

DOI: 10.20103/j.stxb.202410152510

杨春宇, 葛鹏, 陈梅, 尤碧莹, 陈子远, 丁宇. 旅游生态系统空间均衡演化量测与动态评估方法研究. 生态学报, 2025, 45(13): - - .
Yang C Y, Ge P, Chen M, You B Y, Chen Z Y, Din Y. Study on the measurement and dynamic assessment methods of spatial equilibrium evolution in tourism ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - - .

旅游生态系统空间均衡演化量测与动态评估方法研究

杨春宇^{1,5,*}, 葛 鹏², 陈 梅³, 尤碧莹⁴, 陈子远⁴, 丁 宇⁴

1 贵州财经大学贵州旅游经济与管理研究院, 贵阳 550025

2 贵州理工学院交通工程学院, 贵阳 550025

3 贵州财经大学发展规划处, 贵阳 550025

4 贵州财经大学工商管理学院, 贵阳 550025

5 贵州财经大学绿色发展战略研究院, 贵阳 550025

摘要:旨在科学量测与评估旅游生态系统“空间均衡”演化状态,以推动旅游地可持续发展。首先,基于系统科学研究范式探寻旅游生态系统演化发展效率与公平的动态平衡点与均衡状态,尝试构建一个基于“自然利用效率子系统”和“社会公平发展子系统”的旅游生态系统“空间均衡”理论演化模型。尔后,基于压力-状态-响应(PSR)模型构建了包含9个维度的量测指标体系,综合运用嫡权法、极差法和模糊聚类法量测旅游生态系统“空间均衡”实际演化状态。最后通过对比分析中国丹霞(贵州赤水)世界自然遗产地“空间均衡”实测状态值与理论值,获得以下研究结果:(1)构建的理论演化模型较好地拟合了案例地旅游生态系统“空间均衡”演化轨迹,实测状态值围绕演化理论值呈现短期振荡,长期“S”型演化特征;(2)根据理论模型测算中国丹霞(贵州赤水)的旅游生态系统“空间均衡”演化周期约为50年。其中,2000—2020年期间,中国丹霞(贵州赤水)历经滞后-过载-平衡的演化过程。与案例地“空间均衡”演化理论值相比,实测状态值呈现“进慢则退”的趋势;(3)中国丹霞(贵州赤水)2000年旅游生态状态指数处于0.089—0.180之间(五级),经过近20年的逐步恢复,截至2020年其生态状态指数已经恢复至0.2362(三级)以上。一定程度上实现对旅游生态系统“空间均衡”演化拟合与动态评估,推动该领域研究从单一的静态评估向多样化、动态化和定量化转变,为旅游地可持续发展提供系统理论和方法依据。

关键词:旅游生态系统;空间均衡;Logistic 曲线模型;动态评估;演化周期

Study on the measurement and dynamic assessment methods of spatial equilibrium evolution in tourism ecosystems

YANG Chunyu^{1,5,*}, GE Peng², CHEN Mei³, YOU Biying⁴, CHEN Ziyuan⁴, DIN Yu⁴

1 Guizhou Tourism Economy and Management Research Institute, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China

2 School of Transportation Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550025, China

3 Development Planning Office, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China

4 School of Business Administration, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China

5 Green Development Strategy Research Institute, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China

Abstract: This study aims to scientifically measure and evaluate the evolutionary state of “spatial equilibrium” in tourism ecosystems to promote the sustainable development of tourist destinations. First, based on the paradigm of systems science, the study explores the dynamic balance and equilibrium state between efficiency and equity in the evolutionary development of tourism ecosystems. A theoretical evolutionary model of tourism ecosystem “spatial equilibrium” is constructed, integrating the “natural resource utilization efficiency subsystem” and the “social equity development subsystem.”

基金项目:国家自然科学基金(42161035,41961025)

收稿日期:2024-10-15; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chunyu yang@163.com

Subsequently, a measurement index system comprising nine dimensions is developed based on the Pressure-State-Response (PSR) model. The actual evolutionary state of “spatial equilibrium” in the tourism ecosystem is quantitatively assessed using a combination of the entropy weight method, range method, and fuzzy clustering method. Finally, a comparative analysis between the empirically measured values and the theoretical values of “spatial equilibrium” in the China Danxia (Chishui, Guizhou) World Natural Heritage site yields the following findings: (1) The constructed theoretical evolutionary model effectively fits the evolutionary trajectory of the “spatial equilibrium” in the case study area’s tourism ecosystem. The empirical state values exhibit short-term oscillations around the theoretical evolutionary values, displaying a long-term “S-shaped” evolutionary trend. (2) The theoretical model estimates that the evolutionary cycle of “spatial equilibrium” in the tourism ecosystem of China Danxia (Chishui, Guizhou) is approximately 50 years. During the period from 2000 to 2020, the tourism ecosystem in China Danxia (Chishui, Guizhou) underwent an evolutionary process from lagging to overloading and finally toward equilibrium. Compared to the theoretical values of “spatial equilibrium” evolution in the case study area, the empirical state values exhibit a “slow progress leading to regression” trend. (3) In 2000, the tourism ecological state index of China Danxia (Chishui, Guizhou) ranged between 0.089 and 0.180 (fifth level). After nearly 20 years of gradual recovery, by 2020, the index had improved to above 0.2362 (third level). To some extent, this study achieves the fitting and dynamic assessment of the evolutionary process of “spatial equilibrium” in tourism ecosystems, advancing research in this field from static evaluation toward diversified, dynamic, and quantitative approaches. This provides a systematic theoretical and methodological foundation for the sustainable development of tourist destinations.

Key Words: tourism ecosystem; spatial equilibrium; logistic curve model; dynamic assessment; evolutionary cycle

旅游生态系统作为一个综合性系统^[1-5],因其演化过程复杂且存在空间异质性和演化状态失衡而受到诸多学科关注。客观准确认识旅游生态系统“空间均衡”演化机理、科学量测其发展状况与预测未来发展趋势是旅游地可持续发展面临的关键性命题之一。不同学科对系统均衡的研究范式各异,研究方法林林总总,但无论探寻视角与标准如何选择与确定,都以两个认识为前提,即:一是旅游生态系统是包含了旅游目的地、通道和客源地的综合性系统;二是系统中存在着人与自然、人与人的矛盾,这些矛盾共同推动着该系统演化过程^[6]。这两个认识前提也就决定了我们无法采用线性思维方式对其进行“分割”式研究,而应采用适合这种复杂特性的系统性思维来加以研究和理解。

1 文献综述

旅游生态系统演化发展由于复杂性、空间异质性及其状态失衡已成为物理学^[7]、生态学^[8-10]、地理学^[11-12]、经济学^[13-16]、系统科学^[17-20]等学科普遍关注的焦点。对于旅游生态系统“空间均衡”研究而言,不同学科尝试基于各自本体论、认识论、方法论对其进行系统研究,主要涉及以下几个方面:

(1) 理论体系构建。旅游生态系统作为一个开放且复杂的巨系统,包含了资源开发与保护、旅游社会经济与生态效益、旅游供需等人地、人人主要矛盾关系体。这些矛盾是普遍的、绝对的,存在于旅游生态系统演化过程中,这些矛盾体的相互作用决定着旅游生态系统的演化与发展^[21]。这些矛盾体具有的复杂性、动态性、多尺度性等特征促使我们对旅游生态系统的认识由最初的单要素、单维度概念逐渐演变为涉及自然、社会、经济、环境、制度等多要素、多维度的复杂演化系统。

基于此,自 20 世纪 80 年以来,旅游生态系统“空间均衡”研究领域呈现出多学科交叉与多理论融合的趋势,包括一般系统论^[22-26]、耗散结构理论^[27-28]、系统动力学^[29-32]在内的系统科学理论探究体系;涉及人地协调^[33-37]、共生理论^[38]、社会-生态系统与韧性^[39-44]在内的人地关系理论探究体系;涵盖耦合思想与评价体系^[45-49]、旅游地耦合时空演化^[50-57]在内的耦合理论探究体系。上述研究现状一方面说明旅游生态系统“空间均衡”理论研究的多元化趋势,另一方面也间接说明该领域仍处于“前范式”阶段,对旅游生态系统“空间均

衡”演化研究仍处于探索初期。

(2) 量测研究与方法选择。目前国内外学者对旅游生态系统“空间均衡”量测主要包括旅游生态足迹^[58-59]、旅游环境承载力^[60-61]、旅游生态效率^[62-63]、旅游生态能值^[64-65]、旅游生态安全^[66-67]等方面,通过构建压力-状态-响应(PSR)框架模型^[68-71]、驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)框架模型^[72-76]、联合国千年生态系统评估(MA)方法^[77]、文化生态系统服务(CES)框架^[78]及相应的评价指标体系对旅游生态系统可持续发展状态进行综合评价。在旅游生态系统演化与监测中学者们利用遥感数据^[79]、空气质量数据^[80]、夜间灯光数据^[81]、土地利用数据^[82]、经济发展数据^[83],并运用ARIMA^[84]、随机森林^[85]、SVR方法^[86]、VAR模型^[87]等方法融合多源数据,以期提高解析旅游生态系统可持续发展状态的能力。

上述旅游生态系统“空间均衡”演化理论与实践研究成果为本文及后续研究奠定了坚实的基础,但在该领域仍有值得我们进一步深入探讨与挖掘的研究问题:(1)基于本体论而言,现有理论探讨与量测方法大多秉承“静态思维”(静态均衡模型分析)和“单维”(单一理论)研究方法,背离了旅游生态系统实际发展状况,导致该领域理论研究尚未形成统一的理论范式与共同纲领^[88];(2)基于认识论而言,旅游生态系统是一个自适应复杂演化系统,任一旅游生态系统“空间均衡”在不同的时空演化阶段其均衡态是由其自身正、负反馈循环形成的耦合关系网及其稳定机制所决定的^[57],也即是说,我们无法找到一个通用的系统“空间均衡值”去量测不同的旅游生态系统。因此,这就要求我们在探寻旅游生态系统“空间均衡”演化规律(共性)基础上去量测各系统“空间均衡”演化值(个性);(3)基于方法论而言,现有量测研究及其指标体系通常涵盖了生态系统的活力、组织结构、恢复力、服务功能,以及与社区健康和教育水平相关的社会维度指标。这些研究在指标体系构建和定量分析方法上提供了参考,但是大多侧重于某一区域或者某一时间点的生态健康或者安全状态的分析,较少考虑系统“空间均衡”的不同时空演化阶段与尺度问题,也未能对演化规律进行进一步的数学模型构建。

因此,秉承“非线性思维”、“整体思维”、“关系思维”及“过程思维”的系统科学方式深入探究旅游生态系统“空间均衡”理论体系不失为一种有助于我们更深层次地理解旅游生态系统演化的研究思路。

2 理论框架与研究方法

2.1 理论框架

旅游生态系统内部矛盾的“自耦合”在系统演化不可逆性、自适应性这两个条件的结合下,在一个有限的时空范围内系统各要素相互作用所形成的正、负反馈循环圈对旅游生态系统演化起“自稳定”和“抑制”作用^[31-32]。该机制通过比较系统的输入与输出之间的差别值对系统进行调控以保持系统的稳定性(图1)。系统自动检测,并通过调节机制采取相应限制措施,以确保其有序和稳定发展^[57]。

旅游生态系统在自适应演化过程中,正、负反馈循环相互作用,如同一对推力与拉力,共同影响系统运行。这种作用机制推动系统围绕其“空间均衡”进行运动,并产生“涨落”现象,为系统的持续演化提供源源不断的发展动力。也就是说,旅游生态系统在受到局部、可承受范围内的扰动时,通过自身正、负反馈作用于整体,并通过系统调控机制进行调节与补偿,最终使旅游生态系统演化发展与区域自然、文化和人类生存环境形成良性互动的均衡理想状态^[6]。

与此同时,当我们追溯与审视上述多学科对旅游生态系统“空间均衡”的内涵界定与量测思路可以发现,“效率”与“公平”是其追求的终极目标。从旅游生态系统构成要素功能与价值出发,运用系统科学研究范式探寻旅游生态系统演化发展效率与公平的动态平衡点与均衡状态,我们可以尝试构建一个基于“自然利用效率子系统”(自然秩序作为负反馈机制限制系统资源占用超载)和“社会公平发展子系统”(基于市场配置的经济、社会制度作为监督保障体系保证际内与代际的公平使用)的旅游生态系统“空间均衡”理论演化模型(图2)。上述两只看得见与看不见的手综合作用于系统演化过程,使得旅游生态系统或是出现过度占用资源或是资源占用不足,二者交替出现,这一现象凸显了系统“空间均衡”演化过程不仅仅涉及系统从无序到有

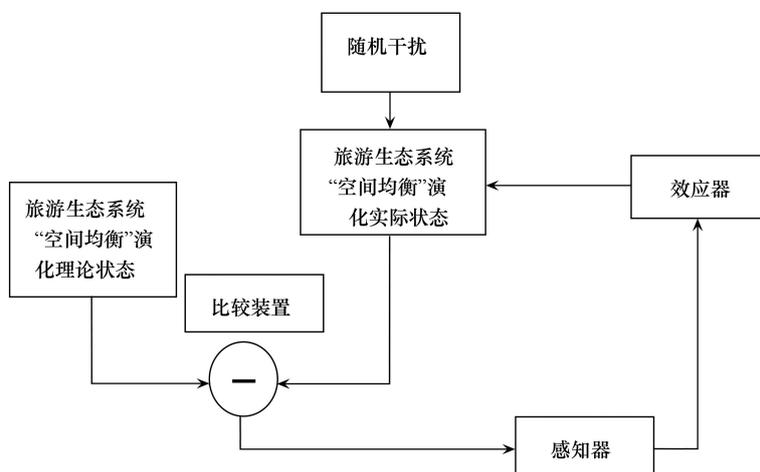


图1 旅游生态系统“空间均衡”演化反馈调节机制

Fig.1 Feedback regulation mechanism of “spatial equilibrium” evolution in tourism ecosystem

序,还有从有序到无序以及无序与有序之间交替变化,旅游生态系统既是以这样的整体方式得以形成、演化、发展和衰亡,又是以这样的整体方式为我们所观测与研究。由此延伸的理论内容可以关联与嵌套诸如旅游地生命周期、旅游环境承载力、旅游生态足迹、旅游生态效率与补偿、旅游可持续发展等等相关理论。正如效率是亚当·斯密经济学的理论基础,公平是马克思经济学的理论基础,“空间均衡”理论则可以成为旅游生态系统演化的理论基础^[88]。

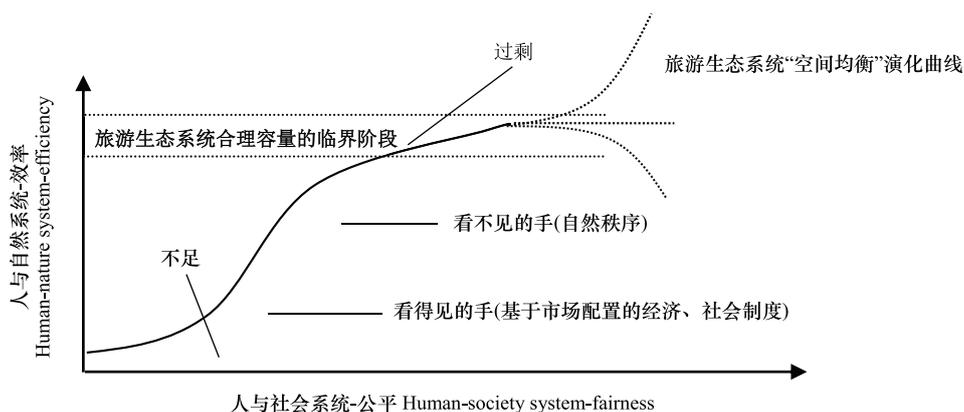


图2 旅游生态系统“空间均衡”演化理论模型

Fig.2 Theoretical model of “spatial equilibrium” evolution in tourism ecosystem

基于此,本文尝试探索以下理论与实践边际贡献:(1)以系统科学理论为指导构建旅游生态系统“空间均衡”演化理论模型并引入 Logistic 曲线数学表达式,以确定旅游生态系统“空间均衡”演化理论轨迹,为旅游生态系统“空间均衡”量测和动态评估奠定理论基础;(2)构建包含压力、状态、响应三大准则的量测指标体系,综合运用熵权法、极差法和模糊聚类法结合多源数据量测旅游生态系统“空间均衡”实际演化状态;(3)通过比较案例地旅游生态系统“空间均衡”演化理论值与实测状态差值,揭示案例地旅游生态系统“空间均衡”演化规律及其动态特征,以实现旅游生态系统“空间均衡”演化状态的动态评估,从而实现研究从单一的静态评估转变向动态化和定量化评估,为丰富旅游地持续发展提供系统理论和方法依据。

2.2 研究方法

2.2.1 旅游生态系统“空间均衡”数学表达式

旅游生态系统“空间均衡”演化理论模型图中的演化曲线是一条高度抽象的“S”型演化曲线,其主要特征

是:函数值 $f(t)$ 在初始阶段随时间 t 的推移而增长加速;进入发展阶段后,增长速度逐渐趋于稳定;最终, $f(t)$ 逼近一个极限值 K ,体现出系统的饱和特性和自然界限,其数学表达式为式(1):

$$f(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K - N_0}{N_0}\right)e^{-rt}} \quad (1)$$

其中, $f(t)$ 是在时间 t 时的因变量值, K 是系统的饱和值或极限值, r 是增长率,反映因变量随时间 t 的变化速度, N_0 是系统的初始值。

2.2.2 旅游生态系统“空间均衡”量测指标

压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)模型是经济合作与开发组织(OECD)与联合国环境规划署(UNEP)共同提出的概念框架,旨在反映人类活动对生态环境的压力、生态系统状态的变化,以及人类对生态变化的响应三者之间的相互关系。作为一个系统化分析工具,PSR模型在生态系统动态评估^[89]、生态安全与动态预警^[90]、土地利用健康监测^[91-94]等领域被广泛应用。本文基于PSR模型构建了三层指标体系用以量测旅游生态系统的“空间均衡”演化状态(表1)。其中,状态(State)主要从旅游生态系统的活力、组织力、弹性力三个维度进行评估,如旅游产业增长率(活力)、旅游资源的空间分布均衡性(组织力)和生态系统对扰动的恢复能力(弹性力)。压力(Pressure)通过旅游活动、社会经济压力和自然环境压力三个维度衡量外部压力,如旅游密度、人口增长率(社会经济压力)、以及自然灾害频率(自然环境压力)均是典型指标。响应(Response)主要从旅游政策、社会教育、生态环境响应三个维度评估人类社会的应对措施,具体指标包括环保法规的执行力度(旅游政策)、公众环保意识的提升(社会教育)、以及生态修复项目的实施情况(生态环境响应)。

表1 旅游生态系统“空间均衡”演化评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for “spatial equilibrium” evolution in tourism ecosystem

准则层 Criteria layer	维度层 Dimension layer	指标层 Indicator layer	权重 Weight	属性 Attributes	指标来源 Source of indicators
状态 S State (S) (0.20)	系统活力 S1	NDVI(无单位)S11	0.07	+	刘明华 ^[95]
		系统组织力 S2	COHESION(无单位)S21	0.09	+
	系统弹性力 S3	SHAPE_AM(无单位)S22	0.14	+	刘晓丹 ^[97]
		CONTAG 蔓延度(%)S23	0.29	+	高吉喜 ^[98]
压力 P Pressure (P) (0.48)	旅游活动压力 P1	Shannon 多样性(无单位)S24	0.06	+	徐明德 ^[99]
		生态弹性(无单位)S31	0.35	+	牛明香 ^[100]
		游客增长率(%)P11	0.03	+	李锦宏等 ^[101] 、陈丽等 ^[102]
		旅客密度(%)P12	0.23	+	张志明、许欢科 ^[103] 、陈丽等 ^[102]
	社会经济压力 P2	游客空间(%)P13	0.22	+	杨良健、曹开军 ^[104] 、陈丽等 ^[102]
		人类活动足迹指数(无单位)P21	0.05	+	高誉珈 ^[105]
		人口自然增长率(%)P22	0.03	+	李玲 ^[106] 、李锦宏等 ^[101]
	自然环境压力 P3	夜间灯光强度(Lm/m ²)P23	0.11	+	赵忠旭 ^[107]
		自然灾害数量(次)P31	0.09	-	张永江 ^[108] 、张志明、许欢科 ^[103]
		PM _{2.5} 浓度(ug/m ³)P32	0.06	-	张永江 ^[108]
响应 R Response (R) (0.32)	旅游政策响应 R1	二氧化硫浓度(mg/m ³)P33	0.07	-	杨良健、曹开军 ^[104] 、李锦宏等 ^[101]
		二氧化氮浓度(mg/m ³)P34	0.11	-	杨良健、曹开军 ^[104] 、李锦宏等 ^[101]
	社会教育响应 R2	生态规划文件数量(个)R11	0.08	+	吴发明 ^[109]
		学术论文出版物数量(个)R12	0.25	+	吴发明 ^[109]
	居民素质(%)R21	游客素质(%)R22	0.22	+	杨良健、曹开军 ^[104] 、李玲 ^[106]
		游客素质(%)R22	0.23	+	陈丽等 ^[102] 、张志明、许欢科 ^[103]
	生态环境响应 R3	垃圾无害化处理率(%)R31	0.10	+	王鹏等 ^[109] 、李玲 ^[106]
		固体废物综合利用率(%)R32	0.13	+	杨良健、曹开军 ^[104] 、张志明、许欢科 ^[103]

数据来源及处理方法:(1)社会经济数据来源于赤水市环境保护局、文化和旅游局、赤水市人民政府等官方网站公开发布的统计年鉴、行业报告、工作报告总结等。选取较为完整的 2000—2020 年的数据。土地覆被数据来自中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCG)^[110],空气质量数据来自圣路易斯华盛顿大学大气成分分析组分享的逐年 PM2.5 数据^[111],植被归一化指数来自 NASA 的 Earth Data 的 Modis13 数据^[112],“夜间灯光数据来自 WU Yizhen 整理并矫正后的数据^[113],人类活动足迹数据来自 UEMM 团队所共享的数据。其中,NDVI 数据、PM2.5 数据、夜间灯光数据、人类足迹数据等经过 GIS 裁剪后使用。生态景观的内聚力、AWSI(面积加权平均形状指数)、Shannon 多样性、蔓延度由 Fragstats 4.2 景观指数软件计算得出,生态弹性系数参照刘明华^[95]的相关研究设定,具体为:耕地 0.5、林地 0.9、草地 0.7、湿地 0.8、城镇用地 0.4、其他 0.1。

(2)采用熵权法对指标进行权重分配,以提高计算结果的科学性。采用极差归一化方法消除数据量纲差异,确保不同指标的可比性。采用插值法补全缺失数据。采用综合指数法计算旅游生态系统“空间均衡”的演化值。

2.2.3 模糊均值聚类

通过旅游生态系统“空间均衡”演化理论可知,系统实测状态值与演化理论值的偏差量是评估系统“空间均衡”演化程度的重要依据。在对实测状态值与演化理论值偏差量进行评估时,如何科学合理地划分评估区间至关重要。常用划分方法有标准差划分法^[114],等间距划分法^[115]。其中,等间距划分法是将目标值按照等间距由高到低划分为若干个等级,再对各区间进行定义,或者根据研究领域特点主观划分^[116]。然而,传统区间划分方法主观性较强,作为分类分级评估而言,确定一个合适的划分边界固然重要,但某些样本类别特征可能不是特别明显。因此,本文采用模糊均值聚类(Fuzzy C-Means)对案例地各年份指标数据进行聚类,这种灵活性在数据处理中往往更贴近实际情况;此外,模糊均值聚类并非严格将样本分配到某一个类别,而是通过隶属度矩阵描述了样本对各个类别的归属度^[117-118]。模糊均值聚类具体步骤如下:

(1) 初始化

选择隶属度矩阵的初始值。隶属度矩阵 U 是一个 $n \times c$ 矩阵,其中 n 为样本数, c 为聚类中心数。

(2) 计算聚类中心

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m \times X_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m} \quad (2)$$

式中, C_j 表示第 j 个聚类中心, u_{ij} 表示样本 X_i 对 C_j 的隶属度,而 m 表示模糊系数。

(3) 更新隶属度

根据样本与聚类中心的距离重新计算每个样本的隶属度。

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (3)$$

(4) 迭代

在每轮迭代中,隶属度矩阵随迭代更新,聚类中心也持续发生变化,重复步骤(2)和步骤(3)直至达到一定稳定状态或达到指定的迭代次数为止。这样得到的隶属度矩阵可以表示每个样本属于每个聚类的程度,而聚类中心则是聚类的代表点。

3 实证分析

3.1 研究区域概况

中国丹霞(贵州赤水)世界自然遗产(以下简称案例地)位于中国西南部贵州省赤水市和习水县境内,地处四川盆地和云贵高原的结合部,地理位置东经 $105^{\circ}73'$,北纬 $28^{\circ}42'$ 。遗产地面积为 273.64 km^2 ,缓冲区面积为 448.14 km^2 ,总面积达 721.78 km^2 。中国丹霞(贵州赤水)地貌区域保持了最完整、具有代表性的中亚热

带森林生态系统和物种多样性,拥有高等植物 2116 种和动物 1668 种。2010 年 8 月,贵州赤水作为中国丹霞的重要组成部分成功列入《世界遗产名录》。2023 年,赤水市地区生产总值(GDP)125.97 亿元,旅游总收入 123.71 亿元,旅游接待人次 1087.38 万人次。截至 2024 年 8 月,赤水市拥有 5A 级景区 1 个,4A 级景区 3 个,3A 级景区 7 个。

3.2 旅游生态系统“空间均衡”演化拟合结果

通过上文构建的旅游生态系统“空间均衡”演化测量指标,计算案例地 2000—2020 年的“空间均衡”实测演化值。利用 python 中的 curvefit 拟合工具包进行曲线拟合,标定参数 $r=0.1759, N_0=0.03, K=1$, 从而获得旅游生态系统“空间均衡”演化理论公式(式 4)。拟合优度 $R^2=0.97$, 表明模型拟合度较好。

$$f(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-0.03}{0.03}\right) e^{-0.1759t}} \quad (4)$$

基于公式(4),可以确定案例地在演化周期内任意年份的“空间均衡”演化理论值。其中,2000—2020 年实测状态值和理论演化值如表 2 所示:

表 2 中国丹霞(贵州赤水)2000—2020 年旅游生态系统“空间均衡”实测状态值与理论值

Table 2 The measured and theoretical state values of ‘spatial equilibrium’ in the tourism ecosystem of China Danxia (Chishui, Guizhou) from 2000 to 2020

年份 Year	实测状态值 Measured state value	理论演化值 Theoretical evolution value	年份 Year	实测状态值 Measured state value	理论演化值 Theoretical evolution value
2000	0.03	0.03	2011	0.16	0.17
2001	0.04	0.04	2012	0.21	0.2
2002	0.05	0.04	2013	0.25	0.23
2003	0.05	0.05	2014	0.30	0.26
2004	0.05	0.06	2015	0.34	0.3
2005	0.06	0.07	2016	0.38	0.34
2006	0.06	0.08	2017	0.41	0.38
2007	0.07	0.09	2018	0.43	0.42
2008	0.08	0.11	2019	0.44	0.46
2009	0.10	0.13	2020	0.43	0.51
2010	0.13	0.15			

Logistics 曲线模型的一阶导数反映了旅游地生态系统“空间均衡”演化的增长速率,通过求解式(4)的一阶导数,可以分析“空间均衡”演化增长趋势,并据此确定演化的起始时间和结束时间。其一阶导数如式(5)所示:

$$f'(t) = \frac{r \times (1 - P_0) \times e^{-rx_t}}{P_0 \times \left(1 + \frac{(1 - P_0) \times e^{-rx_t}}{P_0}\right)^2} \quad (5)$$

取最大增长速度的 5% 作为持续演化与停止演化的判断阈值,最终确定案例地演化周期为 50 年(1995—2045 年)。研究期(2000—2020 年)处于 S 型曲线斜率增大区域,表明案例地旅游生态系统“空间均衡”演化速率正处于快速上升期。

为进一步分析案例地实测状态值与理想演化曲线之间的关系,探索旅游生态系统“空间均衡”演化动态趋势,根据公式(4)及表 2 数据探索实测状态值和理论演化曲线的互动关系(图 3)。

结合图 3 可知,案例地 2000—2003 年实测状态值与理论演化曲线紧密贴合;2004—2012 年实测状态值处于理论演化曲线的下方;2013—2018 年实测状态值处于理论演化曲线的上方;2019—2020 年实测状态值又一次处于理论演化曲线的下方。

短期来看,旅游生态系统“空间均衡”实测状态值围绕理论演化曲线呈现短期振荡波动特征。长期来看,案例地的实测状态值与理论演化曲线整体呈现出相似的增长趋势。在演化初期,其旅游生态系统“空间均衡”演化值趋近于 0,随着旅游地逐渐发展、基础设施逐步完善、相关资金、政策持续支持,旅游生态系统“空间均衡”演化值亦在不断演化与增长,直至达到上限阈值。整体而言,案例地在 2000—2020 年呈现出曲折上升趋势。根据赤水市土地利用分类,以系统活力、系统组织力、系统弹性力作为生态状态子系统的测量指标,可获得 2000—2020 年中国丹霞(贵州赤水)生态状态变化(图 4)。

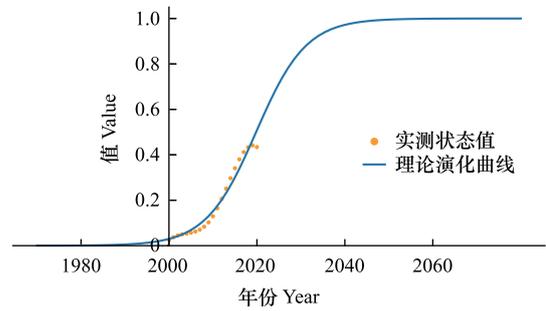


图 3 旅游生态系统“空间均衡”理论演化曲线与实测状态值
Fig.3 Theoretical evolution curve and observed evolution values of “spatial equilibrium” in tourism ecosystem

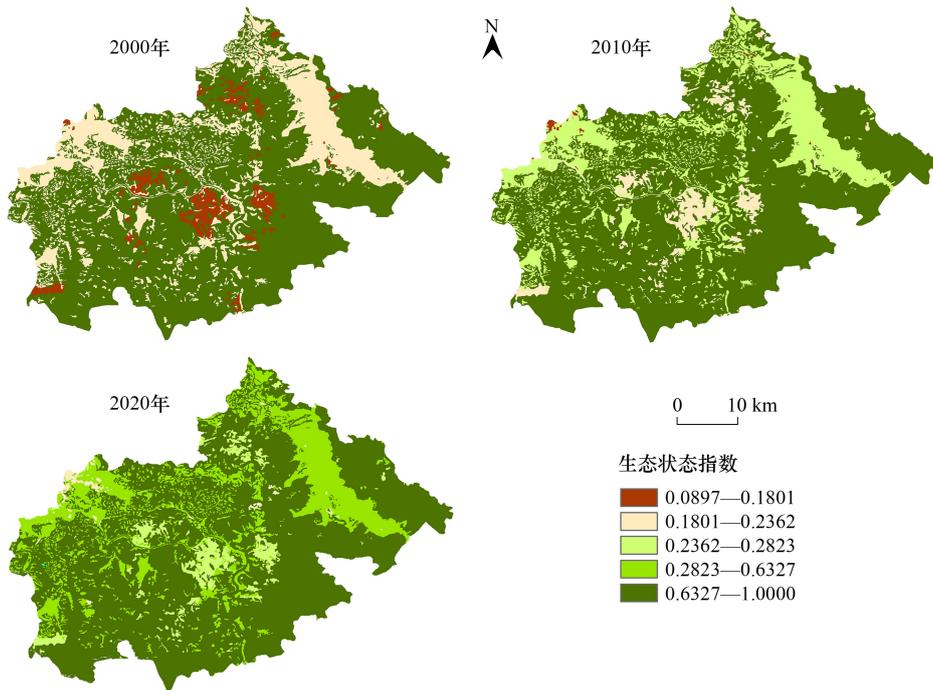


图 4 中国丹霞(贵州赤水)旅游生态系统状态变化
Fig.4 Changes in the tourism ecosystem state of China Danxia (Chishui, Guizhou)

其中,生态状态指数范围为 0 至 1 之间,但考虑到最小值为 0.089,因此将状态指数从 0.089 至 1 划分为五个等级。在图 4 中,颜色越接近深绿色表示生态状态越好,等级越高。在案例地部分景区,旅游生态状态子系统波动较大。例如,在 2000 年,赤水市中部的竹海森林公园、桫欏景区,以及西部和西南部的四洞沟景区、燕子岩景区生态状态指数介于 0.089 至 0.180 之间,处于五级划分中的第五级,表明其生态健康状况较差。然而,经过 20 年的逐步恢复,截至 2020 年,这些地区的生态状态指数已经恢复至 0.2362(三级)以上。这一结果反映出案例地旅游生态系统演化呈现长期持续向好趋势。

3.3 旅游生态系统“空间均衡”演化状态动态评估

运用模糊均值聚类法可将系统“空间均衡”演化状态分为 5 类。实测状态值与理论演化值差值大于 0.03,为“严重过载”、差值介于 0.01—0.03 之间为“一般过载”、差值介于 -0.01—0.01 之间为“趋于平衡”、差值介于 -0.03—-0.01 为“一般滞后”、差值小于 -0.03 为“严重滞后”(图 6)。

结合表 2 和图 3 可知,案例地在研究期内的实测状态值围绕理论曲线波动。为实现对演化状态的动态评估,对旅游生态系统“空间均衡”实测状态值与理论值的差值进行分析与比较(图 5):

(1)2000—2003 年,案例地系统“空间均衡”实测状态值略大于理论演化值;

(2)2004—2012 年,案例地系统“空间均衡”实测状态值小于理论演化值;

(3)2013—2018 年,案例地系统“空间均衡”实测状态值大于理论演化值;

(4)2019—2020 年,案例地系统“空间均衡”实测状态值小于理论演化值。

可以看出,案例地系统“空间均衡”演化失衡现象时有发生,但受到旅游生态系统正负反馈调节机制作用,失衡现象迅速被纠正,形成了短期振荡波动的演化特征。

(1)2000—2004 年,案例地旅游生态系统的“空间均衡”趋于平衡状态。这一演化特征是“自然利用效率”和“社会公平发展”这两只看得见与看不见的手综合作用的结果。通过 PSR 模型框架下各子系统典型测量指标分析,有助于进一步理解这一演化特征。状态子系统的生态指标在该时期内呈现一定变化,NDVI 指数从 0.78 增长至 0.81,年平均增长率为 0.78%;CONTAG 蔓延度从 72.66%增长至 72.74%,年平均增长率为 0.02%;而 SHDI 多样性指数从 0.74 下降至 0.73,年平均增长率为-0.27%。压力子系统方面,反映人类活动影响的相关指标呈现分化趋势。人类活动足迹指数从 10.69 下降至 10.68,年平均增长率为-0.02%;居民人口年平均增长率为 0.89%;PM2.5 浓度则从 40.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 显著增加至 51.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,年平均增长率达到 5.52%,表明空气质量恶化,已达到轻度污染水平。同时,游客年平均增长率为 17.3%,显示旅游压力有所增加。响应子系统方面表现出积极的治理和响应能力。旅游政策响应保持稳定,每年发布 4 份与旅游生态规划相关的文件;居民与游客素质保持恒定;垃圾无害化处理率从 79%提升至 93%,年平均增长率为 3.33%;固体废物综合利用率为 59%增长至 75%,年平均增长率为 5.05%。结合各项指标的综合计算,案例地旅游生态系统 2000—2004 年的“空间均衡”实测状态值分别为 0.03、0.04、0.05、0.05 和 0.05,而通过公式(4)计算出的理论值分别为 0.03、0.04、0.04、0.05 和 0.06。二者的差值介于-0.01—0.01 之间。在这一时期内,旅游生态系统自身所具有的“效率”和“公平”反馈循环圈相互制衡,使得系统“空间均衡”状态处于趋于平衡状态。

(2)2005—2011 年,案例地旅游生态系统“空间均衡”处于一般滞后状态。其中,状态子系统主要生态指标表现出一定增长趋势:NDVI 指数从 0.78 增加至 0.81,年平均增长率为 1.05%;CONTAG 蔓延度从 72.76%增长至 73.06%,年平均增长率为 0.59%;SHDI 多样性指数从 0.73 增加至 0.74,年平均增长率为 0.24%。这些指标的改善表明自然利用效率在提升,有效限制系统资源占用超载。压力子系统方面,人类活动足迹指数从 10.68 上升至 10.72,年平均增长率仅为 0.054%;居民人口年均增长率为-3.7%,呈现下降趋势;PM2.5 浓度从 54.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 减少至 51.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,年平均增长率为-0.68%,污染情况有所缓解。游客年均增长率达到 46%,表明旅游活动对生态系统的压力仍在持续增加。在响应子系统中,政策响应保持稳定,旅游生态规划相关文

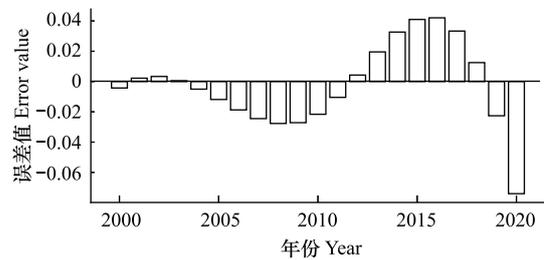


图 5 实测状态值于与理论值差值

Fig.5 Differences between observed evolution values and theoretical values

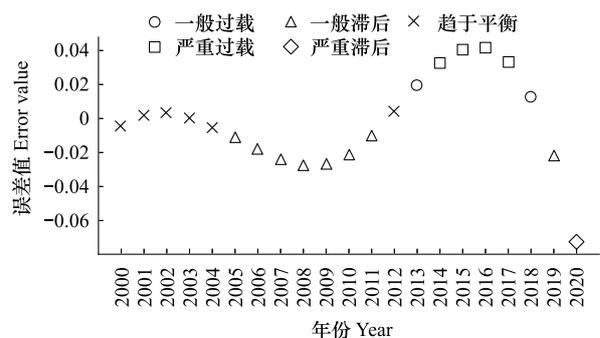


图 6 模糊 C 均值聚类结果

Fig.6 Fuzzy c-means clustering results

件每年发布数量未见显著变化,居民与游客素质也未发生明显波动。垃圾无害化处理率从 96.30% 提升至 98.47%,年平均增长率为 0.31%,反映出生态治理力度的增强;但固体废物综合利用率从 79.40% 下降至 73.89%,年平均增长率为-1.01%,显示资源循环利用能力有所削弱。从案例地旅游生态系统“空间均衡”的实测状态值与理论演化值对比来看,2005—2011 年间,案例地旅游生态系统“空间均衡”的实测值分别为 0.06、0.06、0.07、0.08、0.10、0.13、0.16,而理论值则为 0.07、0.08、0.09、0.11、0.13、0.15、0.17,二者差值介于 -0.03—0.01 之间,该阶段系统“效率”与“公平”失衡,自然秩序作为负反馈机制对系统资源占用超载的限制能力更强,而社会经济能力相对较弱,导致系统演化存在一定的滞后性。

(3) 2012 年,案例地旅游生态系统“空间均衡”处于趋于平衡状态。与前一阶段相比,生态系统的状态子系统指标基本保持稳定,但压力与响应子系统呈现出一定的变化。在压力子系统中,PM_{2.5} 浓度从 51.766 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降至 50.062 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,下降率约为 3.29%,表明环境质量有所改善。同时,游客增长率为 10.01%,表明旅游活动对生态系统的压力有所增加。在响应子系统中,居民素质提升幅度显著,达到 28.57%;此外,固体废物综合利用率提升了 8.23%,生态治理与资源利用效率不断提高。综合各项指标的计算结果,案例地旅游生态系统“空间均衡”实测值为 0.21,而理论值为 0.20,二者差异仅为 0.01,旅游生态系统“效率”和“公平”再次平衡,案例地旅游生态系统在 2012 年处于趋于平衡的状态。2013 年社会公平发展的相关指标进一步增长,使得案例地旅游生态系统“空间均衡”处于一般过载状态。

(4) 在 2014—2017 年间,案例地旅游生态系统“空间均衡”表现为严重过载状态。状态子系统的生态指标虽保持缓慢增长,但压力与响应子系统的变化显著。其中,居民人口年平均增长率为 0.52%,PM_{2.5} 浓度从 46.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 38.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,年均下降率达 6.00%,空气质量改善至“良好”水平。同时,游客平均年增长率高达 48.38%,对生态系统施加了较大压力。在响应子系统中,学术出版物年均数量达 22 项,相比 2000 年增长了 10 倍,居民和游客素质基本稳定,垃圾无害化处理率超过 92%。综合测算表明,2014—2017 年案例地旅游生态系统“空间均衡”实测值分别为 0.30、0.34、0.38、0.41,而理论值分别为 0.26、0.30、0.34、0.38,二者差异超过 0.03,该时期案例地旅游生态系统“效率”与“公平”失衡,社会经济发展远远超过了自然秩序的发展,使得系统处于严重过载状态。

(5) 2018 年,案例地旅游生态系统“空间均衡”状态子系统指标趋于稳定。而压力子系统中,居民人口增长率维持在 0.41%,游客增长率降至 10.19%。旅游政策响应与社会教育等相关因素保持不变,整体系统增速有所放缓。综合分析显示,2018 年案例地旅游生态系统“空间均衡”处于一般过载状态。进入 2019 年,尽管状态子系统指标继续保持稳定,但压力子系统指标进一步下降,其中游客增长率减缓至 6.94%,固体废物综合利用率显著下降,年增长率为-12.08%。自然秩序的发展超过了社会经济发展,“效率”与“公平”失衡,导致该年度案例地旅游生态系统“空间均衡”被评估为一般滞后状态。具体而言,其系统“空间均衡”实测值为 0.43,理论值为 0.42,二者差值为 0.01。2020 年,受全球公共卫生事件的冲击,系统状态与压力子系统指标均显著下降。其中,游客增长率为-28.85%,系统压力随之显著减小,固体废物综合利用率进一步下降,年增长率为-13.74%。这一年,案例地旅游生态系统“空间均衡”实测值为 0.43,理论值为 0.51,二者差值扩大至 -0.08。“效率”与“公平”再次失衡,2020 年案例地旅游生态系统“空间均衡”处于严重滞后状态。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 本文构建的旅游生态系统“空间均衡”演化理论模型较好地拟合了旅游生态系统的演化过程,其 Logistic 曲线数学表达式可用于刻画旅游生态系统“空间均衡”演化曲线,其函数表达式为: $f(t) = \frac{1}{1 + (\frac{1-0.03}{0.03})e^{-0.1759t}}$, 根据此函数关系确定中国丹霞(贵州赤水)旅游生态系统“空间均衡”演化周期约为 50 年。研究期(2000—2020 年)处于“S”型曲线斜率增大区域,其系统“空间均衡”演化速率正处于快速上升期。

(2)通过理论模型推导与实际案例地对比分析可发现,旅游生态系统“空间均衡”演化发展整体上呈现出短期振荡,长期“S”型演化周期特征。中国丹霞(贵州赤水)旅游生态系统“空间均衡”压力、状态、响应子系统在2000—2020年期间整体呈现上升趋势,与演化理论值相比,呈现出“进慢则退”的趋势(演化理论值与实测状态值都具有增长趋势,当实测状态值增长赶不上演化理论值增长时,便出现演化滞后的情况)。

(3)基于赤水市土地利用分类的生态状态评估结果显示,赤水市中部的竹海森林公园、桫欏景区,以及西部和西南部的四洞沟景区、燕子岩景区在2000年时生态状态指数介于0.089—0.180之间,处于五级划分中的第五级,生态健康状况较差。但经过近20年的逐步恢复,截至2020年上述地区的生态状态指数已经恢复至0.2362(三级)以上。

4.2 讨论

本文构建了一个基于“自然利用效率子系统”和“社会公平发展子系统”的旅游生态系统“空间均衡”理论演化模型及其数学表达式,可计算出旅游生态系统任意年份的“空间均衡”演化理论值,为旅游生态系统“空间均衡”动态演化评估提供了理论基础。基于PSR框架构建旅游生态系统“空间均衡”演化量测指标体系及多源数据融合方法实现了对旅游生态系统“空间均衡”演化的科学量测,可实现“空间均衡”演化状态五个等级的动态评估。研究结果识别了中国丹霞(贵州赤水)旅游生态系统“空间均衡”演化理论曲线和演化周期,并对演化状态进行了动态评估,为旅游地可持续发展政策制定与政策干预提供了参考。

与此同时,未来研究可在加强多源高精度数据的收集与整合的基础上,进一步优化动态评估方法,从微观层面分析旅游主体行为对旅游生态系统“空间均衡”演化机制影响。同时,结合时间序列分析与情景模拟,通过构建多维时间序列模型,对压力、状态和响应子系统的典型指标(如NDVI、游客增长率、PM_{2.5}浓度、垃圾无害化处理率等)进行动态演化规律的定量分析,揭示不同子系统间的耦合关系与长期趋势。此外,结合情景模拟方法,设计政策调整、游客增长变化、污染控制等多种情景,评估其对生态系统“空间均衡”状态的潜在影响,并应用ARIMA、VAR或LSTM等技术对生态系统进行短期及中长期预测,模拟可能的演化路径。在此基础上,建立实时监测与预警系统,实现生态失衡的早期发现、动态响应及其适应性管理。

参考文献(References):

- [1] 马世骏,王如松.社会-经济-自然复合生态系统.生态学报,1984,4(1):1-9.
- [2] 薛滨瑞,延军平,彭永祥.民勤绿洲湖区复合生态系统优化建设研究.干旱区资源与环境,2007,21(12):74-78.
- [3] Cumming G S, Barnes G, Perz S, Schmink M, Sieving K E, Southworth J, Binford M, Holt R D, Stickler C, Van Holt T. An exploratory framework for the empirical measurement of resilience. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 975-987.
- [4] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [5] 余中元,李波,张新时.社会生态系统及脆弱性驱动机制分析.生态学报,2014,34(7):1870-1879.
- [6] 杨春宇,洪焕州,尤碧莹,陈子远.旅游生态系统“空间均衡”演化的理论探讨与动态评价研究——以贵州4个世界自然遗产地为例.中国生态旅游,2023,13(3):359-379.
- [7] 林伟.论平衡不平衡在事物发展中的作用.兰州学刊,2003(3):21-22,30.
- [8] 王如松.生态整合与文明发展.生态学报,2013,33(1):1-11.
- [9] van Nes E H, Scheffer M. Large species shifts triggered by small forces. *The American Naturalist*, 2004, 164(2): 255-266.
- [10] 张香菊,钟林生.旅游生态学研究进展.生态学报,2019,39(24):9396-9407.
- [11] 陆大道.关于地理学的“人-地系统”理论研究.地理研究,2002,21(2):135-145.
- [12] 程钰,任建兰,侯纯光,任梅.沿海生态地区空间均衡内涵界定与状态评估——以黄河三角洲高效生态经济区为例.地理科学,2017,37(1):83-91.
- [13] 贾善铭.区域经济增长空间均衡研究述评.区域经济评论,2014(1):124-129.
- [14] Krugman P. Increasing returns and economic geography. *Journal of Political Economy*, 1991, 99(3): 483-499.
- [15] 陈雯,孙伟,赵海霞.区域发展的空间失衡模式与状态评估——以江苏省为例.地理学报,2010,65(10):1209-1217.
- [16] 陈雯.空间均衡的经济学分析.北京:商务印书馆,2008.
- [17] 王建.均势理论研究——从均衡的视角[D].成都:电子科技大学,2008.

- [18] 颜泽贤, 范冬萍, 张华夏. 系统科学导论: 复杂性探索. 北京: 人民出版社, 2006: 1-56.
- [19] 钱学森. 创建系统学. 太原: 山西科学技术出版社, 2001: 21-63.
- [20] 陈光亚. 优化和均衡——系统理论的重要问题. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 651-652, 686.
- [21] 毛泽东选集(第五卷). 北京: 人民出版社, 1978.
- [22] Leiper N. The framework of tourism. *Annals of Tourism Research*, 1979, 6(4): 390-407.
- [23] Leiper N. *Tourism management*. Collingwood: TAFE Publications, 1995.
- [24] Gunn C A, Var T. *Tourism Planning: Basics, Concepts, Cases*. London: Routledge, 2020
- [25] 张文. 构造一个基于关系的旅游系统的讨论. 北京第二外国语学院学报, 1997, 19(4): 32-43.
- [26] 郭伟, 方淑芬. 旅游地复合系统协调开发理论·方法·实证. 北京: 地质出版社, 2004: 36-68.
- [27] 邸明慧, 张稳. 西柏坡革命纪念馆地旅游开发系统研究. 地理学与国土研究, 1995, 11(2): 48-51.
- [28] 王迪云. 旅游耗散结构系统开发理论与实践. 北京: 中国市场出版社, 2006: 35-96.
- [29] 孙多勇, 王银生. 旅游经济系统的发展战略研究. 系统工程, 1990, 8(2): 66-72.
- [30] 彭华. 旅游发展驱动机制及动力模型探析. 旅游学刊, 1999, 14(6): 39-44.
- [31] 徐红罡. 潜在游客市场与旅游产品生命周期——系统动力学模型方法. 系统工程, 2001, 19(3): 69-75.
- [32] 徐红罡, 郑海燕, 保继刚. 城市旅游地生命周期的系统动态模型. 人文地理, 2005, 20(5): 66-69, 19.
- [33] 史培军, 宋长青, 程昌秀. 地理协同论——从理解“人-地关系”到设计“人-地协同”. 地理学报, 2019, 74(1): 3-15.
- [34] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z Y, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [35] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学. 地理科学, 2020, 40(8): 1221-1234.
- [36] 樊杰. “人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石. 地理学报, 2018, 73(4): 597-607.
- [37] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武, 李琰. 空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展. 地理学报, 2020, 75(5): 891-903.
- [38] 袁宏瑞, 王群. 旅游与生态共生演进模式与生态安全判定——以国家重点生态功能区安徽省黄山区为例. 旅游学刊, 2022, 37(12): 25-38.
- [39] 李志远, 冯学钢, 何静, 左文俊. 中国旅游生态韧性空间关联网络结构及其驱动因素. 地理研究, 2024, 43(5): 1146-1165.
- [40] 郭向阳, 明庆忠, 杨春宇, 穆学青, 胡金海. 喀斯特生态脆弱区旅游生态系统韧性时空变化及多尺度障碍因素——以贵州省为例. 经济地理, 2023, 43(10): 190-200.
- [41] 王群, 杨万明, 朱跃, 杨兴柱. 贫困区旅游地社会-生态系统恢复力时空分异研究——以安徽境内大别山区 12 个贫困县(市)为例. 地理科学, 2021, 41(6): 1030-1038.
- [42] 叶欣梁, 何一, 孙瑞红. 脆弱与反脆弱: 旅游业韧性研究进展与述评. 旅游学刊, 2023, 38(10): 31-48.
- [43] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [44] 苏飞, 莫潇杭, 童磊, 郑珂, 曹轶蓉. 旅游地社会-生态系统适应性研究进展. 地理科学, 2020, 40(2): 280-288.
- [45] 刘庆芳, 杨定, 杨振山, 宋金平, 陈东军. 青藏高原国家公园群人文生态系统耦合协调评价及障碍因子识别. 地理学报, 2023, 78(5): 1119-1135.
- [46] 庞闻, 马耀峰, 唐仲霞. 旅游经济与生态环境耦合关系及协调发展研究——以西安市为例. 西北大学学报: 自然科学版, 2011, 41(6): 1097-1101, 1106.
- [47] 高楠, 马耀峰, 李天顺, 白凯. 基于耦合模型旅游产业与城市化协调发展研究——以西安市为例. 旅游学刊, 2013, 28(1): 62-68.
- [48] 方世敏, 黄琰. 长江经济带旅游效率与规模的时空演化及耦合协调. 地理学报, 2020, 75(8): 1757-1772.
- [49] 徐冬, 黄睿, 黄震方, 汤傅佳. 2001—2015 年中国市域旅游流的时空格局与溢出效应. 地理与地理信息科学, 2020, 36(2): 135-142.
- [50] 吴殿廷, 王欣. 旅游开发与管理的时空耦合规律初探. 人文地理, 2005, 20(1): 42-44, 112.
- [51] 刘军胜, 马耀峰. 基于发生学与系统论的旅游流与目的地供需耦合成长演化与驱动机制研究——以西安市为例. 地理研究, 2017, 36(8): 1583-1600.
- [52] 高楠, 马耀峰, 张春晖. 中国丝绸之路经济带旅游产业与区域经济的时空耦合分异——基于九省区市 1993—2012 年面板数据. 经济管理, 2015(9): 111-120.
- [53] 黄睿, 王坤, 黄震方, 陆玉麒. 绩效视角下区域旅游发展格局的时空动态及耦合关系——以泛长江三角洲为例. 地理研究, 2018, 37(5): 995-1008.
- [54] 轩源, 周年兴, 杨虹霓. 中国大陆省域旅游效率与城镇化耦合协调的时空演变. 地理与地理信息科学, 2020, 36(4): 110-116.
- [55] 叶茂, 王兆峰, 谭勇. 湘西地区交通与旅游发展的耦合协调特征与效应. 经济地理, 2020, 40(8): 138-144.
- [56] 于洪雁, 王群勇, 张博, 刘继生. 中国旅游供需耦合协调发展的空间分异及驱动机制研究. 地理科学, 2020, 40(11): 1889-1898.

- [57] 杨春宇, 黄震方, 毛卫东. 基于系统科学的旅游地演化机制及规律性初探. *旅游学刊*, 2009, 24(3): 55-62.
- [58] 曹威威, 孙才志. 能值生态足迹模型的改进——以海南为例. *生态学报*, 2019, 39(1): 216-227.
- [59] Castellani V, Sala S. Ecological Footprint and Life Cycle Assessment in the sustainability assessment of tourism activities. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 135-147.
- [60] 马骏. 基于生态环境阈限与旅游承载力背景下生物多样性保护策略研究——以世界自然遗产武陵源核心景区为例. *经济地理*, 2016, 36(4): 195-202.
- [61] Garau G, Carboni D, Karim El Meligi A. Economic and environmental impact of the tourism carrying capacity: a local-based approach. *Journal of Hospitality & Tourism Research*, 2022, 46(7): 1257-1273.
- [62] 王兆峰, 刘庆芳. 长江经济带旅游生态效率时空演变及其与旅游经济互动响应. *自然资源学报*, 2019, 34(9): 1945-1961.
- [63] 黄子璇, 史达, 马淑花. 中国旅游经济与生态系统服务协调效应及其障碍因素研究. *旅游学刊*, 2024, 39(4): 93-108.
- [64] 王楠楠, 章锦河, 刘泽华, 钟士恩, 李升峰. 九寨沟自然保护区旅游生态系统能值分析. *地理研究*, 2013, 32(12): 2346-2356.
- [65] 汪晶晶, 章锦河, 王群, 黄剑锋. 旅游生态系统能值研究进展. *生态学报*, 2015, 35(2): 584-593.
- [66] 穆学青, 郭向阳, 明庆忠, 胡程. 黄河流域旅游生态安全的动态演变特征及驱动因素. *地理学报*, 2022, 77(3): 714-735.
- [67] Filimonau V, De Coteau D. Tourism resilience in the context of integrated destination and disaster management (DM²). *International Journal of Tourism Research*, 2020, 22(2): 202-222.
- [68] 周彬, 钟林生, 陈田, 张爱平. 浙江省旅游生态安全的时空格局及障碍因子. *地理科学*, 2015, 35(5): 599-607.
- [69] Tang C C, Wu X F, Zheng Q Q, Lyu N. Ecological security evaluations of the tourism industry in Ecological Conservation Development Areas: a case study of Beijing's ECDA. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 999-1010.
- [70] Bahraminejad M, Rayegani B, Jahani A, Nezami B. Proposing an early-warning system for optimal management of protected areas (Case study: Darmiyān protected area, Eastern Iran). *Journal for Nature Conservation*, 2018, 46: 79-88.
- [71] Vázquez-González C, Fermán-Almada J L, Moreno-Casasola P, Espejel I. Scenarios of vulnerability in coastal municipalities of tropical Mexico: an analysis of wetland land use. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 89: 11-19.
- [72] 兰美玲. 基于 DPSIR 模型的庐山旅游区生态环境健康评价和监测研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2018.
- [73] Ruan W Q, Li Y Q, Zhang S N, Liu C H. Evaluation and drive mechanism of tourism ecological security based on the DPSIR-DEA model. *Tourism Management*, 2019, 75: 609-625.
- [74] 王贺年, 张曼胤, 崔丽娟, 郭子良, 王大安. 基于 DPSIR 模型的衡水湖湿地生态环境质量评价. *湿地科学*, 2019, 17(2): 193-198.
- [75] Liu Y Y, Zhao C Y, Liu X M, Chang Y P, Wang H, Yang J H, Yang X G, Wei Y. The multi-dimensional perspective of ecological security evaluation and drive mechanism for Baishuijiang National Nature Reserve, China. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108295.
- [76] Malekmohammadi B, Jahanishakib F. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 293-303.
- [77] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, Defries R S, Diaz S, Dietz T, Duraiappah A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the millennium ecosystem assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [78] Smith M, Ram Y. Tourism, landscapes and cultural ecosystem services: a new research tool. *Tourism Recreation Research*, 2017, 42(1): 113-119.
- [79] Petrou Z I, Manakos I, Stathaki T. Remote sensing for biodiversity monitoring: a review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24(10): 2333-2363.
- [80] Zhang F, Peng H C, Sun X F, Song T Y. Influence of tourism economy on air quality-an empirical analysis based on panel data of 102 cities in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(7): 4393.
- [81] Zhang Q L, Seto K C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(9): 2320-2329.
- [82] Li J H, Bai Y, Alatalo J M. Impacts of rural tourism-driven land use change on ecosystems services provision in Erhai Lake Basin, China. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101081.
- [83] Gassling S, Hall M C. *Tourism and global environmental change*. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2006.
- [84] Chen J L, Li G, Wu D C, Shen S J. Forecasting seasonal tourism demand using a multiseriess structural time series method. *Journal of Travel Research*, 2019, 58(1): 92-103.
- [85] Zhang X H, Wei H Y, Zhao Z F, Liu J, Zhang Q Z, Zhang X Y, Gu W. The global potential distribution of invasive plants: *Anredera cordifolia* under climate change and human activity based on random forest models. *Sustainability*, 2020, 12(4): 1491.
- [86] Hong W C, Dong Y C, Chen L Y, Wei S Y. SVR with hybrid chaotic genetic algorithms for tourism demand forecasting. *Applied Soft Computing*,

- 2011, 11(2): 1881-1890.
- [87] Ioannis C, George F, Bruno E, Alexandros A. Oil prices, tourism income and economic growth: a structural VAR approach for European Mediterranean countries. *Tourism Management*, 2012, 36: 331-341.
- [88] 杨春宇, 成铁翔, 洪焕州, 曹雯. 生态文明视域下旅游生态系统演化发展理论、模型与方法研究进展与展望. *生态经济*, 2022, 38(5): 138-146.
- [89] 李远艳, 安裕伦, 杨广斌. 基于 PSR 模型的喀斯特地区生态系统健康动态评价——以贵州省为例. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 279-286.
- [90] 杨光明, 陈也, 张帆, 罗垚. 基于 PSR 模型的三峡库区生态安全评价及动态预警研究. *生态经济*, 2021, 37(4): 209-214.
- [91] 许月卿, 赵菲菲, 孙丕苓. 生态脆弱区土地生态安全动态评价——以河北省张家口市为例. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 232-238.
- [92] 冯彦, 郑洁, 祝凌云, 辛姝玉, 孙博, 张大红. 基于 PSR 模型的湖北省县域森林生态安全评价及时空演变. *经济地理*, 2017, 37(2): 171-178.
- [93] 周博, 杜晓霞, 马林兵, 何桂林. 基于 PSR 模型的土地利用系统健康动态评价. *中山大学学报(自然科学版)*, 2018, 57(4): 9-15.
- [94] 郭宇伦, 师学义, 璩路路, 刘畅. 基于 PSR-CPM 模型的市域土地生态安全评价. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 108-112.
- [95] 刘明华, 董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价. *地理研究*, 2006, 25(5): 930-938.
- [96] 李纯厚, 林琳, 徐楠楠, 戴明, 黄洪辉, 杜飞雁, 刘永, 齐占会. 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用. *生态学报*, 2013, 33(6): 1798-1810.
- [97] 刘晓丹. 基于遥感图像的湿地生态系统健康评价——以大沽河河口湿地为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [98] 高吉喜. 可持续发展理论探索: 生态承载力理论、方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 45-69.
- [99] 徐明德, 李静, 彭静, 钮键, 曹露. 基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1809-1814.
- [100] 牛明香, 王俊, 徐宾铎. 基于 PSR 的黄河河口区生态系统健康评价. *生态学报*, 2017, 37(3): 943-952.
- [101] 李锦宏, 曾雪, 曹庆瑶, 姬杨. 喀斯特山地旅游生态系统安全评价及趋势预测——以贵州国际山地旅游目的地为考察样本. *生态经济*, 2022, 38(9): 145-151.
- [102] 陈丽, 宋小龙, 卜晓燕. 宁夏回族自治区旅游生态安全动态评价及其驱动机制. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 278-284.
- [103] 张志明, 许欢科. 基于 PSR 模型的桂林喀斯特世界自然遗产地旅游生态环境安全评价与诊断. *桂林师范高等专科学校学报*, 2019, 33(1): 13-18.
- [104] 杨良健, 曹开军. 基于 DPSIR 模型的伊犁河谷旅游生态安全评价及动态预警分析. *生态经济*, 2020, 36(11): 111-117.
- [105] 高誉珈, 原友兰, 翁奕城. 基于人类足迹(HF)理论的台湾日月潭风景区人类活动影响评估. *广东园林*, 2019, 41(6): 31-36.
- [106] 李玲. 新疆旅游生态安全评价及时空演变特征研究. *生态经济*, 2021, 37(8): 126-131.
- [107] 赵志旭, 张燕杰, 潘影, 武俊喜, 李振男. 夜间灯光数据支持下西藏人类活动强度变化对生态系统调节服务的影响. *地球信息科学学报*, 2020, 22(7): 1544-1554.
- [108] 张永江, 邓茂, 黄晓容, 王化杰, 李莹莹, 姚靖. 典型生态旅游城市黔江区大气污染物分析及健康风险评估. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 42(4): 81-87.
- [109] 吴发明, 何小芊, 罗梦悦. 万年县神农宫旅游资源综合评价与开发对策. *中国岩溶*, 2016, 35(2): 233-242.
- [110] 徐新良. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC). (2023-12-03)[2024-10-16], <http://www.resdc.cn/>.
- [111] van Donkelaar A, Hammer M S, Bindle L, Brauer M, Brook J R, Garay M J, Hsu N C, Kalashnikova O V, Kahn R A, Lee C, Levy R C, Lyapustin A, Sayer A M, Martin R V. Monthly global estimates of fine particulate matter and their uncertainty. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(22): 15287-15300.
- [112] NASA. Earth data Search. (2023-12-02)[2024-10-13]. <https://search.earthdata.nasa.gov/search>.
- [113] Wu Y Z, Shi K F, Chen Z Q, Liu S R, Chang Z J. Developing improved time-series DMSP-OLS-like data (1992-2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 4407714.
- [114] 王慧, 陈秋华, 修新田, 郭进辉, 黄颖瑜, 李昊明. 基于 BP 神经网络的森林旅游景区环境承载力预警系统构建研究——以太岳山国家森林公园石膏山景区为例. *林业经济*, 2018, 40(3): 58-64.
- [115] 方庆, 董增川, 刘晨, 山成菊. 基于景观格局的区域生态系统健康评价——以滦河流域行政区为例. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(6): 37-41.
- [116] 穆学青, 郭向阳, 明庆忠, 胡程. 黄河流域旅游生态安全的动态演变特征及驱动因素. *地理学报*, 2022, 77(3): 714-735.
- [117] 张周, 孙旭, 刘荣, 高连如. 基于模糊 C-均值聚类 and 萤火虫算法的高光谱图像波段选择. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(12): 176-186.
- [118] 辛洪波, 储琳琳, 顾志铭. 改进模糊均值聚类算法在用地规划识别及负荷预测中的应用. *沈阳工业大学学报*, 2022, 44(5): 546-551.