区的旅游可持续发展。随着旅游资源环境承载力研究方法的多元化和深化, 使得该领域的理论基础日趋完善, 研究成果层出不穷。

云南作为我国的旅游大省, 旅游资源丰富, 旅游业成为了支柱产业。旅游业的飞速发展给环境带来了一定的污染与危害, 对云南旅游可持续发展造成了一定的影响。

鉴于此, 本研究采用投影寻踪模型对云南旅游资源承载力进行评价, 并通过障碍度模型进一步揭示阻碍云南旅游可持续发展的影响因素, 为云南旅游业的可持续发展提供具有科学依据的参考。

2. 研究区概况与指标选取

2.1. 研究区概况

云南位于中国西南边陲, 介于北纬 21°8'~29°15', 东经 97°31'~106°11'之间, 国土总面积 39.4 万平方千米, 国境线长 4060 千米, 是中国边境线最长的省份之一。云南属于山地高原地形, 地貌复杂多变。山地、高原面积 37.0 万平方千米, 占云南省国土面积的 94%。此外, 云南海拔高差巨大。海拔最高点 6740 米, 位于卡瓦格博峰; 海拔最低点 76.4 米, 位于中越界河处。两地直线距离不到 900 千米, 海拔高差却超过 6000 米。

复杂的地势地貌使得云南气候类型多样, 具有寒、温、热三带气候, 以亚热带高原季风型为主, 干湿季节分明, 多样的气候类型使云南成为中国生物多样性最丰富的省份, 享有“动物王国”“植物王国”。云南多样的旅游资源为旅游业发展奠定了良好的基础。

2.2. 指标选取

旅游资源环境承载力是指不同区域在一定时期内, 在确保旅游资源合理开发利用的条件下, 资源环境能够承载的人口数量及相应的社会经济活动总量的能力[5], 是一个庞大且复杂的系统。因此, 基于科学合理、有代表性以及可获得性的原则, 本研究通过文献研究[6] [7] [8] [9]选取了生态环境承载力、社会经济环境承载力、旅游基础设施承载力 3 个子系统以及 14 个指标。其中生态环境承载力包括平均空气质量综合指数(mg/m^3)、绿化覆盖面积(平方公里)、生活垃圾无害化处理率(%)、污水处理率(%)四个指标; 社会经济环境承载力包括人均 GDP(元)、人口密度(人/ km^2)、人口自然增长率(%)、游客总人数(万人次)、旅游收入占总收入比重(%)五个指标; 旅游基础设施包括住宿、餐饮单位数(个)、公共厕所数量(座)、道路长度(万公里)、供水能力(亿立方米)、供电能力(亿千瓦小时)五个指标。

3. 指标体系构建与原始数据获取

3.1. 指标体系构建

基于论文前期的研究假设, 结合旅游资源环境承载力研究主题的实际情况, 参考学者的相关研究成果, 遵循系统性与完整性原则, 分别从生态环境承载力、社会经济环境承载力、旅游基础设施承载力三个方面构建云南旅游资源环境承载力评价指标体系(图 1), 共 14 个二级指标。

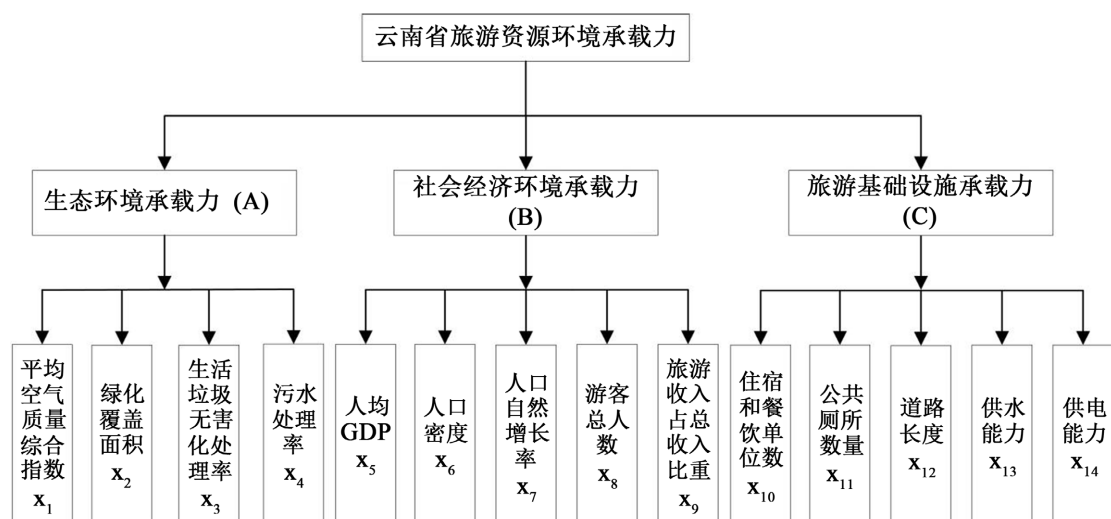


Figure 1. Evaluation system of Yunnan tourism resources and environmental carrying capacity
图 1. 云南旅游资源环境承载力评价体系

3.2. 原始数据获取

本研究数据主要来源于 2010~2020 年《云南省统计年鉴》与 2010~2020 年《中国统计年鉴》，无缺失数据，具体数据如表 1 所示。

Table 1. The original data of Yunnan tourism resources and environmental carrying capacity indicators (2009~2019)
表 1. 云南旅游资源环境承载力指标原始数据(2009~2019)

子系统	A					B				C				
年份 指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
2009	1.23	462.40	80.9	67.01	14,427	116.00	6.08	12307.49	0.12	505	1463	0.35	152.6	343.12
2010	1.31	511.36	88.3	74.7	16,866	116.62	6.54	14166.15	0.13	3044	1654	0.4	147.5	1364.85
2011	1.39	560.40	74.1	79.69	20,629	117.50	6.35	16727.16	0.14	3324	1739	0.46	146.8	1555.13
2012	1.39	626.23	82.7	83.55	23,891	118.21	6.22	20088.12	0.15	3498	2409	0.49	151.8	1533.94
2013	1.38	641.23	87.6	84.66	27,447	118.90	6.17	24505.85	0.16	3572	2534	0.52	149.7	1954.62
2014	1.80	674.75	92.5	86.71	29,874	119.60	6.2	28647.55	0.19	4915	2374	0.73	149.4	2347.21
2015	3.18	697.83	90	87.19	31,642	120.30	6.4	32914.03	0.22	8134	2619	0.62	150.1	2352.40
2016	3.05	742.01	93	89.16	34,416	121.00	6.61	43119.71	0.29	11,186	3240	0.6	150.2	2469.50
2017	3.06	850.83	92.7	92.31	38,629	121.80	6.85	57339.81	0.37	14,873	5091	0.61	156.6	2730.09
2018	3.05	807.15	98.2	94.02	43,366	122.50	6.87	68847.80	0.43	14,348	6158	0.7	155.7	3007.72
2019	2.77	854.17	99.8	95	47,944	123.30	6.43	80716.79	0.48	15,795	4610	0.78	154.9	3251.88

4. 研究方法

4.1. 投影寻踪模型

1) 指标归一化处理

由于各指标值的量纲不一样，为消除各评价指标值的量纲差异，故采用归一化处理。

正向指标

$$x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(i, j)}{x_{\max}(i, j) - x_{\min}(i, j)} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (1)$$

负向指标

$$x(i, j) = \frac{x_{\max}(i, j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(i, j) - x_{\min}(i, j)} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (2)$$

式中： $x^*(i, j)$ 是第 i 样本的第 j 个指标值； $x_{\max}(i, j)$, $x_{\min}(i, j)$ 分别是第 j 个指标的最大值与最小值； $x(i, j)$ 是指标值特征值的归一化序列。

2) 投影特征值

本研究将样本指标投影向量 $x(i, j)$ 投影到投影方向 $\alpha = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n)$ ，得到投影 z_i ：

$$z_i = \sum_{j=1}^n a_j x(i, j), \quad (3)$$

式中： a_j 为第 j 个指标在投影方向 α 上的单位长度向量， $x(i, j)$ 定义同上，在 z_i 为第 i 个处理的投影值。

3) 构造投影指标函数

投影指标函数的构造要求在综合投影时, 要对 z_i 进行一维散步图散布分析, 要求 z_i 散布图尽可能呈现局部凝聚现象, 而各凝聚团之间又尽可能分散开(2020)。

据此理论构造投影指标函数 $Q(\alpha)$:

$$Q(\alpha) = S_z D_z, \quad (4)$$

式中:

$$D_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) f(R - r_{ij}), \quad (5)$$

$$s_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z})^2}{m-1}}, \quad (6)$$

其中, S_z 是为投影值 z_i 的标准差, S_z 越大, 则整体投影上的点团更加分散; D_z 是投影值 z_i 的局部密度, D_z 越大则局部投影点越集中, 点团越密集; R 为局部密度的窗口半径, 一般 R 取 $0.1S_z$; r_{ij} 是投影值之间的距离, $f(R - r_{ij})$ 为单位跃阶函数, $R - r_{ij} \geq 0$ 时 $f(R - r_{ij}) = 1$, 当 $R - r_{ij} < 0$ 时, $f(R - r_{ij}) = 0$ (2021);

\bar{z} 为投影值的均值, 其表达式为 $\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^m z_i}{m}$ 。

4) 模拟退火法优化投影指标函数

不同的投影方向反应不同的数据特征, 投影方向越大, 即 $Q(\alpha)$ 越大, 则越能表现出高维数据的结构特征。因此本研究采用模拟退火法进行优化模型, 目标函数设置为:

$$\max Q(\alpha) = S_z D_z \quad (7)$$

$$s.t. = \sum_{j=1}^n a_j^2 = 1 \quad (8)$$

模拟退火基本原理是将高温粒子缓慢自然冷却, 最终在特定的温度下达到热平衡, 且能达到最低能量状态。本次研究设定并带入模拟退火算法的参数: 冷却速率 $\text{cooling} = 0.9$; 冷却的近似精度 $\text{eps} = 1e-3$; 算法最大迭代次数 $\text{maxiter} = 3000$; 不增加指数情况下, 降低冷却值 $\text{half} = 30$ 。

4.2. 障碍度模型

1) 熵值法计算权重

首先计算评价指标的概率矩阵 p_{ij} :

$$p_{ij} = x(i, j) / \sum_{i=1}^m x(i, j) \quad (9)$$

其次计算各指标的信息熵 E_j :

$$E_j = -\ln(m)^{-1} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (10)$$

最后计算各指标的权重 w_i :

$$w_i = (1 - E_i) / \left(m - \sum_{i=1}^m E_i \right) \quad (11)$$

2) 障碍度计算

$$Q_{ij} = \frac{w_j R_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_j R_{ij}} \times 100\% \quad (14)$$

其中, Q_{ij} 表示障碍度, R_{ij} 为指标偏离度, 可写成 $R_{ij} = 1 - x(i, j)$ 。

5. 数据与结果分析

5.1. 数据分析

首先对 14 个指标数据按照(1)进行归一化处理。

其次, 按照投影寻踪模型操作步骤进行运算, 当 $\max Q_A(\alpha) = 1.2186662$ 时, 得到生态环境承载力指标的最佳投影方向; 当 $\max Q_B(\alpha) = 1.0138429$ 时, 得到社会经济环境承载力指标的最佳投影方向; 当 $\max Q_C(\alpha) = 1.0869939$ 时, 得到旅游基础设施承载力指标的最佳投影方向; 当 $\max Q(\alpha) = 1.9925532$, 得到综合指标值的最佳投影方向。各指标最佳投影方向如表 2 所示。

Table 2. The subsystem evaluation index and the best projection direction of the comprehensive evaluation index

表 2. 子系统评价指标以及综合评价指标最佳投影方向

子系统	指标	投影向量	综合	指标	投影向量
生态环境承载力	x_1	0.4728915	云南省旅游资源环境承载力	x_1	0.3815966
	x_2	0.4662019		x_2	0.2507179
	x_3	0.5006029		x_3	0.2885015
	x_4	0.5553613		x_4	0.3192465
	x_5	0.4541941		x_5	0.2047161
	x_6	0.5070552		x_6	0.3743299
社会经济环境承载力	x_7	0.5553446		x_7	0.3655872
	x_8	0.341699		x_8	0.1363806
	x_9	0.3338216		x_9	0.1285826
	x_{10}	0.4145029		x_{10}	0.2055682
	x_{11}	0.297447		x_{11}	0.1376393
旅游基础设施承载力	x_{12}	0.4975017		x_{12}	0.2358442
	x_{13}	0.3996407		x_{13}	0.2240689
	x_{14}	0.5766212		x_{14}	0.2975269

根据子系统指标投影方向, 分别得到生态环境、社会经济环境和旅游基础设施三个子系统环境承载力评价模型:

$$z_A = 0.4728915x_1 + 0.4662019x_2 + 0.5006029x_3 + 0.5553613x_4;$$

$$z_B = 0.4541941x_5 + 0.5070552x_6 + 0.5553446x_7 + 0.341699x_8 + 0.3338216x_9;$$

$$z_c = 0.4145029x_{10} + 0.297447x_{11} + 0.4975017x_{12} + 0.3996407x_{13} + 0.5766212x_{14};$$

根据综合指标最优投影方向, 得到云南旅游资源环境承载力评价模型:

$$z = 0.3815966x_1 + 0.2507179x_2 + \dots + 0.2975269x_{14};$$

将归一化数据分别带入上述四个环境承载力评价模型, 得到不同年份的子系统以及总体投影值(表 3), 并绘制子系统以及总体投影值变化图(图 2)。

Table 3. Subsystem projection values and comprehensive index projection values

表 3. 子系统投影值以及综合指标投影值

年份	生态环境 承载力	排序	社会经济环境 承载力	排序	旅游基础设施 承载力	排序	旅游资源综合 承载力	排序
	投影值		投影值		投影值		投影值	
2009	0.605346742	11	1.0623998	4	0.236522047	11	1.330460933	11
2010	0.94062609	9	0.744497902	11	0.369869958	10	1.347949628	10
2011	0.802480365	10	0.887075746	10	0.461439574	9	1.377647417	9
2012	1.124922124	6	1.006119737	6	0.743010451	8	1.767454657	7
2013	1.263280614	5	1.074246402	3	0.785401883	7	1.885698077	5
2014	1.337631349	4	1.082050795	2	1.120229968	6	2.047872148	4
2015	0.990265045	8	0.96611731	7	1.125324395	5	1.67750658	8
2016	1.171815832	7	0.924246112	8	1.251556947	4	1.779401307	6
2017	1.354629963	3	0.909418538	9	1.792995583	3	2.094535278	3
2018	1.44690394	2	1.021686698	5	1.968824705	2	2.259052788	2
2019	1.620173665	1	1.439020553	1	2.01831609	1	2.627246943	1

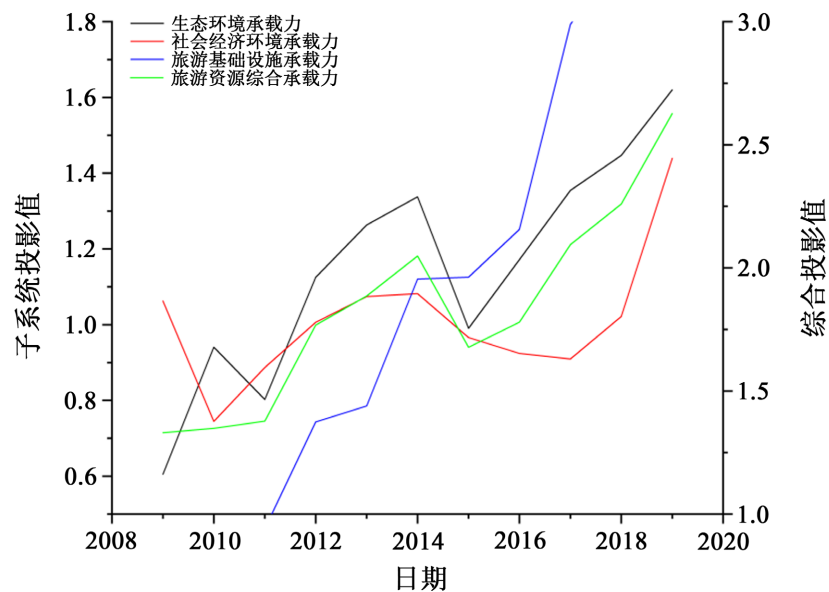


Figure 2. Subsystem index and projection value change curve of comprehensive index (2009~2010)

图 2. 子系统指标以及综合指标投影值变化曲线(2009~2010)

5.2. 结果分析

1) 生态环境承载力。云南生态环境承载力投影值最小值出现在 2009 年的 0.605, 最大值出现在 2019 年的 1.620, 上涨了 1.014。经过 11 年旅游业的有序发展, 云南省生态环境得到了显著改善, 与云南政府持续不断的推行改善生态环境政策, 具体表现在绿化面积逐年扩大, 污水处理率与生活垃圾无害化处理率达到了接近百分之百。但值得注意的是, 虽然云南总的生态环境持续向好, 但在 2011 和 2015 年分别出现反弹现象, 主要原因是 2011 年的生活垃圾无害化处理率由 2010 年的 88.3% 下降为 74.1%, 导致生活垃圾无法有效处理, 从而对生态环境造成破坏; 2015 年是因为平均空气质量指数由 2014 年的 1.8 上涨为 3.18; 这表明了提高生活垃圾无害化处理率以及空气质量对提升云南省生态环境具有重要的现实意义。

2) 社会经济环境承载力。云南社会经济环境承载力投影值最小值出现在 2010 年的 0.744, 最大值出现在 2019 年的 1.439, 整体来看, 云南省社会经济承载力持续向好, 这是由于自 2009 年以来, 云南省人均 GDP、来云南旅游游客总数以及旅游收入占总收入比重在不断上涨。但是通过图 2 社会经济承载力曲线可以看出, 社会经济承载力分别在 2010 年和 2019 年出现了巨大的反弹现象, 研究发现, 两次社会经济环境承载力的突然变化均与人口自然增长率有关: 2010 年人口自然增长率由 2009 年的 6.08‰ 上涨为 6.54‰, 上涨了 0.46‰; 2019 年人口自然增长率由 2018 年的 6.87‰ 下降为 6.43‰, 下降了 0.34‰。此外, 人口自然增长率也导致了人口密度的增大, 进一步阻碍了社会经济环境承载力的发展。

3) 旅游基础设施承载力。云南旅游基础设施承载力投影值最小值出现在 2009 年的 0.237, 最大值出现在 2019 年的 2.018。由图 2 旅游基础设施承载力曲线可看出, 从 2009~2019 年, 云南省旅游基础社会承载力呈现平滑增加状态, 主要是因为除供水能力在 2009~2014 年出现小范围波动外, 住宿、餐饮单位数、公共厕所数量、道路长度以及供电能力在 11 年来一直处于不断上涨的状态。这表明公厕、交通通达性、食宿等生活设施的不断完善, 对云南省旅游基础设施环境承载力提升具有显著作用。

4) 云南省旅游资源环境承载力综合分析。云南省旅游资源环境承载力投影值最小值出现在 2009 年的 1.330, 最大值出现在 2019 年的 2.627。主要是因为生态环境承载力、社会经济环境承载力以及旅游基础设施承载力三个子系统在 2009~2019 年期间总体上持续向好, 这也使得云南省旅游资源环境承载力在此期间呈现上升趋势。由图 2 旅游资源承载力综合曲线可以看出云南省旅游资源承载力呈现波浪式上升, 尤其是在 2015 年出现突然下跌的趋势, 研究发现, 主要是以下原因导致: ① 在生态环境承载力子系统分析中, 发现其在 2015 年平均空气质量指数突然上涨, 导致了 2015 年生态环境承载力投影值出现下降, 这与旅游资源环境承载力下降正好吻合; ② 2015 年的生活垃圾无害处理率由 2014 年 92.5% 下降为 90%, 道路长度由 0.62 万公里减少为 0.6 万公里, 这也是导致旅游资源环境承载力 2015 年突然下降的另一个原因; ③ 人口密度和人口自然增长率在 2009~2019 年期间, 基本呈增加趋势, 限制了旅游资源环境承载力的持续上涨。

6. 讨论

为进一步分析云南省旅游资源环境承载力的影响因素, 对其进行障碍因素评价。因为指标内容过多, 参考相关学者的设计标准[10][11], 只展示 2009 年到 2010 年排名前 7 位以及障碍度 $\geq 5\%$ 的障碍因子。

首先通过熵权法计算各指标因子的权重(表 4), 其次采用障碍度模型计算 2009~2019 年各指标因子的障碍度(表 5)。

Table 4. The weights of each index factor of the carrying capacity of tourism resources and environment in Yunnan Province from 2009 to 2019**表 4.** 2009~2019 年云南省旅游资源环境承载力各指标因子权重

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_7	w_8	w_9	w_{10}	w_{11}	w_{12}	w_{13}	w_{14}
0.10	0.06	0.04	0.04	0.07	0.06	0.11	0.13	0.08	0.10	0.06	0.07	0.04

Table 5. 2009~2019, the main obstacle factors and obstacle degree of tourism resources carrying capacity in Yunnan Province**表 5.** 2009~2019 年云南省旅游资源承载力主要障碍因子及障碍度

年份	障碍因子以及障碍度排序						
	1	2	3	4	5	6	7
2009	$x_4(25.2)$	$x_{14}(22.6)$	$x_2(19.9)$	$x_{12}(18.5)$	$x_{10}(16.9)$	$x_5(16.9)$	$x_3(16.0)$
2010	$x_4(18.3)$	$x_2(17.4)$	$x_{12}(16.4)$	$x_{13}(15.9)$	$x_5(15.7)$	$x_{14}(14.7)$	$x_{10}(14.1)$
2011	$x_3(21.8)$	$x_{13}(17.1)$	$x_2(14.9)$	$x_4(13.8)$	$x_5(13.8)$	$x_{10}(13.8)$	$x_{12}(13.8)$
2012	$x_3(14.5)$	$x_{10}(13.6)$	$x_{14}(13.4)$	$x_9(12.7)$	$x_{12}(12.5)$	$x_8(12.4)$	$x_5(12.1)$
2013	$x_{10}(13.5)$	$x_9(12.2)$	$x_{13}(12.0)$	$x_8(11.5)$	$x_{12}(11.2)$	$x_2(10.8)$	$x_{11}(10.7)$
2014	$x_{13}(12.6)$	$x_{10}(12.0)$	$x_9(11.2)$	$x_{11}(11.2)$	$x_6(11.1)$	$x_8(10.7)$	$x_5(9.1)$
2015	$x_1(19.3)$	$x_6(13.3)$	$x_{13}(11.3)$	$x_{11}(10.5)$	$x_9(10.1)$	$x_8(9.8)$	$x_7(9.2)$
2016	$x_1(18.1)$	$x_6(15.4)$	$x_7(15.2)$	$x_{13}(11.2)$	$x_{11}(8.6)$	$x_{12}(7.8)$	$x_8(7.7)$
2017	$x_7(22.1)$	$x_1(18.2)$	$x_6(17.9)$	$x_{12}(7.3)$	$x_3(6.0)$		
2018	$x_7(22.6)$	$x_6(20.0)$	$x_1(18.1)$				
2019	$x_1(15.3)$	$x_7(10.0)$					

空格表示障碍度 < 5%。

根据表 5, 对 2009~2019 年云南省旅游资源环境承载力主要障碍因子按照出现频次进行排序, 结果为:

$$x_{12} > x_{13} = x_{10} > x_5 = x_8 = x_6 = x_1 = x_7 > x_2 = x_3 = x_{11} > x_4 = x_{14},$$

其出现的频次依次为 7、6、6、5、5、5、5、4、4、4、3、3。

x_{12} (道路长度)在 2009 年到 2019 年期间出现了 7 次, 是出现频率最高的障碍因子, 说明其是普遍影响的障碍因子, 但进一步分析发现, x_{12} (道路长度)出现的 7 次, 其障碍因子等级分别为 4、3、7、5、5、6、5; 这说明 x_{12} (道路长度)虽然是普遍影响障碍因子, 但不是最主要障碍因子。因此道路通达性障碍因子虽然一直存在, 但对云南省旅游资源环境承载力并不起决定性作用。

x_{13} (供水能力), x_{10} (住宿、餐饮单位数)在 11 年期间出现了 6 次, 属于普遍影响障碍因子。 x_{13} (供水能力)出现次数对应障碍因子等级为 4、2、3、1、3、4 相对应年份分别为 2010、2011、2013、2014、2015、2016、2017, 这说明在这几年里, 供水能力相对于其他年份有所下降, 成为制约云南旅游资源环境承载力的主要障碍因子; x_{10} (住宿、餐饮单位数)出现次数对应障碍因子等级为 5、7、6、2、1、2、

相应对应年份分别为 2009、2010、2011、2012、2013、2014；通过原始数据可以看到在这几年期间，住宿以及餐饮单位数一直呈现增长的趋势，但相对于其他指标，尤其是旅游数量，其增长过于缓慢，成为制约云南旅游资源环境承载力的障碍因素，而在 2012、2013、2014 三年期间，更是成为最主要的障碍因子。但是随着近几年云南省社会经济的快速发展以及基础设施的不断完善，导致 x_{13} 与 x_{10} 障碍度快速下降，逐渐不再对云南省旅游资源环境承载力发展造成阻碍。

x_5 (人均 GDP), x_8 (游客总人数), x_6 (人口密度), x_1 (平均空气质量综合指数)以及 x_7 (人口自然增长率)出现次数对应的等级分别为 6、5、5、7、7；6、4、6、6、7；5、2、2、3、2；1、1、1、2、3；7、3、1、1、2。由其对应等级可以看出， x_5 (人均 GDP), x_8 (游客总人数)虽然在 11 年内出现了 5 次，但是其障碍因素等级并不高，对云南省旅游资源环境承载力影响较小；反之， x_6 (人口密度), x_1 (平均空气质量综合指数), x_7 (人口自然增长率)出现次数对应障碍等级较高，其中又以 x_1 (平均空气质量综合指数)为最。由表 5 可知，三者对应年份主要集中在 2014、2015、2016、2017、2018、2019。其原因是因为医疗设施不断完善，保障了人们健康，使得自然增长率不断提高，相应的人口密度也不断加大；同时，人们生活水平的不断提高导致私家车数量的增加，经济的快速发展也使得工厂污染加剧，由此使得空气质量开始不断下降。此外，人口自然增长率在 2019 年突然下降了 0.44%，使得其不再成为关键障碍因子，导致此情况发生的原因可能与 2019 年新冠肺炎的爆发有关。

x_2 (绿化覆盖面积), x_3 (生活垃圾无害化处理率), x_{11} (公共厕所数量)以及 x_4 (污水处理率), x_{14} (供电能力)分别出现了 4 次与 3 次，相对于其他障碍因子出现次数较少，并且其成为关键障碍因子的时间大多在前几年，随着云南的不断发展，其相应障碍因子也在不断下降。

综上，我们发现，云南旅游资源环境承载力的不断发展，主要原因在于绿化面积不断加大，污水处理率、生活垃圾无害化处理率的不断提高，人均 GDP、旅游收入的不断增加以及基础设施的不断完善。云南旅游资源环境承载力在不断发展的同时，仍面临着较大的障碍，主要体现在空气质量的下降以及人口自然增长率和人口密度的不断加大。

7. 结论

本研究运用投影寻踪模型对 2009 年 - 2019 年云南旅游资源环境承载力进行定量评价，评价结果显示云南省旅游资源环境承载力呈现波浪式上升。

从子系统上来看，云南省生态环境承载力、社会经济承载力以及旅游基础设施承载力分别从 0.605、0.744、0.237 上升为 1.620、1.439、2.018；总体上从 1.33 上升为 2.627，说明云南省旅游资源环境承载力在不断增强。

此外，为了进一步分析云南省旅游资源环境承载力发展情况，通过障碍度模型对各因素指标进行障碍度分析。结果表明，云南省旅游资源环境承载力在持续向好的过程中，仍受到人口自然增长率、人口密度以及空气质量情况的制约。

最后，旅游资源环境承载力评价是一项复杂的工程，合理的指标选取对分析结果会产生重要的影响。本研究受数据获取影响，指标还不够完善，有待进一步优化。

基金项目

国家自然科学基金项目(41561031, 41761109)。

参考文献

- [1] 张广海, 刘佳. 旅游环境承载力研究进展[J]. 生态经济, 2008, 7(5): 81-83, 90.
- [2] 席玮. 基于 SD 的桂林旅游业可持续发展评价及仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.

-
- [3] 文波, 冉杰. 基于物元分析理论的黔东南旅游环境承载力研究[J]. 四川旅游学院学报, 2010(5): 43-46.
- [4] 李强. 基于层次分析法的扬州蜀冈 - 瘦西湖风景名胜区生态旅游环境研究[J]. 南方农业学报, 2012, 43(11): 1807-1812.
- [5] 费忠华, 徐辉. 江西省旅游资源环境承载力评价的科学计算[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(4): 46-52.
- [6] 徐美, 刘春腊, 刘小铭, 周慧灵. 基于投影寻踪模型的湖南省资源环境承载力评价及障碍因素诊断[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2021, 15(4): 53-59+84.
- [7] 张笃川. 河南省乡村旅游资源环境承载力测度[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(3): 293-298.
- [8] 张燕华, 王娜. 西藏旅游环境承载力评价——以纳木错景区为例[J]. 西藏民族大学学报(哲学社会科学版), 2019, 40(3): 117-123.
- [9] 费忠华, 徐辉. 江西省旅游资源环境承载力评价的科学计算[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(4): 46-52.
- [10] 苏飞, 张平宇. 基于集对分析的大庆市经济系统脆弱性评价[J]. 地理学报, 2010, 65(4): 454-464.
- [11] 李文正, 董莉丽, 刘宇峰, 马新萍, 孙铂. 陕西省城市教育竞争力时空演变特征及障碍因子诊断——基于2008-2019年地级城市数据[J]. 资源开发与市场, 2021, 37(12): 1471-1479.