

DOI: 10.20103/j.stxb.202506231592

周彬, 乔荟潼, 肖芳珍, 虞虎. 基于变权理论和灰色云模型的海岛旅游地生态安全评价——以舟山群岛为例. 生态学报, 2026, 46(4): 1976-1991.
Zhou B, Qiao H T, Xiao F Z, Yu H. Ecological security assessment of island tourist destinations based on Variable-Weight Theory and the Grey Cloud Model: a case studie of Zhoushan Archipelago, China. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(4): 1976-1991.

基于变权理论和灰色云模型的海岛旅游地生态安全评价

——以舟山群岛为例

周 彬¹, 乔荟潼¹, 肖芳珍¹, 虞 虎^{2,*}

¹ 宁波大学, 宁波 315211

² 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 海岛旅游地生态系统面临风险日益加剧的背景下, 开展海岛旅游地生态安全研究具有重要意义。为了克服传统旅游生态安全评价方法在处理权重波动性和评价过程不确定性的局限, 综合运用变权理论与灰色云模型, 引入承载力-支持力-吸引力-延续力-发展力(CSAED)模型, 构建海岛旅游地生态安全评价指标体系, 以舟山群岛为例开展实证研究。结果表明: (1) 2008—2022年, 舟山群岛旅游生态安全指数总体呈波动上升趋势, 从2008年的50.793提升至2022年的83.152, 由“风险等级”演化至“安全等级”; (2) 各子系统表现差异显著, 支持力与承载力子系统安全指数持续提升, 延续力与发展力呈现“先提升-后回落”的波动特征, 而吸引力子系统则出现安全等级的下降趋势; (3) 变权理论与灰色云模型的融合, 能够提高对海岛旅游地生态安全的诊断敏感度与评价结果的可靠性。不仅拓展了旅游生态安全评价方法论体系, 还可为舟山群岛旅游生态环境治理政策制定提供理论参考与决策依据。

关键词: 海岛旅游地; 生态安全; 变权理论; 灰色云模型; 舟山群岛

Ecological security assessment of island tourist destinations based on Variable-Weight Theory and the Grey Cloud Model: a case studie of Zhoushan Archipelago, China

ZHOU Bin¹, QIAO Huitong¹, XIAO Fangzhen¹, YU Hu^{2,*}

¹ Ningbo University, Ningbo 315211, China

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Island tourism destinations integrate both marine and terrestrial attributes, resulting in highly fragile ecosystems that face increasing environmental pressures. Under the combined effects of climate change and intensive tourism development, conventional assessment methods often fail to capture the dynamic evolution of tourism ecological security in these regions. Furthermore, most existing studies depend on static weighting approaches, which overlook inherent ecosystem dynamics and sudden fluctuations, leading to delays in identifying key security drivers and risk-sensitive factors. Most current studies employ statically weighted models that do not adequately account for the intrinsic dynamism and potential for sudden fluctuation in ecosystems. This oversight results in significant delays in the detection of pivotal security drivers and factors sensitive to risk. To address these gaps, this study introduces a novel evaluation framework by integrating variable-weight theory and a grey cloud model within the Capacity-Supporting Capacity-Attractiveness-Sustainability-Development Capacity (CSAED) conceptual system. Applied to the Zhoushan Archipelago, the results indicate that: (1) from 2008 to

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171223, 42101313)

收稿日期: 2025-06-23; **网络出版日期:** 2025-08-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuhu@igsrr.ac.cn

2022, the overall ecological security index showed a fluctuating upward trend, increasing from 50.793 to 83.152 and shifting from a “risk” to a “secure” state; (2) Significant differences were observed among subsystems; both supporting capacity and carrying capacity demonstrated steady growth, whereas sustainability and development capacities showed fluctuating trends, characterized by an initial rise followed by a decline; meanwhile, attractiveness decreased gradually throughout the study period. (3) The combination of variable-weight theory and the grey cloud model improves diagnostic sensitivity and ensures more reliable ecological security assessments. Theoretically, this study advances methodological innovation in tourism ecological security evaluation by moving beyond static weighting and single-model designs. The proposed approach enables the dynamic tracking of fluctuations in the relative importance of ecosystem factors over time and under varying environmental conditions, thus filling a critical gap in the literature on the dynamic evolution of ecological security. Moreover, the incorporation of the grey cloud model allows the fuzziness and uncertainty of indicator data to be quantitatively characterized, overcoming the limitations of existing methods in handling small samples, incomplete information, and cognitive ambiguity, and thereby improving both the sensitivity and robustness of ecological security evaluations for island tourism destinations. This study recommends a zoning-based ecological governance strategy for the Zhoushan Archipelago, tailored to ecological security levels and carrying capacities to establish a gradient framework of “strict protection-moderate utilization-optimized enhancement.” On heavily developed islands facing strong environmental pressures, visitor numbers should be controlled and tourism products redirected toward low-carbon and green transitions, while in less attractive areas ecological restoration should be coupled with the upgrading of eco-tourism and cultural experiences. A dynamic monitoring and tiered early-warning system, supported by remote sensing, drones, and IoT technologies, can provide real-time data on visitor flows, water quality, land use, and carbon emissions, enabling precise risk identification. The integration of the grey cloud model enhances risk detection under incomplete and uncertain data, and a cross-departmental platform ensures data sharing and dynamic updates. A smart management system further integrates monitoring, analysis, and decision support, offering real-time insights into tourist behavior and consumption trends, facilitating market regulation and visitor dispersion, and delivering timely alerts and governance recommendations.

Key Words: island tourism destination; ecological security; variable-weight theory; grey cloud model; Zhoushan Archipelago

生态安全溯源于 20 世纪 40 年代的土地功能与土地健康评价研究^[1]。国际应用系统分析研究所在 1989 年阐释全球生态环境问题时首次使用“生态安全”这个概念^[2],该概念被视为生态系统在面对外部压力时保持其结构完整和功能健全的能力,在实现人类生存和社会可持续发展方面提供稳定的生态供给的能力^[3-4]。作为全球生态系统的重要组成部分,海岛在生物多样性保护、植被覆盖、渔业捕捞、营养物质及碳循环、水资源以及旅游资源开发等方面发挥了重要作用^[5-6]。近年来,海岛旅游作为全球旅游增长最快的领域之一,不仅成为沿海国家推动经济转型与区域合作的重要抓手,也是应对气候变化、促进可持续发展的关键实践领域^[7]。但海岛旅游地生态系统稳定性相对较差,自然灾害、气候变化、外来生物入侵以及不合理人类游憩活动等都有可能危及海岛旅游地生态安全^[8]。因此,如何科学评价海岛旅游地生态安全,为实现海岛旅游业可持续发展和生态系统安全管理提供科学依据成为亟待解决的科学问题^[9]。

旅游地生态安全是旅游生态学和旅游地理学研究的热点领域^[10-11]。从研究内容来看,已有研究成果主要集中在旅游生态安全测度与评价^[12-13]、预警^[14]以及趋势预测^[15]等领域。在旅游生态安全测度与评价研究中,有学者以中国丝绸之路经济带为例,基于“驱动-压力-状态-影响-响应”模型,构建了旅游地生态安全评价指标体系,探明了其生态安全的时空动态演化特征^[16]。还有学者以新疆 85 个县市为对象测度了其旅游生态安全水平,并结合空间分析与地理探测方法揭示其时空格局演变及主要影响因素^[17]。在预警研究方面,有研究运用熵权及 TOPSIS 法对以位于西北干旱风沙区的中卫市开展了旅游生态安全预警研究^[14]。在发展

趋势预测研究方面,有研究采用改进的逼近理想排序法(TOPSIS)模型、卷积神经网络和长短期记忆神经网络(CNN-LSTM)混合神经网络预测模型对张家界旅游生态安全动态演变趋势进行了刻画分析^[18]。在研究方法上,定量测度旅游生态安全的方法主要涵盖线性加权法^[19-21]综合指数法^[22]、改进 TOPSIS^[23-24]、系统动力学模型^[25]、生态足迹法^[20,26]、灰色关联投影法^[27]等,以及灰色关联度模型^[25]、障碍度模型^[28]、地理探测器^[23]等。例如,Tang 等就采用改进的 TOPSIS 法对北京生态保护区旅游生态安全开展了定量研究^[29]。舟山群岛作为具有独特生态功能和生态游憩价值的海岛,其生态安全研究也受到了学术界的重视,研究成果主要涵盖海岛生态安全影响因素^[30]与风险源分析^[31]、生态安全与旅游经济协同发展^[32]、生态安全格局构建^[33]、生态安全评价^[34]和预警^[35]以及景观生态格局变化安全评价^[36-37]等领域。但从旅游目的地视角,开展海岛生态安全的研究尚不多见,仅有少量成果涵盖旅游生态安全评价^[38]与预测^[39]研究。曾有学者以普陀山岛为例,在使用灰色系统 GM(1,1)模型和 RBF 神经网络模型比较选优的基础上,对普陀山岛旅游生态安全发展趋势进行了预测。

对已有旅游生态安全文献分析可知:(1)已有研究多集中在陆地生态系统,对海岛旅游地生态系统的关注略显不足^[10],评价指标缺乏对“人-岛-海”交互影响关系的解析,无法体现旅游活动对近海生态与陆地生态的差异化,难以捕捉海岛旅游地生态安全指标权重随系统状态变化的敏感性。(2)现有研究多基于 DPSIR 或 PSR 模型构建评价框架,该类模型在揭示旅游生态安全的驱动因素、生态压力、环境状态及社会响应等因果链条方面具有优势,但整体上偏重线性逻辑与静态刻画,难以反映旅游资源与环境的承载约束,亦忽略了目的地基础设施与社会条件的支撑作用,以及旅游吸引力对旅游地生态系统稳定性的反馈机制,同时未能兼顾可持续延续性与未来发展潜力,因而不足以全面呈现旅游生态安全的整体格局与动态演化规律。(3)现有旅游生态安全研究多基于熵权法、层次分析法等静态权重赋值方法,这种指标权重计算方式难以动态捕捉海岛旅游地生态系统内部不同指标的重要性变化,忽视了生态安全状态随旅游开发和生态治理过程呈现的阶段性和动态性与非线性特征。同时,传统方法在权重计算时未能体现海陆交互条件下的指标敏感性差异,无法精准识别系统整体主导因子与局部敏感因子,导致生态安全评价的溯源与预警能力受到明显限制。而变权方法中的权重设定具有动态性,不仅体现了各指标之间的相对重要性,同时也将指标状态值在不同水平上的差异纳入考量,使得权重能够随着指标状态的变化而不断调整^[40]。因此,亟需引入变权理论以动态化赋权方式提高海岛旅游地生态安全评价的敏感性和准确性。(4)旅游地生态安全监测数据碎片化、指标异构性及数据缺失等问题突出,现有 TOPSIS 法等传统评价模型对于生态安全评价过程中普遍存在的模糊性、不确定性问题缺乏有效处理手段^[10]。这类传统模型难以综合处理生态安全评价指标的认知模糊特征与数据灰色特征,致使评价结果可能与实际生态安全状况产生偏差。灰色云模型不但能够兼顾模糊性与随机性,实现定性概念向定量数据的自然转化,在数据不足或信息不完备的情况下依然适用,还具备较强的动态性与鲁棒性,能够灵活反映系统演化过程并保持结果的合理性^[41]。因此,需要引入灰色云模型,增强海岛旅游生态安全评价数据处理过程和结果的稳健性与科学性。

基于以上分析,本研究以舟山群岛为案例地,以海岛旅游地生态安全为研究对象,从承载力、支持力、吸引力、延续力、发展力(CSAED)五个维度构建评价指标体系,通过引入变权理论,即惩罚型变权函数动态计算海岛旅游地生态安全指标权重,结合灰色云模型刻画海岛旅游生态安全参数的模糊随机性。本研究试图解决旅游生态安全评价中因认知模糊性与数据灰色性带来的不确定性问题,弥补传统静态权重方法难以揭示系统内部主导因子与风险敏感因子动态演化规律的不足,从而在方法层面推动旅游生态安全研究由静态评估向动态诊断转型,在理论层面为深入解析旅游活动与海陆交互过程中的复杂生态效应提供了新的陆海统筹视角,在实践层面为制定舟山群岛旅游生态安全管理策略提供决策参考。

1 海岛旅游地生态安全内涵

在旅游产业发展视角下,旅游地生态安全被认为是旅游产业处于生态安全阈值范围内的一种状态,其未

来发展不会对生态安全构成威胁^[26,42]。还有研究从复合生态系统的视角,将旅游地生态安全内涵界定为旅游地自然-社会-经济复合生态系统协调发展状态,强调人类活动与旅游地生态系统之间的相互作用^[43]。本研究结合海岛生态系统的特点,认为海岛旅游生态安全的内涵应包括以下几个方面:①保障海岛旅游地生态系统中物种多样性、特有及关键物种的生态位完整性、生物群落结构的稳定性,以及岛屿陆地—海洋交错带,典型生态斑块及其非生物环境要素的完整性与稳定性,避免生态网络的结构破碎或功能性退化。②维持海岛旅游地生态系统中物质循环、能量流动、自然选择机制、生物演替规律,以及种群与群落间相互作用等生态过程的有序性与可持续性,防止其结构紊乱与功能失调。③确保在海岛旅游活动中能持续且稳定地提供生态系统服务,包括淡水和海产品提供等基础供给服务,以及休闲、观光、度假、教育与科研等文化服务功能,并支持海岛社区居民与游客生态福祉。④将海岛旅游活动的规模、强度与方式严格控制在生态环境容量、资源承载力阈值范围之内,确保旅游经济效益与生态安全保护相协调,防止旅游开发超载对海岛生态系统结构和功能造成不可逆损害。⑤提升海岛旅游地生态系统对台风、风暴潮、海啸、海岸侵蚀与全球气候变化等自然扰动因素,以及旅游过度开发不当等人类活动的响应能力,增强海岛生态系统抗干扰能力和自我修复能力。⑥通过构建政府主管部门、旅游企业、海岛居民、游客、科研机构及环境非政府组织等多元利益相关主体共同参与的生态治理协作体系,强化海岛生态监管力度、完善共治机制,共同维护海岛旅游地生态系统的可持续性。

2 区域概况与研究方法

2.1 区域概况

本研究以舟山群岛为案例地,主要基于以下考量:首先,舟山群岛地处中国东海之滨,南濒杭州湾,北邻长江入海口,是中国规模最大的群岛,岛屿数量超过 1390 个(图 1)。其次,舟山群岛作为亚太地区知名的海岛旅游目的地,拥有丰富且多样的旅游资源,例如被誉为中国佛教四大名山之一的普陀山和以阳光、沙滩、海水资源闻名的国家级风景名胜区嵊泗列岛。舟山群岛快速发展的海岛旅游产业与生态保护之间的结构性矛盾突出,具备深入探讨海岛旅游生态安全问题的现实紧迫性和典型示范意义。再者,舟山群岛生态系统结构复杂、类型多样,包括近岸海洋、潮间带湿地、山地森林、灌木丛及人工生态系统等多重生态空间,岛屿资源与空

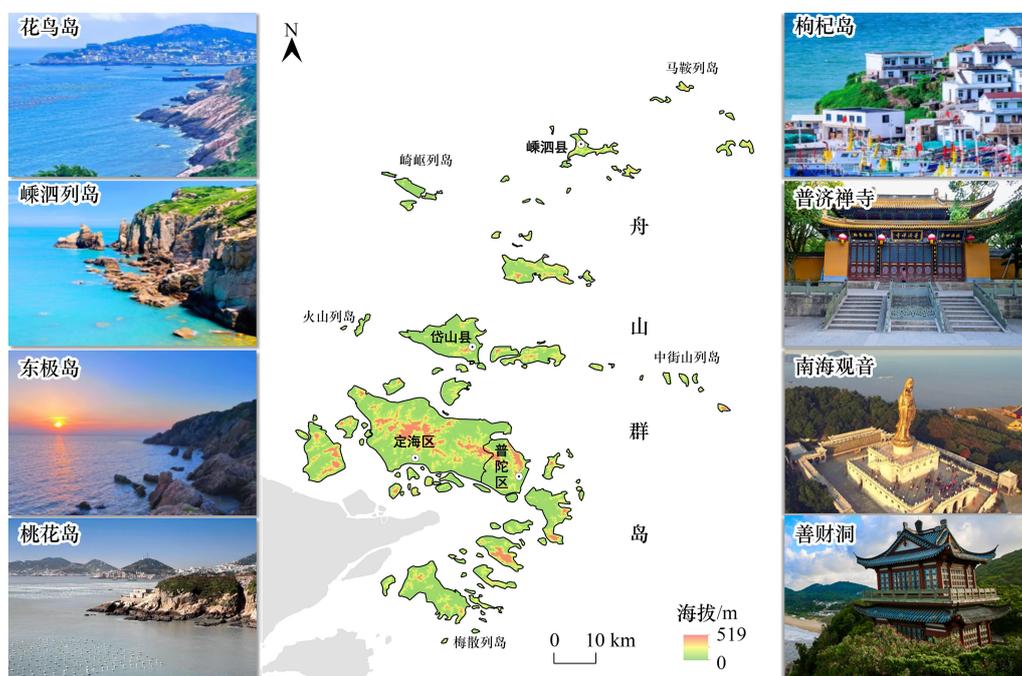


图 1 舟山群岛区位图

Fig.1 Location map of the Zhoushan archipelago

间有限、生态敏感且物种多样性相对匮乏,因而极易受到旅游开发、游客超载以及全球气候变化、外来物种入侵等人类活动和自然扰动因素的影响。最后,伴随海洋经济和旅游经济的发展,舟山群岛在生态安全方面面临日趋严峻的挑战,包括近海水质恶化、海岸线侵蚀加剧、淡水资源过度开发、生物多样性丧失及碳排放增加等问题^[44],这种旅游开发与海岛生态系统保护之间的冲突,为本研究提供了理想的科学研究案例地。

2.2 评价指标体系构建

2.2.1 CSAED 模型

随着海岛生态系统面临气候变暖、资源过度开发和旅游高强度发展等多重压力,构建一套能够将社会-经济驱动与生态系统演化耦合的海岛旅游生态安全评价指标体系,已成为维护全球海岛生态系统健康的关键议题。在众多模型框架中,CSAED 模型是由承载力(Carrying capacity)、支持力(Supporting capacity)、吸引力(Attraction capacity)、延续力(Endurance capacity)和发展力(Development capacity)五个维度构成的综合分析框架,其强调在复杂社会-生态系统中,不仅要考察资源与环境的承载约束,还需兼顾社会基础条件的支撑作用、吸引力对系统稳定性的反馈效应、生态与经济的可持续延续机制,以及未来发展潜力的动态拓展。CSAED 模型已被应用于城市生态健康和生态可持续性评价以及旅游生态安全预测研究中^[39,45-46],结果表明该模型能够整合多维要素,揭示社会-生态系统运行机制与演化规律,还可以体现出较强的适用性与解释力,突出系统要素间的互动与协同作用,能够构建一个结构闭合、逻辑严密的海岛旅游地生态系统分析框架,具有理论整合性与实践指导性^[46]。

基于对 CSAED 模型分析,(1)海岛旅游地生态安全的承载力主要基于生态环境承载力理论,强调海岛旅游地自然生态系统在外部压力下的最大容纳限度,是界定海岛旅游地生态安全底线的关键维度,有助于设定其环境阈值、游客容量以及空间利用强度的合理范围。(2)支持力依托于生态系统物质-能量流动理论,反映海岛自然资源、能源系统和基础设施对旅游活动与生态系统运行的支撑能力,是衡量海岛旅游地生态系统稳态性和运行保障能力的重要维度。(3)吸引力融合旅游吸引物系统理论与生态系统服务理论,体现海岛旅游地生态系统激发游客动机、创造海洋文化与审美价值的功能,是生态和人文资源向海岛旅游经济转化的核心要素,也是维系海岛目的地吸引力的关键纽带。(4)延续力运用可持续发展理论与社会-生态系统韧性理论,代表海岛旅游地在人口结构优化、资源配置公平与系统适应性管理中的演化潜力,是保障海岛旅游地生态系统长期稳定性与可持续福祉的核心变量。(5)发展力则是以新制度经济学与演化经济地理学为理论支撑,强调制度安排、产业协同与技术创新在海岛旅游地生态系统转型与升级过程中的作用,重点关注绿色发展路径、旅游产品创新与公共治理绩效,是引导海岛旅游地生态系统良性演化与战略提升的关键动力。这 5 个子系统之间相互联系,体现了海岛旅游地生态系统既具有一般社会-生态系统的基本特征,又因其资源禀赋、空间格局和人类游憩活动影响而展现出独特的社会经济属性,如图 2 所示。

2.2.2 评价指标体系构建

本研究以 CSAED 为基础,构建了涵盖“承载力-支撑力-吸引力-延续力-发展力”五大核心功能的海岛旅游地生态安全综合分析框架。该模型系统整合海岛旅游地生态、社会与经济三元要素,既关注海岛自然生态系统的稳态与脆弱性,又引入海岛旅游市场、社区结构与治理绩效等要素^[9],增强了海岛旅游地生态安全评价的理论解释力。因此,本文根据科学性、综合性、系统性、可操作性原则,构建了舟山群岛旅游生态安全评价指标体系(表 1)。评价指标数据来自于 2008—2022 年《浙江省统计年鉴》以及 2008—2022 年舟山市统计年鉴,部分缺失数据采用线性插值法补充。

海岛旅游生态安全中“承载力”子系统主要聚焦于海岛自然生态系统对旅游开发干扰的响应阈值与稳态维持能力,由空气质量优良率、森林面积、海岛生境破碎度等 9 项指标共同构建,旨在揭示海岛旅游活动所带来的环境压力及其生态响应路径。其中,空气质量优良率、PM_{2.5} 年均浓度、人均绿化覆盖面积、森林面积、公园绿地面积与城市交通噪声等指标反映海岛大气环境与绿色空间质量;近海Ⅲ类海水水质达标面积比例表征陆海交汇区生态系统面临的污染胁迫。生物多样性指数及生境破碎度表征海岛植被格局的完整性与生态系统的结构稳定性。

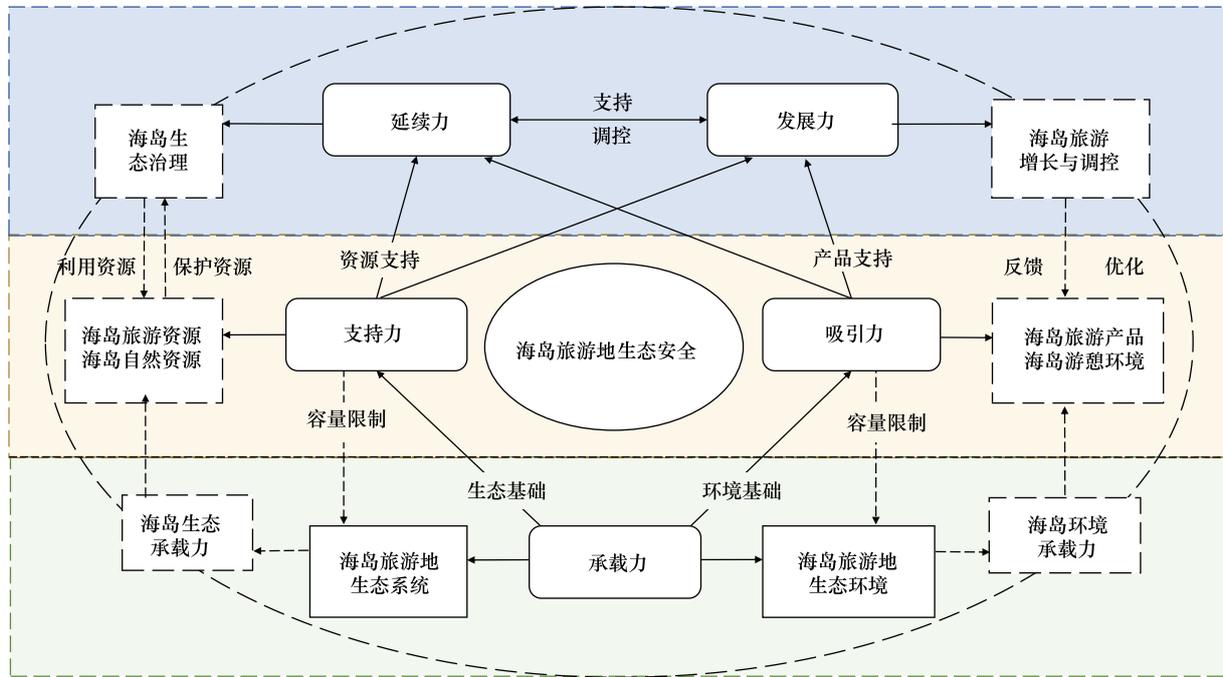


图 2 海岛旅游地生态安全的 CSAED

Fig.2 CSAED Model for ecological security in island tourism destinations

CSAED:承载力 Carrying capacity、支持力 Supporting capacity、吸引力 Attraction capacity、延续力 Endurance capacity 和发展力 Development capacity) 模型

表 1 舟山群岛旅游生态安全评价指标体系

Table 1 Indicator system for evaluating the ecological security of tourism in the Zhoushan Archipelago

子系统 Subsystem	单项指标 Individual indicator	常权权重 Normalized weight/%	指标类型 Indicator type	指标来源 Indicator source	子系统 Subsystem	单项指标 Individual indicator	常权权重 Normalized weight/%	指标类型 Indicator type	指标来源 Indicator source	
承载力 Carrying capacity	D1 空气质量优良率/%	0.028	效益型	[47]	吸引力 Attraction capacity	D17 国内旅客数量/万人	0.026	成本型	[48]	
	D2 人均绿化覆盖面积/m ²	0.037	效益型			D18 入境游客数量/万人	0.073	成本型		
	D3 城市交通噪声/dB	0.018	成本型			D19 星级酒店数量/个	0.049	成本型		
	D4 PM _{2.5} 年平均浓度/(μg/m ³)	0.055	成本型			D20 旅行社数量/个	0.034	成本型		
	D5 近海Ⅲ类海水水质标准海域面积比例/%	0.047	效益型			D21 旅游饭店数量/个	0.037	成本型	[49]	
	D6 森林面积/666.667hm ²	0.021	效益型			延续力 Endurance capacity	D22 环保投入占 GDP 比重/%	0.037	效益型	
	D7 公园绿地面积/0.0667hm ²	0.055	效益型				D23 近海海域环境功能区达标率/%	0.045	效益型	
	D8 海岛生物多样性指数	0.024	效益型				D24 生活垃圾无害化处理率/%	0.011	效益型	
	D9 海岛生境破碎度	0.09	效益型				D25 城镇生活污水处理率/%	0.048	效益型	
支持力 Supporting capacity	D10 年均降水量/mm	0.02	效益型	[50]	发展力 Development capacity	D26 GDP 增长率/%	0.015	成本型	[39]	
	D11 人均水资源/(m ³ /人)	0.032	效益型			D27 海洋经济占 GDP 比重/%	0.036	成本型		
	D12 人均耕地面积/0.0667hm ²	0.025	效益型			D28 国内游客增长率/%	0.01	成本型		
	D13 单位 GDP 能耗降低率/%	0.013	成本型			D29 入境游客增长率/%	0.011	成本型		
	D14 港口旅客吞吐量/万人	0.037	成本型							
	D15 公路通车里程/km	0.022	效益型							
	D16 旅游客运总量/万人	0.039	成本型							

支持力子系统用于评估海岛旅游地在资源环境供给与基础设施保障和支撑能力,也可衡量海岛旅游地生产、生活、生态“三生空间”运行的稳健性与协调性,共涵盖 6 项评价指标。其中,年均降水量、人均水资源和人均耕地面积反映了海岛自然资源的供给能力。单位 GDP 能耗降低率衡量海岛能源利用效率,体现发展过程中的绿色转型水平;港口旅客吞吐量、公路通车里程及旅游客运总量反映了区域交通基础设施对旅游流的空间支撑能力,是衡量旅游目的地可进入性与接待能力的重要基础性指标。

吸引力子系统旨在衡量海岛旅游吸引物激发游客动机、引导旅游流入并实现生态系统服务功能的能力,共包含 5 项关键指标。国内游客数量与入境游客数量反映海岛旅游产品在国内外市场的知名度与空间辐射范围。星级酒店数量、旅游饭店数量及旅行社数量体现旅游接待服务体系的完善度,间接折射海岛旅游地对游客市场的吸引与接纳能力边界。

延续力子系统包括 4 项指标,其中环保投入占 GDP 比重反映地方政府在海岛生态环境治理中的财政支持能力,构成海岛旅游地环境可持续性的基础保障;在污染治理层面,近海海域环境功能区水质达标率、生活垃圾无害化处理率与城镇生活污水处理率共同体现了陆源污染控制与海洋环境质量改善的协同成效,能够表征海岛生态系统的自我调节能力与韧性修复水平。

发展力子系统旨在衡量海岛旅游地在经济增长、产业结构优化与生态治理协同推进过程中的发展潜力。该子系统共包含 4 项指标,GDP 增长率与海洋经济占 GDP 比重体现区域整体经济活力与海洋特色产业的定位,是支撑绿色转型和生态型经济体系建设的核心指标;国内游客增长率与入境游客增长率作为衡量旅游市场扩张力、目的地吸引力与区域竞争力的重要指标,凸显了旅游发展在推动海岛经济增长的路径实践。

2.3 变权模型

变权模型通过功效系数法对效益型与成本型指标分别进行标准化处理以消除量纲差异,基于指数型函数构造惩罚性状态变权向量,并结合熵权法确定的基础权重(表 1)计算动态变权权重。旨在突破舟山群岛旅游生态安全评价中传统静态权重设定的局限,即通过变权模型生成的动态权重向量,能够在综合隶属度计算中发挥核心作用,尤其体现在对“瓶颈”指标的惩罚效应上,从而保证综合隶属度能够真实反映关键风险因子对旅游地生态安全水平的约束影响。

(1) 指标标准化。为消除量纲影响,需对案例地旅游生态安全各项指标开展标准化处理。本文借鉴功效系数法,针对效益型指标(越大越优型)和成本型指标(越小越优型),分别运用以下两个公式进行标准化操作。

$$u_i = \begin{cases} 1 - \frac{M_i}{U_i} \times 0.15 & U_i \geq M_i \\ \frac{U_i}{M_i} \times 0.85 & 0 < U_i < M_i \end{cases}$$

$$u_i = \begin{cases} 1 - \frac{U_i}{M_i} \times 0.15 & 0 < U_i \leq M_i \\ \frac{M_i}{U_i} \times 0.85 & M_i < U_i \end{cases}$$

式中, u_i 表示标准化后的值; U_i 表示指标值; M_i 表示指标的否定水平。

(2) 构造惩罚性状态变权向量。由于旅游地生态安全的安全性要求对较差的“瓶颈”指标进行惩罚,以利于找出对安全性影响程度较大的指标,且指数型状态向量具有参数设置灵活、拓展性强的特点,因此,结合海岛生态系统安全特征,构造如下惩罚型状态变权向量:

$$S_i(U) = \begin{cases} e^{-\varepsilon(u_i - \gamma)} & u_i \leq \gamma \\ 1 & u_i > \gamma \end{cases}$$

式中, ε 为惩罚因子; γ 为旅游生态安全指标标准化后安全与否的阈值。当 $0 \leq u_i \leq \gamma$ 时, u_i 对应的权重越大,

u_i 的值变小,因此加权和变小,达到对指标 i 惩罚的目的;当 $\gamma \leq u_i \leq 1$,不对指标进行惩罚。参考已有研究成果, ε 确定为 0.81547, γ 确定为 0.85。

(3) 惩罚型变权权重的确定。借助熵权法确定基础权重,如表 1 所示。将变权向量 $W(U) = (w_1(U), w_2(U), w_3(U), \dots, w_i(U))$ 表示为常权向量 W 和状态变权向量 $S(U)$ 的归一化的 Had- amard 乘积。基于惩罚性变权的旅游生态安全系统安全性权重公式如下:

$$W(U) = \frac{(w_1 S(U), w_2 S(U), w_3 S(U), \dots, w_i S(U))}{\sum_{n=1}^i w_i S_i(U)} = \frac{w_i S_i(U)}{\sum_{n=1}^i w_i S_i(U)}$$

2.4 正态灰色云白化权模型

云模型是一种实现定性语言概念与定量数值表示之间不确定转换的模型^[51]。由于正态云模型在自然科学及生产活动中具有良好的普适性和独特的数学性质,因此本文采用正态云模型替代传统白化权函数,得到正态灰色云白化权模型,简称为灰色云模型。其在本研究中主要用于解决舟山群岛旅游生态安全评价中因监测数据碎片化、指标异构性导致的评价过程模糊性与数据灰色性问题,弥补传统 TOPSIS 法等模型难以综合处理上述不确定性的局限。正态灰色云模型数字特征 (E_x, E_n, H_e) 。其中:

$$E_x = (C_{\max} + C_{\min}) / 2$$

$$E_n = (C_{\max} - C_{\min}) / 2.355$$

$$H_e = \varepsilon$$

式中, E_x 表示灰色云的顶峰,即隶属度为 1 的点; C_{\max} 和 C_{\min} 分别为灰色云的左右边界; E_n 是灰色云的熵,表示灰色云边界的模糊程度大小; H_e 表示灰色云的超熵,表示灰色云等级边界的随机程度大小, ε 表示对熵不确定性的度量,依据经验确定。

其中 $f(U)$ 表示 i 指标属于 j 等级适度正态灰色云白化权函数,计算公式如下,记为 $[E_{xj}, E_{nj}, H_{ej}]$:

$$f_i(U) = \begin{cases} e^{-\frac{(U-E_x)^2}{2(E_n)^2}} & x \in [C_{\min}, C_{\max}] \\ 0 & U \notin [C_{\min}, C_{\max}] \end{cases}$$

上限正态灰色云白化权函数,计算公式如下,记为 $[(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej}), -]$:

$$f_i(U) = \begin{cases} e^{-\frac{(U-E_x)^2}{2(E_n)^2}} & \\ 1 & U \in [E_x, C_{\max}] \\ 0 & U \notin [C_{\min}, C_{\max}] \end{cases}$$

下限正态灰色云白化权函数,计算公式如下,记为 $[- , (E_{xj}, E_{nj}, H_{ej})]$:

$$f_i(U) = \begin{cases} 1 & U \in [C_{\min}, E_x] \\ e^{-\frac{(U-E_x)^2}{2(E_n)^2}} & U \in [E_x, C_{\max}] \\ 0 & U \notin [C_{\min}, C_{\max}] \end{cases}$$

本模型计算所得的各指标隶属度是计算综合隶属度的基础,其对不确定性的刻画精度直接决定了评价结果的可靠性。通过该模型有效削弱数据噪声对隶属度的干扰,能够确保系统层面的安全等级判定与安全指数计算更加贴近实际状况,从而为海岛旅游地生态安全整体评价结果提供稳健的指标支撑。

2.5 正态灰色云白化权综合隶属度

正态灰色云白化权综合隶属度计算方法通过模拟生成 1000 次灰色云滴并对所得指标隶属度进行归一化处理,再结合动态权重计算舟山群岛旅游生态安全的综合隶属度。在此基础上,依据最大隶属度原则判定安全等级并计算安全指数。

(1) 各个指标隶属度。灰色云隶属度用于描述评价旅游生态安全指标数据对各个等级的隶属程度。鉴于灰色云模型具有随机性,每次计算结果都会产生一个灰色云滴。因此,每次计算结果产生一个灰色云滴,对

产生的所有灰色云滴的隶属度依据下列公式进行归一化处理,从而得到最终隶属度 $f_i^j(U_i)$,即:

$$f_i^j(U_i) = [f_{i1}^j(U_i) + f_{i2}^j(U_i) + \dots + f_{im}^j(U_i)] / m$$

式中, $f_{im}^j(U_i)$ 表示第 m 次计算的灰色云隶属度,本文 m 取值为1000。

(2) 综合隶属度,计算研究对象 p 关于评价等级 j 的综合隶属度 θ_{ij}^j ,即:

$$\theta_p^j(U_i) = \sum_{i=1}^n f_i^j(U_i) w(U_i)$$

式中, $f_{ij}(U_i)$ 表示 i 指标属于 j 子类的隶属度, $w(U_i)$ 为指标 i 的变权权重。

(3) 评价等级以及安全指数的确定

根据最大隶属度原则,若

$$\max\{\theta_p^j\} = \theta_p^{j^*} \quad j \in \{1, 2, 3, 4\}$$

则评价对象 p 属于评价等级 j^* 。

在参考相关文献的基础上^[52],设定安全指数为100,则评价对象 p 的旅游生态安全指数为 S_p :

$$S_p = \sum_{k=1}^5 \theta_p^k \times \frac{100}{5} \times (5 + 1 - k)$$

$$k = 1, 2, 3, 4, 5$$

比较旅游生态安全指数值 S_p 的大小,可进一步对同一安全等级的各个评价对象所处状态进行排序。

3 研究结果与分析

3.1 灰色云模型结果

在借鉴已有生态安全等级划分标准的基础上^[53],本文将海岛旅游地生态安全分为5个等级:恶化等级(V)、风险等级(IV)、敏感等级(III)、临界安全(II)、安全等级(I),并确定等级边界 $[C_{\min}, C_{\max}]$,由公式5)~(10)计算灰色云模型的各个参数,并划分案例地舟山群岛旅游生态安全评价指标等级划分标准(表2)。

3.2 整体评价结果

本研究对2008—2022年舟山群岛旅游生态安全系统安全性进行分析,揭示了该区域在这一时期内旅游生态安全状况的动态变化。由图3可知,舟山群岛旅游生态安全指数总体呈上升趋势,直观反映出该区域在旅游生态保护发展方面取得了积极进展。舟山群岛旅游生态安全系统的安全等级在2008—2017年均维持在“恶化等级”阶段,表明舟山群岛在旅游开发初期,生态环境保护意识相对薄弱,旅游基础设施建设和旅游活动的开展对生态环境造成较大压力,使生态系统面临严峻挑战。舟山群岛旅游生态安全系统的安全性从2018年开始有一定波动,2018年其安全等级为风险等级(IV),2019—2022年其安全等级转变为安全等级(I),说明在此期间,舟山群岛的旅游生态安全问题得到了重视,这使得旅游地生态环境恶化趋势得到一定程度遏制,但由于前期破坏积累以及旅游持续发展带来的生态压力,系统安全维持在“安全等级”仍需做出努力。

进一步分析各年份的综合隶属度数据,不同等级的隶属度变化反映了海岛旅游地生态系统安全性的动态演变过程。从安全指数来看,2008年的安全指数为50.793,到2009年下降为42.675,说明2009年的旅游安全水平有所下降,但从2009年起,其安全指数总体呈上升趋势,且2021年和2022年安全指数高达80以上,舟山群岛的生态安全状况在此期间在不断改善,该区域在旅游生态协调方面取得了积极进展。从部分综合隶属度来看,2008年中,综合隶属度中“恶化等级(V)”的比例高达0.594,体现出该年份生态安全系统所受到的多种不利因素的强烈影响,故而处于极为脆弱的状态;而到2019年,“安全等级(I)”的综合隶属度达到0.268,表明旅游地生态安全状况得到明显改善。

表 2 舟山群岛旅游生态安全评价指标等级标准

指标层	安全等级	临界安全	敏感等级	风险等级	恶化等级
Indicator Level	Safety level (I)	Critical security(II)	Sensitivity level(III)	Risk level(IV)	Degradation level(V)
D1 空气质量优良率 Air quality good rate/%	[(98.8,0.849,0.085);-]	[97.25,0.467,0.047]	[95.35,1.146,0.115]	[93,0.849,0.085]	[-;(91.05,0.807,0.081)]
D2 人均绿化覆盖面积 Per capita green space coverage/m ²	[(18.14,0.73,0.073);-]	[16.65,0.535,0.054]	[15.74,0.238,0.024]	[14.425,0.887,0.089]	[-;(12.64,0.62,0.062)]
D3 城市交通噪声 Urban traffic noise/dB	[-;(51.45,0.297,0.03)]	[52.15,0.297,0.03]	[52.85,0.297,0.03]	[53.6,0.34,0.034]	[-(54.5,0.425,0.042);-]
D4 年平均浓度 Annual average concentration/(μg/m ³)	[-;(14.2,85,0.285)]	[21,3.2,0.32]	[28,4.5,0.45]	[35,5.8,0.58]	[-(41.68,3.5,0.35);-]
D5 近海 I II 类海水水质标准海域面积比例 Proportion of coastal area meeting class I-II water quality standards/%	[(47.85,3.27,0.327);-]	[41,2.548,0.255]	[35,2.548,0.255]	[29,2.548,0.255]	[-;(23,2.548,0.255)]
D6 森林面积 Forest area/666.667hm ²	[(101.3,4.2,0.42);-]	[100.85,3.8,0.38]	[100.74,3.5,0.35]	[97.69,4.1,0.41]	[-;(8.29,3.3,0.33)]
D7 公园绿地面积 Park and green space area/hm ²	[(1277,4.5,0.45);-]	[1267,0.4,0.04]	[1255,3.5,0.35]	[1238,3,0.3]	[-;(845,3.2,0.32)]
D8 海岛生物多样性指数 Island biodiversity index	[(0.65,0.008,0.001);-]	[0.63,0.008,0.001]	[0.61,0.008,0.001]	[0.59,0.008,0.001]	[-;(0.57,0.008,0.001)]
D9 海岛生境破碎度 Island habitat fragmentation	[(1.83,0.042,0.004);-]	[1.75,0.025,0.003]	[1.695,0.021,0.002]	[1.645,0.021,0.002]	[-;(1.59,0.025,0.003)]
D10 年降水量 Annual precipitation/mm	[(1836.8,7.8,0.78);-]	[1629.6,7,0.7]	[1498.4,6.5,0.65]	[1251.2,5.5,0.55]	[-;(1051.2,5,0.5)]
D11 人均水资源 Per capita water resources/(m ³ /人)	[(1083.65,51.592,5.159);-]	[900.05,104.331,10.433]	[724.1,45.096,4.51]	[582.5,75.159,7.516]	[-;(466.55,23.312,2.331)]
D12 人均耕地面积 Per capita arable land area/(0.0667hm ² /人)	[(0.325,0.021,0.002);-]	[0.29,0.008,0.001]	[0.275,0.004,0.001]	[0.255,0.013,0.001]	[-;(0.21,0.025,0.003)]
D13 单位 GDP 能耗降低率 Reduction rate of energy consumption per Unit GDP/%	[-;(1.5,0.4,0.04)]	[2.4,0.5,0.05]	[4.7,0.6,0.06]	[6.1,0.7,0.07]	[-(9.2,0.8,0.08);-]
D14 港口旅客吞吐量 Port passenger throughput/万人	[-;(153,1,0.1)]	[1267,1.8,0.18]	[2830,2.2,0.22]	[2922,2.5,0.25]	[-(3234,2.8,0.28);-]
D15 公路通车里程 Highway mileage in operation/km	[(1975,3,0.3);-]	[1967,2.2,0.25]	[1934.8,2,0.2]	[1801.7,1.5,0.15]	[-;(1615.1,1,0.1)]
D16 旅游客运总量 Total tourist passenger volume/万人	[-;(4696,895.117,89.512)]	[6836.5,922.718,92.272]	[8647.5,615.287,61.529]	[10528,981.741,98.174]	[-(13896,1878.556,187.856);-]
D17 国内游客数量 Domestic tourist visits/万人次	[-;(818,175,250.153,25.015)]	[1304.005,162.442,16.244]	[1804.3,262.437,26.244]	[2574.625,391.766,39.177]	[-(4940.065,1617.1,161.71);-]
D18 入境游客数量 Inbound tourist visits/万人次	[-;(84672,64049.257,6404.926)]	[186027.5,22027.601,2202.76]	[234377.5,19033.97,1903.397]	[286082.5,24876.858,2487.686]	[-(329844,12287.898,1228.79);-]
D19 星级酒店数量 Number of star-rated hotels/个	[(102,2,548,0.255);-]	[91.5,6.369,0.637]	[81.5,2.123,0.212]	[74.5,3.822,0.382]	[-;(66,3.397,0.34)]
D20 旅行社数量 Number of travel agencies/个	[(217,10,191,1.091);-]	[197.5,6.369,0.637]	[182.5,6.369,0.637]	[172.5,2.123,0.212]	[-;(163,5.945,0.594)]
D21 旅游饭店数量 Number of tourist hotels/个	[(649,1.2,0.12);-]	[619,1,0.1]	[591,8,0.8]	[429,6,0.6]	[-;(311,5,0.5)]
D22 环保投入占 GDP 比重 Environmental protection investment as % of GDP	[(0.39,0.017,0.002);-]	[0.355,0.013,0.001]	[0.33,0.008,0.001]	[0.3,0.017,0.002]	[-;(0.27,0.008,0.001)]
D23 近海海域环境功能区达标率 Compliance rate of coastal environmental functional zones	[(48.15,3.015,0.301);-]	[41.5,2.633,0.263]	[35.45,2.505,0.251]	[29.25,2.76,0.276]	[-;(23,2.548,0.255)]
D24 生活垃圾无害化处理率 Sanitary treatment rate of domestic waste/%	[(99.35,0.552,0.055);-]	[96.6,1.783,0.178]	[92.45,1.741,0.174]	[88.55,1.571,0.157]	[-;(84.65,1.741,0.174)]
D25 城镇生活污水处理率 Urban domestic sewage treatment rate/%	[(97.48,0.4,0.04);-]	[96.75,0.3,0.03]	[89.28,0.6,0.06]	[81.54,0.7,0.07]	[-;(14.5,0.8,0.08)]
D26 GDP 增长率 GDP growth rate/%	[-;(7.1,0.34,0.034)]	[8.4,0.764,0.076]	[9.9,0.51,0.051]	[11.5,0.849,0.085]	[-(13.5,0.849,0.085);-]
D27 海洋经济占 GDP 比重 Marine economy as % of GDP/%	[-;(66.55,0.127,0.013)]	[66.95,0.212,0.021]	[67.65,0.382,0.038]	[68.6,0.425,0.042]	[-(69.65,0.467,0.047);-]
D28 国内游客增长率 Domestic tourist growth rate/%	[-;(8.82,1.933,0.193)]	[19.06,1.2,0.12]	[52.11,1.44,0.144]	[80.585,0.979,0.098]	[-(137.12,1.911,0.191);-]
D29 入境游客增长率 Inbound tourist growth rate/%	[-;(68.55,18.017,1.802)]	[-22.91,20.73,2.073]	[19.775,15.52,1.552]	[46.725,7.367,0.737]	[-(65.345,8.446,0.845);-]

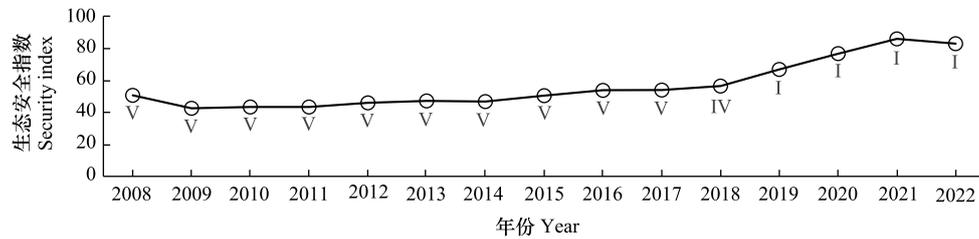


图3 2008—2022年舟山群岛旅游生态安全指数

Fig.3 Tourism ecological security index of Zhoushan Archipelago from 2008 to 2022

V: 恶化等级 Degradation Level; IV: 风险等级 Risk Level; I: 安全等级 Safety Level

表3 2008—2022年舟山群岛旅游生态安全评价结果

Table 3 Evaluation results of tourism ecological security in Zhoushan Archipelago from 2008 to 2022

年份 Year	综合隶属度 Comprehensive membership degree					安全等级 Security level	安全指数 Security index
	V	IV	III	II	I		
2008	0.594	0.177	0.104	0.115	0.164	V	50.793
2009	0.407	0.145	0.178	0.077	0.119	V	42.675
2010	0.433	0.146	0.119	0.056	0.174	V	43.52
2011	0.389	0.273	0.098	0.07	0.133	V	43.518
2012	0.339	0.311	0.061	0.06	0.184	V	46.125
2013	0.357	0.315	0.04	0.066	0.199	V	47.337
2014	0.314	0.265	0.104	0.114	0.147	V	46.924
2015	0.315	0.212	0.095	0.134	0.195	V	50.645
2016	0.346	0.125	0.178	0.156	0.189	V	53.962
2017	0.304	0.153	0.18	0.187	0.162	V	54.145
2018	0.243	0.263	0.131	0.156	0.209	IV	56.583
2019	0.211	0.159	0.145	0.262	0.268	I	67.044
2020	0.177	0.125	0.152	0.243	0.399	I	76.921
2021	0.242	0.062	0.103	0.302	0.486	I	86.199
2022	0.19	0.106	0.069	0.067	0.657	I	83.152

V: 恶化等级 Degradation Level; IV: 风险等级 Risk Level; III: 敏感等级 Sensitivity Level; II: 临界安全 Critical Safety; I: 安全等级 Safety Level

3.3 子系统评价结果

3.3.1 承载力子系统

在研究时段内(2008—2022年),舟山群岛旅游生态安全各子系统呈现出差异化演变特征,其中承载力子系统的动态变化尤为显著。由图4可知,该子系统安全指数从2008年的48.134波动提升至2022年的94.795,安全等级实现了从"恶化等级(V)"到"安全等级(I)"的五阶段跨越,这一演变过程清晰反映了海岛旅游地承载力系统韧性的强化轨迹。具体表现为:2008—2012年间承载力子系统安全指数存在波动下降,而在2013年后呈现持续上升态势,2020年达到96.188的峰值,这一阶段性特征与海岛生态环境治理投入强度呈正相关。其中,空气质量优良率、人均绿化覆盖面积等大气环境指标与森林面积、公园绿地面积等空间要素的协同改善,有效降低了生态系统面临的污染胁迫。特别值得注意的是,生境破碎度与森林面积等植被恢复指标的持续向好,不仅佐证了海岛生态的修复效果,更与整体旅游生态安全指数提升形成互证,共同揭示了海岛旅游地旅游生态系统韧性增强的趋势,为海岛旅游地生态安全格局稳定性提供了可靠的承载功能。

3.3.2 支持力子系统

由图5可知,舟山群岛旅游生态安全支持力子系统的安全指数虽从20.394提升至73.985,但演变过程呈

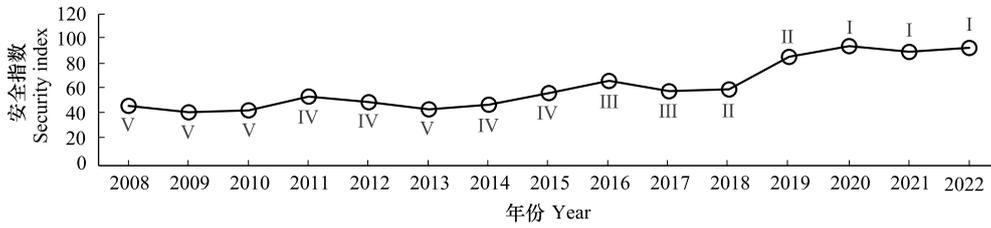


图 4 承载力子系统安全指数与安全等级

Fig.4 Safety index and safety level of the load-bearing capacity subsystem

现明显的波动性,且长期处于较低安全水平。2008—2017 年间,该子系统始终维持在恶化等级(V),直至 2022 年才首次突破至“安全等级(I)”。这一趋势表明,尽管港口旅客吞吐量、公路通车里程、旅游客运总量等基础设施指标持续增长,在一定程度上缓解了压力子系统的脆弱性,但资源约束与开发需求的结构性矛盾仍然突出。具体表现为:(1)资源供需失衡:人均水资源量与耕地面积的持续下降,与旅游基础设施的快速扩张形成显著冲突,导致子系统长期处于 60 以下的低安全区间,反映海岛资源承载力的刚性约束。(2)阶段性脆弱性:2015—2018 年间支持力生态安全指数出现明显波动,进一步印证了资源供给波动对海岛旅游地生态安全支持力子系统稳定性的影响,需通过优化水资源管理、提升耕地利用效率等措施增强供需平衡能力。(3)治理滞后效应:2022 年安全等级的跃升可能受益于后期资源调控政策的实施,但长期低等级状态表明,基础设施扩张若未能与资源承载力协同规划,仍可能引发系统性风险。

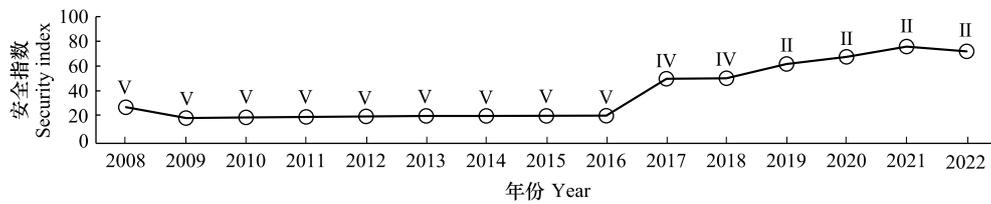


图 5 支持力子系统安全指数与安全等级

Fig.5 The security index and safety level of the supported force subsystem

3.3.3 吸引力子系统

吸引力子系统的动态演变揭示了海岛旅游市场与生态环境的复杂互馈机制。该子系统安全指数呈现显著的“M”型波动特征(图 6),从 2008 年的 90.413(安全等级 I)骤降至 2010 年的 57.477(恶化等级 V),最终在 2022 年跌至 46.587(恶化等级 V),其演化轨迹可划分为三个典型阶段:(1)高吸引力阶段(2008—2010 年):国内外游客数量与旅游设施(星级酒店、旅行社等)的同步增长,推动子吸引力子系统维持较高安全等级。(2)波动调整阶段(2011—2018 年):吸引力子系统安全等级在 I 至 V 级间剧烈起伏,反映旅游吸引力与生态承载力的动态博弈。国内游客持续增长与入境游客短期激增,导致游客密度突破生态阈值,而同期星级酒店数量扩张速度远超环境容量修复速率,形成“设施过剩-生态退化”的负反馈循环。(3)疫情冲击衰退阶段(2019—2022 年):COVID-19 疫情导致游客量锐减,短期市场萎缩虽缓解生态压力,却暴露海岛旅游对游客流量的绝对依赖这一根本性缺陷。

3.3.4 延续力子系统

延续力子系统反映了政府与社会在生态治理中的财政投入强度与响应能力,在整个考察期内呈现出明显的改善趋势。由图 7 可知:2008—2012 年,该子系统安全等级持续处于“恶化等级(V)”,而自 2012 年起稳定保持在“安全等级(I)”,安全指数除 2009—2012 年间略有波动外,其余年份均维持在 80 以上,显示出海岛生态系统自我调节与恢复能力的显著提升。环保投入占 GDP 比重、生活垃圾无害化处理率、城镇生活污水处

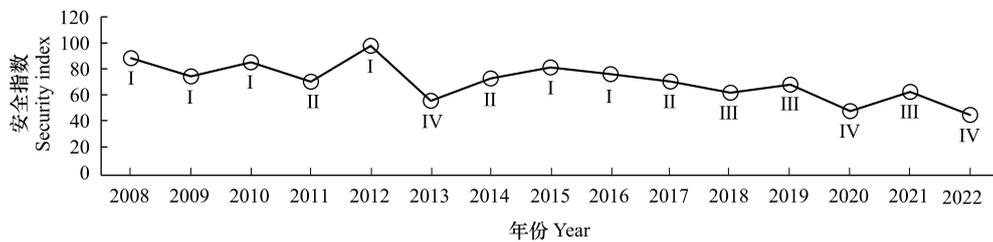


图6 吸引力子系统安全指数与安全等级

Fig.6 The security index and safety level of the attracted force subsystem

理率等关键指标的持续向好,反映出污染治理投入的稳定增长与技术效率的阶段性提升。尤其是城镇生活污水处理率与环保投入之间呈现出较强的正向关联,表明治理效能随资金投入增强而显现。然而,近海海域环境功能区水质达标率最高仅为 48.15%,揭示出当前海陆统筹治理仍存在明显短板,生态治理在海岛边缘—海岸带交界区域的协同推进机制有待加强。此外,该子系统在时间上表现出典型的治理滞后效应,表明早期投入需经过一定生态响应周期方可实现生态安全水平的实质性提升,进一步体现了延续力维度在生态系统修复中承载的时滞性和积累性特征。

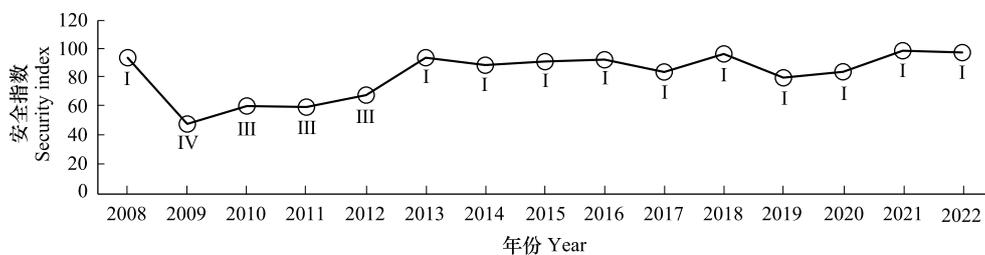


图7 延续力子系统安全指数与安全等级

Fig.7 The security index and safety level of the evolved force subsystem

3.3.5 发展力子系统

舟山群岛旅游生态安全发展力子系统主要反映海洋经济活力与旅游产业增长对生态安全的驱动效应。整体上,发展力子系统安全指数呈现“先降后升”的“V”字型演化趋势(图8):即从2008年的81.179下降至2017年的21.919,后又迅速回升至2022年的98.032,展现出海洋经济与旅游产业结构调整对生态系统影响的双向效应。2008—2017年,尽管GDP增长率和海洋经济占比持续上升,但旅游产业生态成本未被有效内部化,国内与入境游客增长偏快且缺乏绿色引导,叠加生态治理滞后,造成该子系统生态安全指数显著下滑。尤其是指标D27海洋经济占GDP比重指标在此期间表现出“经济挤压生态”的趋势,说明海洋经济扩张未同步带动海岛生态治理投入。进入2018年后,随着生态文明建设的相关政策深化,旅游接待增长也趋于放缓,国内和入境游客增长率指标的下降带动海岛生态环境压力缓解,尤其是旅游收入与生态补偿联动机制逐步建立,叠加海洋经济与生态治理的协同效应增强,带动发展力子系统安全指数持续回升。2022年发展力子系统指数升至98.032,表明海岛旅游经济增长与生态系统保护实现阶段性协同,舟山群岛呈现出较强的海岛旅游发展韧性和生态系统支撑能力。

4 结论、讨论与启示

4.1 结论

(1) 舟山群岛旅游生态安全安全指数在研究时段内从50.793上升至83.153,总体呈增长趋势,安全等级从“恶化等级”逐步演变为“安全等级”。这反映了在旅游开发持续推进的背景下,舟山群岛生态系统的安全

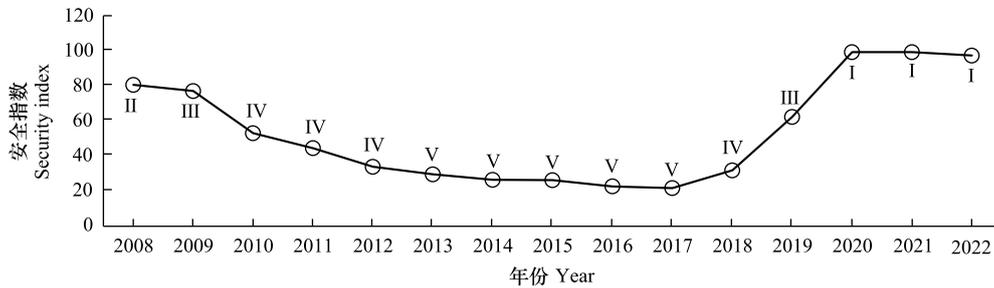


图 8 发展力子系统安全指数与安全等级

Fig.8 The security index and safety level of the developed force subsystem

水平得到增强,海岛旅游活动与海岛生态环境之间的矛盾逐渐缓和,其旅游地人地关系呈现出一种由紧张走向协调的阶段性特征也揭示了海岛地区在高强度开发与脆弱生态系统之间实现动态平衡的可能性,反映了海岛生态环境管控、旅游资源利用优化及管理政策等综合措施的成效,尤其是绿色发展理念的落实,为海岛旅游地生态安全水平的提升提供了保障。

(2) 舟山群岛旅游生态安全各子系统安全状态演化的差异性表明,海岛旅游地生态安全的提升并非均衡线性过程,而是受不同因素的互动与累积效应共同影响。其中,承载力子系统生态安全等级呈稳步上升特征,而支持力子系统安全等级均由长期处于恶化等级后快速上升至安全等级,说明海岛旅游地生态环境治理、资源持续利用、能源清洁生产等方面取得积极成效。吸引力子系统从安全等级跌至恶化等级,折射出海岛目的地吸引力提升与生态系统安全维护之间的协调机制尚需进一步优化。延续力和发展力指标呈现的波动特征,则凸显了海岛旅游地生态安全在旅游经济发展与生态环境政策调控之间的敏感性,提示海岛旅游地生态系统的自我调节与恢复能力需不断强化。

(3) 变权理论与灰色云模型的融合有效提升了海岛旅游地生态安全评价结果的科学性与稳健性。在应用过程中,变权理论能够动态反映不同阶段生态系统内部关键风险因子的变化特征,避免了传统权重设定的刚性弊端;同时,灰色云模型在处理数据模糊性和不确定性方面发挥了显著作用,使得评价结果更能贴合海岛旅游地复杂多变的实际情境。二者的结合不仅优化了旅游生态安全等级划分的合理性,也保证了整体评价过程的可靠性,为揭示案例地旅游生态安全水平时间序列的演变特征提供了科学依据。

4.2 讨论

现有旅游生态安全评价研究多以草原^[54]、湿地^[55]、湖泊^[56]和城市^[17]等陆域生态系统为主体,忽视了海岛旅游地“人-岛-海”三元耦合的系统性特征。本研究基于 CSAED 模型,构建了体现海岛生态系统特征的旅游生态安全评价指标体系,为揭示旅游活动在海陆交互过程中的复杂生态效应提供了新的分析视角,推动旅游生态安全评价由单一陆域研究向陆海一体化的综合研究范式转型。再者,已有文献在计算旅游生态安全评价指标权重时,多采用静态权重赋值方法^[57-58],而本研究引入变权理论,即通过指标权重的动态调整,捕捉了海岛旅游地生态系统在不同阶段和情景下权重变化的敏感性和非线性特征,试图突破传统静态权重难以准确揭示系统内部安全主导因子和风险敏感因子动态演化的局限,以期增强变权理论方法对该领域的溯源能力。同时,本研究采用灰色云模型实现对旅游生态安全评价过程中模糊性与不确定性问题的有效处理,弥补了评价模型在数据处理时认知模糊性与数据灰色性处理的不足,丰富了复杂旅游地生态系统背景下不确定性评价理论的内涵。

本研究虽然构建了基于 CSAED 模型的海岛旅游地生态安全评价指标体系,但随着全球气候变化的加剧和海岛旅游的发展,新的影响因素会不断涌现,未来研究可进一步拓展指标选取范围,以更全面地反映海岛旅游地生态安全状况。再者,在模型构建方面,变权模型参数的确定在一定程度上依赖经验和已有研究成果,导致结果具有一定的主观性,后续研究需要探索及优化更科学的参数确定方法,降低对经验参数的依赖,提高评

价结果的客观性和准确性;还可考虑将其他先进的模型或方法与变权理论和灰色云模型相结合,如引入深度学习模型对指标数据进行特征提取和分析等。最后,未来开展跨国家、跨海域的海岛旅游地生态安全对比研究,总结普适的旅游地生态安全维护策略;同时建立长期动态监测体系,滚动校正指标与模型,为海岛目的地生态安全管理提供实时、精准的决策支持。

4.3 启示

(1) 实施分区分类的海岛旅游生态治理策略。依据不同区域旅游生态安全等级和旅游承载力差异,实施分区分类治理。在旅游开发强度较高、生态环境承压突出的重点岛屿,适度控制游客接待规模,推动海岛旅游产品向低碳、绿色、生态化方向转型;而在旅游吸引力较低的区域,则需结合生态修复工程,推动海岛生态旅游产品与文化体验项目的融合升级,形成“重点保护—适度利用—优化提升”的海岛旅游生态安全梯度管理格局。

(2) 建立动态旅游生态安全监测与风险预警机制。依托遥感监测、无人机巡查、物联网传感器等先进技术,实时采集海岛游客流量、近海水质变化、土地利用、碳排放等关键指标数据,形成多源数据融合的海岛旅游生态安全监测体系。同时,建立分级预警制度,结合重点海岛景区、普通岛屿、外围缓冲区等不同空间尺度,节假日高峰期与淡季不同时间尺度进行差异化风险识别,精准锁定关键风险节点与敏感因子。

(3) 优化数据处理与生态安全评价方法。建议生态环境和旅游管理部门充分利用灰色云模型等先进方法,优化指标数据的处理流程,增强在不完备数据和不确定情境下的旅游生态风险识别能力。同时,应通过培训管理人员和技术人员,提高其对复杂模型的掌握程度,确保评价方法的科学应用。构建跨部门的数据共享平台,将海岛生态环境监测、旅游统计、气候数据和遥感信息进行整合,提升数据互通性与动态更新能力。

(4) 构建智慧化海岛旅游与生态安全管理平台。建设海岛智慧旅游平台和生态安全管理信息平台,将实时监测、动态评价、风险预警、数据分析和决策支持功能有机集成,形成信息化、智能化、可视化的海岛旅游生态安全管理体系。同时,强化对海岛游客出行行为、海岛旅游流量和消费趋势的实时分析,为海岛旅游市场调控和分流提供依据,并实现旅游地生态环境指标的可视化动态展示和风险诊断,及时生成风险预警信息和治理建议。

参考文献(References):

- [1] Whitford W G, Rapport D J, DeSoyza A G. Using resistance and resilience measurements for 《fitness》 tests in ecosystem health. *Journal of Environmental Management*, 1999, 57(1): 21-29.
- [2] 王根绪,程国栋,钱鞠.生态安全评价研究中的若干问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1551-1556.
- [3] 赵敏敏,何志斌,蔺鹏飞.基于压力-状态-响应模型的黑河中游张掖市生态安全评价. *生态学报*, 2021(22): 9039-9049.
- [4] Zheng C C, Li X M, Fan Z P. 2024. Does the construction of a Power Transmission Line (PTL) in a coastal mountainous area affect the regional ecological security? —Taking fujian Tangyuan PTL as an Example. *Journal of Resources and Ecology*, 15(1): 173-181.
- [5] Spalding M D, Ruffo S, Lacambra C, Meliane I, Hale L Z, Shepard C C, Beck M W. The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 90: 50-57.
- [6] Cao W T, Li R, Chi X L, Chen N H, Chen J Y, Zhang H G, Zhang F. Island urbanization and its ecological consequences: a case study in the Zhoushan Island, East China. *Ecological Indicators*, 2017, 76: 1-14.
- [7] 周彬,傅为,周恒玺.舟山群岛旅游经济与生态安全交互影响研究. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2025, (3):19-33.
- [8] Xiong N, Sun B T, Jiang L L, Cui H T. Spatial effects of climate change on tourism development in China: an analysis of tourism value chains. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 952395.
- [9] 周彬,徐金铭,虞虎,金建英.海岛旅游研究进展与启示——以国际英文期刊载文为例. *中国生态旅游*, 2021, 11(4): 548-566.
- [10] 周彬,朱宇辰,虞虎,徐金铭.旅游生态安全研究现状、评述与展望. *生态学报*, 2025, 45(3): 1049-1058.
- [11] Han Y, Tang C C, Zeng R. Review of Tourism Ecological Security from the Perspective of Ecological Civilization Construction. *Journal of Resources and Ecology*, 2002,13(4): 734-745..
- [12] 田里,闫子豪,张鹏杨.基于共生理论的中国边境省域旅游生态安全评价. *中国生态旅游*, 2024, 14(2): 391-409.
- [13] Li Y J, Chen T, Hu J, Wa J. Research on Ecological Security Evaluation of Tourism in Wuhan City. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(2): 149-156.
- [14] 魏小村,李陇堂.基于 DPSIR 模型的西北干旱风沙区旅游生态安全预警研究——以宁夏回族自治区中卫市为例. *生态经济*, 2021, 37(6): 134-139.
- [15] 李锦宏,曾雪,曹庆瑶.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.
- [16] 王舒, 刘凤莲, 杨磊. 丝绸之路经济带旅游生态安全时空动态演变及驱动因素研究. *Journal of Resources and Ecology*, 2024, 15(4): 1054-1067.
- [17] 杨良健, 曹开军. 新疆 85 个县市旅游生态安全时空格局演变及驱动机制. *生态学报*, 2021, 41(23): 9239-9252.
- [18] 杨友宝, 郭付友, 韩国圣. 我国主体功能限制开发区域旅游生态安全动态演变及其驱动因素——以张家界为例. *生态学报*, 2023, 43(20): 8404-8416.
- [19] 周国海. 旅游地生态安全状态评价与维护——以武陵源风景名胜区为例. *社会科学家*, 2009(11): 91-94.
- [20] 董雪旺. 旅游地生态安全评价研究——以五大连池风景名胜区为例. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2003, 19(6): 100-105.
- [21] 李细归, 吴黎, 吴清, 周勇. 中国旅游生态安全测度及障碍因子诊断研究. *生态经济*, 2017, 33(6): 90-95.
- [22] 曹新向. 旅游地生态安全评价模型及实证研究——基于生态足迹模型的分析. *经济地理*, 2006, 26(6): 1062-1066.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 武春友, 郭玲玲, 于惊涛. 区域旅游生态安全的动态仿真模拟. *系统工程*, 2013, 31(2): 94-99.
- [26] 章锦河, 张捷, 王群. 旅游地生态安全测度分析——以九寨沟自然保护区为例. *地理研究*, 2008, 27(2): 449-458.
- [27] 徐美, 刘春腊. 张家界市旅游生态安全评价及障碍因子分析. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(3): 605-614.
- [28] 鲍青青, 刘胜峰. 喀斯特旅游地生态安全动态评价与障碍因子分析——以桂林为例. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 407-414.
- [29] 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.
- [30] Wu Y Z, Zhang T C, Zhang H, Pan T, Ni X L, Grydehøj A, Zhang J M. Factors influencing the ecological security of island cities: a neighborhood-scale study of Zhoushan Island, China. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102029.
- [31] 杨娟, 蔡永立, 李静, 张捷, 龚云丽, 王亮. 崇明岛生态风险源分析及其防范对策研究. *长江流域资源与环境*, 2007, (5): 615-619.
- [32] 丁依婷, 伍长南. 夜光藻赤潮发生视角下平潭岛近岸海域生态安全与旅游经济协同发展评价研究. *海洋通报*, 2023, 42(4): 418-429.
- [33] 余慈衍, 王柳柱, 赵晟, 桂峰. 基于 MSPA 和 MCR 模型的舟山岛生态安全格局构建及优化. *海洋通报*, 2023, 42(1): 102-111.
- [34] 高升, 孙会荟, 曹广喜, 李静, 林晗, 洪滔. 国东南沿海平潭岛生态安全动态评价. *应用海洋学学报*, 2018, 37(1): 94-101.
- [35] 周彬, 钟林生, 陈田, 周睿. 基于变权模型的舟山群岛生态安全预警. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1854-1862.
- [36] 戴文远, 黄华富, 黄万里, 毋鑫海, 黄剑彬. 海岛生态脆弱区景观生态安全时空分异特征——以福建海坛岛为例. *生态科学*, 2017, 36(4): 152-159.
- [37] 王思明, 杨红, 王春峰. 基于遥感的崇明三岛景观格局变化研究及生态安全评估. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2025, 46(2): 136-146.
- [38] 孙会荟, 高升, 曹广喜. 快速开发背景下海岛的生态安全评价——以平潭岛为例. *应用海洋学学报*, 2018, 37(4): 560-567.
- [39] 周彬, 虞虎, 钟林生, 陈田. 普陀山岛旅游生态安全发展趋势预测. *生态学报*, 2016, 36(23): 7792-7803.
- [40] 李坦, 陈天宇, 米锋, 马龙波. 基于变权理论和 DPSIRM 的中国森林生态安全评价. *中国环境科学*, 2021, 41(5): 2411-2422.
- [41] 陈玥. 基于灰色系统理论和云模型的反精确洪水灾害分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [42] Han Y, Tang C C, Zeng R. Review of tourism ecological security from the perspective of ecological civilization construction. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(4): DOI:10.5814/j.issn.1674-764x.2022.04.018.
- [43] 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.
- [44] 周彬, 赵宽, 钟林生, 陈田, 虞虎. 舟山群岛生态系统健康与旅游经济协调发展评价. *生态学报*, 2015, 35(10): 3437-3446.
- [45] 蒋涤非, 宋杰. 城市生态可持续性的内涵及其支持系统评价指标体系研究. *生态环境学报*, 2012, 21(2): 273-278.
- [46] 郁亚娟, 郭怀成, 刘永, 姜玉梅, 李艳秋, 黄凯. 城市病诊断与城市生态系统健康评价. *生态学报*, 2008, (4): 1736-1747.
- [47] 周彬. 海岛旅游开发模式与生态健康评价: 以舟山群岛为例. 杭州: 浙江大学出版社, 2017.
- [48] 徐少葵, 左逸帆, 章牧. 基于模糊物元模型的中国旅游生态安全评价及障碍因子诊断研究. *地理科学*, 2021, 41(1): 33-43.
- [49] 李梦程, 李世泰, 王成新, 秦伟山, 孙剑锋. 中国海岛型旅游目的地的生态安全综合评价与障碍因素研究. *海洋科学*, 2020, 44(5): 76-86.
- [50] 肖艳. 基于 PSR 模型的涠洲岛 2010—2019 年生态安全演变评价. *测绘与空间地理信息*, 2023, 46(7): 48-53.
- [51] 方娜, 游清徽, 刘玲玲, 李菊媛, 卢成芳, 张琰, 杨涛, 余紫萍, 吕泽兰, 阳文静. 基于云模型的鄱阳湖秋季周边湿地水体富营养化评价. *生态学报*, 2019, 39(17): 6314-6321.
- [52] 王雁凌, 张雪佼, 阎敬民. 基于变权灰色云模型的风电场并网技术性综合评价. *电网技术*, 2013, 37(12): 3546-3551.
- [53] 程研, 关颖慧, 吴秀芹. 基于土地利用变化的喀斯特陷盆地景观格局演变与生态安全评价. *生态学报*, 2023, 43(22): 9471-9485.
- [54] 张银花, 温娜, 尚艳春. 基于 PSR 模型的鄂尔多斯草原生态安全评价研究. *环境与发展*, 2024, 36(5): 15-23.
- [55] 陈哲, 张春红, 温庆忠. 云南高原湿地生态安全评价及其影响因素分析. *湿地科学*, 2025, 23(1): 22-32.
- [56] 曹秉帅, 徐德琳, 窦华山, 庞博, 敖文, 顾羊羊, 单楠, 王文林, 刘波, 邹长新. 北方寒冷干旱地区内陆湖泊生态安全评价指标体系研究——以呼伦湖为例. *生态学报*, 2021, 41(8): 2996-3006.
- [57] Tang C C, Han Y, Jiang L. Ecological security evaluation and early warning of ski tourism destinations. *Journal of Geographical Sciences*, 2025, 35(9): 1953-1978.
- [58] 魏丽蓉, 程占红, 石辉, 张玉尧, 王紫彦, 牛莉芹. 黄河流域旅游生态安全的演化特征和影响因素分析——基于社会网络分析视角. *干旱区地理*, 2025, 48(6): 1-14.