

DOI: 10.5846/stxb201510232147

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.

Zhou B, Yu H, Zhong L S, Chen T. Developmental trend forecasting of tourism ecological security trends: the case of Mount Putuo Island. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7792-7803.

普陀山岛旅游生态安全发展趋势预测

周 彬^{1,2}, 虞 虎², 钟林生^{2,*}, 陈 田²

1 宁波大学旅游系, 宁波 315211

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 科学地预测海岛目的地旅游生态安全发展趋势, 对促进海岛旅游经济和生态环境协调发展具有重要的理论意义和实践价值。基于可持续发展的视角, 建立了由承载力-支持力-吸引力-延续力和发展力(CSAED模型)子系统构成的普陀山旅游生态安全指标体系, 并在灰色系统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。研究表明: (1) 和灰色系统GM(1,1)模型相比, RBF神经网络模型的Pearson相关系数和误差均方根值更优, 可更精确地拟合普陀山岛旅游生态安全发展趋势; (2) 2015—2020年, 普陀山岛旅游生态安全指数的RBF神经网络模型预测结果由0.7017增加至0.8135, 安全等级由比较安全上升至非常安全。研究结果可为维护普陀山岛旅游生态安全提供决策依据。

关键词: 旅游生态安全; 预测; RBF神经网络模型; 灰色GM(1,1)预测模型; 普陀山岛

Developmental trend forecasting of tourism ecological security trends: the case of Mount Putuo Island

ZHOU Bin^{1,2}, YU Hu², ZHONG Linsheng^{2,*}, CHEN Tian²

1 Tourism Department, Ningbo University, Ningbo 315211, China

2 Institute of Geographical Science and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The study of tourism ecological security is a core problem in the research of sustainable tourism development. It has important theoretical significance and practical value for coordinated development of island tourism economy and the ecological environment. It can be used to scientifically predict island destination development trends of tourism ecological security. Tourism destination can be regarded as an organism with a complex ecosystem. To our knowledge, once the function is disordered, the destination must be considered threatened. The purpose of this paper was to construct a tourism ecological safety index system based on the five subsystems, including “Carrying Capability”, “Supporting Capability”, “Attraction Capability”, “Evolution Capability”, and “Developing Capability” (Known as the CSAED model). Based on the sustainable development perspective, and the comprehensive, dynamic principle; this paper uses Mount Putuo Island in Zhejiang Province as an example, and constructs a tourism ecological safety index system based on the subsystems of carrying capacity, attraction capability, evolution capability, and development capability (CSAED model). The paper used the Grey system GM(1,1) model and the radial basis function (RBF) neural network model to forecast tourism ecological safety in Mount Putuo Island. The results showed that: (1) both the Pearson correlation coefficient for the RBF neural network and the root mean squared error were better than the Grey System GM(1,1) model. They also exhibited a better linear fit and a higher precision of prediction. This paper used Grey Relational Analysis to select the main driving factors;

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301141); 宁波大学区域经济社会发展研究院海洋专项研究项目(HYS1205)

收稿日期: 2015-10-23; **修订日期:** 2016-06-14

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

and used the results of linear and nonlinear analysis to build equations for trend extrapolation. In addition, based on the results of principal component analysis, the RBF neural network model appeared to provide a new research area for tourism destination ecological security. One of the key issues was that the tourism ecological security situation of Mount Putuo Island became better, because the index of the RBF model from 2005 to 2014 predicted results from 0.3568 to 0.6475. It appeared that the security level increased the sensitivity level, critical level, and the general level. Additionally, the index of the RBF model from 2015 to 2020 predicted results were from 0.7010 to 0.8135, the security level increased from the relatively safe grade to very safe grade. However, it is well known that the ecological system on the island will be influenced by several factors, including natural, social, and economic, among others. In terms of Mount Putuo Island, during the period of the forecast, it may be affected by typhoons, which may affect the vulnerability of the tourism industry. As such, it may lead to deviation from forecasted results. In short, it is suggested that the perspective of natural ecosystems be considered in future research, which would help to construct a better tourism ecological security index system through better mathematical algorithms to enhance the progress of a RBF neural network model. Consequently, the results could provide critical suggestions to scientifically protect tourism ecological security in Mount Putuo Island.

Key Words: tourism ecological security; forecast; RBF model; GM (1,1) model; Mount Putuo Island

当前,以海洋经济为主导的蓝色经济正在成为推动国家和区域发展的强大引擎^[1]。海岛旅游作为海洋经济的重要组成部分,呈现出蓬勃的发展生机^[2]。然而,海岛生态系统具有孤立性、脆弱性以及生物结构简单、环境承载力低等特点,任何对海岛生态系统的干扰都可能影响其稳定性。伴随着海岛旅游的快速发展,很多海岛成为了著名的旅游地,然而海岛旅游生态安全维护措施却相对薄弱,极易导致近海陆地植被减少、土壤侵蚀、海水富营养化等生态环境问题,使其生态旅游服务功能下降,威胁海岛旅游的可持续发展^[3-4]。因而,在海岛旅游发展过程中,如何维护海岛目的地生态系统结构和功能的完整性,改善其组织力、恢复力和活力,提升生态服务功能,对于提升其旅游生态安全水平颇为重要。

生态安全研究可为维护区域生态安全,实现社会、经济和生态环境可持续发展提供理论依据。当前,国内外生态安全研究的内容主要包括生态安全起源、生态安全基础理论、生态安全(风险)评价、生态安全预警和生态安全调控等领域^[5]。其中,生态安全基础理论研究领域主要涉及生态安全的概念、功能等内容^[6-9];生态安全评价研究主要涉及评价指标体系构建^[10]、评价标准制定^[11]、评价方法探索^[12]、评价模型构建^[13];生态安全预警研究内容包括预警理论^[14]、预警体系^[15]、预警方法^[16]与模型^[17]、预警技术^[18]等内容。作为学术前沿问题的旅游生态安全研究也受到了学界关注。从研究内容来看,学者们就旅游生态安全的影响因素^[19]、影响机理^[20]和动力机制^[21]、旅游生态安全评价^[22]及其时空格局^[23]、旅游生态安全的预警系统和预警机制^[24-25]与维护路径^[26]等内容开展了研究。从研究方法来看,生态足迹法^[27-28]、系统动力学方法^[29]、层次分析法和德尔菲法^[30]以及社会科学研究中的扎根理论方法^[31]等均出现在旅游生态安全文献之中。在旅游生态安全指标体系构建方面,现有文献主要遵循下列思路:(1)根据复合生态系统理论,建立基于经济-环境-社会子系统的评价体系^[23];(2)根据 Rapport 的活力-组织力-恢复力(VOR)理论^[32],结合旅游地复合生态系统的特征,构建基于活力、组织结构、恢复力、服务功能和旅游社区的指标体系^[4];(3)根据压力-状态-响应(PSR)框架模型^[33],筛选影响旅游地生态安全的指标,并按照 PSR 框架模型与其子系统的逻辑关系构建指标体系^[34];(4)从可持续发展角度,探究制约可持续旅游发展的因素,建立旅游生态安全指标体系^[35];(5)基于旅游地生态环境管理的视角,利用结构方程模型构建由制度环境、监管与建设行为、干扰行为以及安全状态构成的旅游生态安全 IRDS 概念模型及其测评指标体系^[20]。综合国内外相关研究文献可以发现:近年来,生态安全研究已构建和发展了相对完整的理论基础和研究体系,聚焦了地理学、环境科学和生态学等多学科的知识基础和热点问题,形成了生态安全概念和内涵、评价指标和评价方法等重点研究领域,为旅游生态安全研究奠定了良好的方法论基础。随着人们对旅游地生态系统认识的不断深入,学界对旅游生态安全研究的关注程度日益上升,

其研究尺度不断拓展,研究视角持续创新。

旅游生态安全是确保旅游地生态系统正常发挥服务功能的基础。本研究将旅游地生态系统的功能归纳为承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力 5 个方面,并从可持续发展的视角构建了旅游生态安全指标体系,综合使用 RBF 神经网络模型、灰色系统 GM(1, 1) 模型、主成分分析和灰色关联分析等模型与方法开展普陀山岛旅游生态安全发展态势预测研究,以期探索旅游生态安全研究的新技术和新方法,丰富和完善旅游生态安全研究内容,并为案例地旅游生态安全管理提供科学依据。

1 研究区概况

普陀山岛位于舟山群岛东部海域,地处 $21^{\circ}30'—123^{\circ}25'N$ 和 $29^{\circ}32'—31^{\circ}04'E$ 之间,陆域面积 11.7 km^2 ,海岸线长 32.7 km ,隶属于舟山市普陀区,由普陀山、洛迦山、南山、小山洞、豁沙山、小洛迦山等岛屿组成。普陀山岛素有“海天佛国”的美誉,是我国著名的四大佛教名山之一,也是全国首批国家级风景名胜区和国家 5A 级旅游景区,主要由南天门、普济寺、后山、西天、法雨寺、佛顶山、梵音洞、紫竹林、洛迦山等景点构成。随着旅游经济的快速发展,普陀山旅游环境容量日趋饱和、旅游废弃物排放量逐渐增加、近海水质进一步恶化等问题威胁着普陀山岛旅游生态安全。

2 研究方法

2.1 指标体系构建

2.1.1 构建依据

旅游生态安全是指在一定时空范围内,通过对旅游资源的合理开发和旅游生态环境的有效管理,使旅游地生态系统具有结构的相对稳定性和功能的多样性,为旅游发展提供丰富的物质资源和和谐的环境空间,维持旅游地自然-社会-经济复合生态系统协调发展^[22]。旅游地生态系统既要具备自身结构和功能的完整性,更要在确保承载力和支持力的前提下,具有相应的吸引力和延续力,从而发挥旅游地自然-经济-社会复合生态系统的可持续发展能力。旅游地可视为具有复合生态系统功能的有机体,若其功能一旦紊乱,则其生态安全受到了威胁。在参考相关研究^[36]的基础上,本文将旅游地功能概括为承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力 5 个方面,即 CSAED 模型。(1)承载力是旅游地自然生态系统和游客体验出现不可接受变化之前的环境状态^[37],表现为其对旅游经济和社会发展的环境承载功能,可为确保生态系统安全运行、促进旅游经济持续发展提供生态保障。(2)支持力反映了物质资源、能源和基础设施等要素对旅游地复合生态系统的支持程度,也是这些要素在维护旅游生态安全过程中重要性的体现。例如,旅游地的土地资源不但为旅游活动提供基本场所,还是旅游经济发展所依赖的重要资源要素。(3)吸引力来源于旅游吸引物^[38]的概念,旅游地生态系统的吸引力是其区别于其它类型生态系统的核心服务功能,表现为激发游客旅游动机,吸引游客离开客源地达到目的地并给旅游者带来积极效益和特征的能力^[39]。(4)延续力是旅游地复合生态系统功能和活力的体现,也是促进旅游地生态系统可持续演进的基础,主要表现为旅游地人口的内涵式增长和经济的高效公平发展。前者表现为承载力范围内的人口规模扩大、质量提升以及劳动力供求均衡,后者主要体现在经济活动对旅游目的地发展的拉动、资源配置过程中经济效率的提升等。(5)发展力通过旅游公共管理制度完善、产业融合、业态创新以及资源整合等途径,获得旅游地复合生态系统经济总量的增加和质量的提升,实现旅游地生态系统的良性循环,推动其向更加安全的方向发展。CSAED 模型体现了旅游地生态系统从生态环境承载力基础到资源、能源与基础设施支撑再到旅游可持续发展的系统性特征。同以往表征旅游生态安全的框架模型相比较,该模型更注重反映旅游地生态系统的功能。故此,本文将旅游地视为一个具有承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力等功能,既互相关联又具有各自特点的自然-社会-经济复合生态系统。

2.1.2 指标体系构建

本文通过旅游地复合生态系统功能的 CSAED 模型分析,基于可持续发展的视角,按照以下原则构建普陀

山岛旅游生态安全指标体系(表1):①力争全面反映旅游地复合生态系统的可持续性以及子系统的功能特征和相互联系;②充分考虑旅游地复合生态系统安全的动态性特征,便于对其进行时间序列的动态分析和发展态势预测;③尽可能地使构建的指标体系具有普适性,以便进行不同海岛目的地旅游生态安全的横向比较;④兼顾数据的可获得性和指标的前瞻性,为将来进一步完善旅游生态安全指标体系奠定基础。

表1 基于 CSAED 模型的普陀山岛旅游生态安全指标体系

Table 1 Tourism ecological security index system of Mount Putuo Island based on CSAED model

子系统层 Subsystem layer	要素层 Element layer	因子层 Factors layer	指标权重 Weight
承载力子系统 Carrying capacity subsystem	海岛生态环境承载力	X_1 海岛空气质量优良率/%	0.0270
		X_2 海岛环境噪声平均生效等级/dB	0.0384
		X_3 近海一、二类海水水质标准海域面积比例/%	0.0306
		X_4 海岛生活垃圾集中处理率/%	0.0300
		X_5 海岛生活污水处理率/%	0.0468
	海岛生态系统组织结构	X_6 林地斑块面积比/%	0.0263
		X_7 裸岩斑块面积比/%	0.0321
		X_8 水域斑块面积比/%	0.0325
		X_9 沙滩斑块面积比/%	0.0295
支持力子系统 Supporting capability	海岛资源与能源	X_{10} 人均耕地面积/(hm^2 /人)	0.0322
		X_{11} 人均林地面积/(hm^2 /人)	0.0342
		X_{12} 清洁能源比例/%	0.0486
	海岛旅游交通	X_{13} 道路面积比例/%	0.0298
		X_{14} 汽车拥有量/辆	0.0311
吸引力子系统 Attractive capability subsystem	海岛旅游总人数	X_{15} 游客接待量/万人次	0.0338
		X_{16} 游客数量增长率/%	0.0279
		X_{17} 游客接待量与人口数量比/%	0.0363
		X_{18} 境外游客接待量/万人次	0.0295
	海岛旅游接待能力	X_{19} 旅游从业人数/人	0.0268
		X_{20} 旅行社个数/个	0.0430
		X_{21} 宾馆个数/个	0.0322
		X_{22} 游客床位数/个	0.0308
		X_{23} 人口总数/人	0.0317
		X_{24} 非农业人口比例/%	0.0338
延续力子系统 Evolutional capability subsystem	海岛人口发展	X_{25} 经济总收入/亿元	0.0343
		X_{26} 城镇化率/%	0.0337
	海岛经济发展	X_{27} 门票收入/万元	0.0352
发展力子系统 Developing capability subsystem	海岛旅游经济	X_{28} 住宿和餐饮收入/万元	0.0340
		X_{29} 门票收入增长率/%	0.0341
	海岛旅游经济潜力	X_{30} 住宿和餐饮收入增长率/%	0.0336

指标 X_6 — X_9 的原始数据通过 2005—2014 年普陀山岛遥感影像提取获得,其余指标数据由普陀山风景区管委会提供

(1) 承载力子系统 健康的海岛旅游地生态系统须要以海岛生态环境承载力和海岛生态系统组织结构两个要素的不断完善为前提。海岛生态环境承载力用海岛空气质量优良率、海岛环境噪声平均生效等级、近海一、二类海水水质标准海域面积比例、海岛生活垃圾集中处理率、海岛生活污水处理率 5 个指标衡量;海岛生态系统组织结构用林地斑块面积比、裸岩斑块面积比、水域斑块面积比和沙滩斑块面积比 4 个指标表征。

(2) 支持力子系统 海岛旅游地通过自然资源 and 能源的高效开发和循环利用,为其复合生态系统安全运行提供支撑和保障,本文选择人均耕地面积、人均林地面积和清洁能源比例 3 个指标反映资源和能源要素层。交通的可进入性、网络化程度和交通工具对拓展客源市场、优化旅游线路产生较大影响,故而采用道路面积比

例和汽车拥有量衡量海岛旅游交通要素层。

(3) 吸引力子系统 旅游地生态系统吸引力的提升主要体现在旅游环境容量约束下的游客接待量增加和旅游接待能力改善两个方面,前者用游客接待量、游客数量增长率、游客接待量与人口数量比、境外游客接待量评价,后者用旅游从业人数、旅游社个数、宾馆个数和游客床位数表征。

(4) 延续力子系统 人口和经济发展可以调控旅游地生态系统安全状态。旅游地人口发展不仅表现为人口数量的增加,还体现在人口就业结构的优化,本研究用人口总数和非农业人口比例来测算这一过程。旅游地经济发展则是体现在生态承载力阈值范围内经济的总量增加和质量提升,用经济总收入和城镇化率 2 个指标评价。

(5) 发展力子系统 持续增长的发展力能够实现旅游地复合生态系统经济效益的可获得性,旅游经济的生态效益和旅游环境影响的社会分担,并推动海岛旅游地生态系统向更高水平演进。本研究采用海岛旅游经济和海岛旅游经济潜力两个要素层衡量发展力子系统,前者用门票收入和住宿餐饮收入表征,后者则用其增长率,即门票收入增长率、住宿和餐饮收入增长率评价。

2.2 RBF 神经网络模型

2.2.1 模型原理

径向基函数 (Radial Basis Function, 即 RBF) 是 J Moody 和 C Darken 于 20 世纪 80 年代末提出的一种以函数逼近理论为基础的性能良好的前馈式人工神经网络^[40],具有能收敛到全局最优点、训练速度快、处理非线性关系等特点^[41],对提高预测的准确性具有重要意义。RBF 由输入层、隐含层和输出层三层网络结构组成(图 1),其运行原理为:隐含层节点通过基函数执行一种非线性变化,将输入空间映射到一个新的空间,输出层则在这个新的空间实现线性加权组合^[40]。高斯函数是 RBF 神经网络最常用的径向基函数,表达式为:

$$R_i(x) = e^{-\frac{\|x - C_i\|^2}{2\sigma_i^2}}, i = 1, 2, \dots, N_r \quad (1)$$

式中: $R_i(x)$ 为隐含层第 i 个单元的输出, x 为 N 维输入向量, C_i 为隐含层第 i 个单元高斯函数的中心点, σ 为第 i 个隐节点的归一化参数; N_r 为隐含层节点数。

2.2.2 RBF 网络学习算法

RBF 网络分为非监督学习和监督学习两个步骤。非监督学习主要采用 K-means 聚类法对训练样本的输入量进行聚类,找出聚类中心 C_i 及 σ_i 参数,然后进入监督学习阶段。一旦 C_i 和 σ_i 确定后,RBF 网络从输入到输出即组成了一个线性方程组,故而监督学习阶段运用最小二乘法求得输出权重 W_j :

(1) 用最小和最大规范化方法,使其属性归一到网络的处理范围;

(2) 用径向基函数求隐含层的输出值 Y_{hi} ;

(3) 计算输出层第 j 个神经元的输出值 Y_j

$$Y_j = f\left(\sum_{i=1}^n W_{ji} Y_{hi}\right) \quad (2)$$

式中, Y_{hi} 为隐含层第 i 个神经元的输出值; W_{ji} 为隐含层第 i 个神经元至输出层第 j 个神经元的权重;函数 f 取 Sigmoid 形式,即:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x}{x_0}}} \quad (3)$$

(4) 计算输入层误差 ΔY_j :

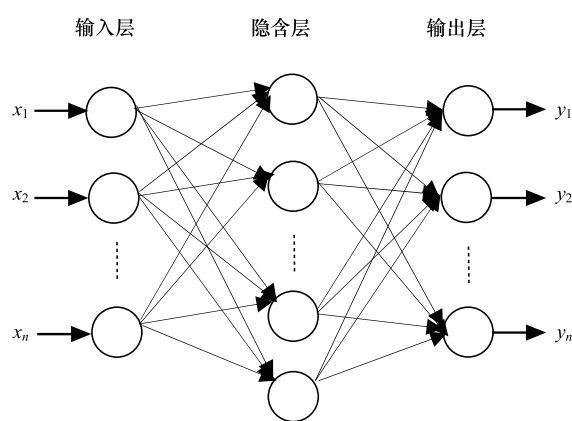


图 1 RBF 神经网络模型结构

Fig.1 Model structure of RBF neural network

$$\Delta Y_j = Y_j(1 - Y_j)(d_j - Y_j) \quad (4)$$

(5) 调整权重系数 ΔW_j :

$$\Delta W = \alpha \cdot \Delta Y_j(1 - Y_j)(d_j - Y_j), W'_j = W_j + \Delta W \quad (5)$$

式中, W'_j 为调整后的权重, α 为学习速率。

2.3 模型学习效果检验

为了科学地预测普陀山岛旅游生态安全发展趋势, 还需要验证模型的学习效果, 本文选取 Pearson 相关系数 R 和误差均方根 $RMSE$ 对第 j 个神经元输出值进行 RBF 学习结果检验, 其公式为:

$$R = \frac{\sum_{t=1}^T (y_{jt} - \bar{y}_{jt})(Y_{jt} - \bar{Y}_{jt})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (y_{jt} - \bar{y}_{jt})^2 (Y_{jt} - \bar{Y}_{jt})^2}} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (y_{jt} - Y_{jt})^2}{T}} \quad (7)$$

式中, Y_{jt} 、 y_{jt} 分别为第 t 个样本的第 j 个神经元输出值和实际值; $\bar{Y}_{jt}$ 为 Y_{jt} 的平均值; T 为样本总数。 R 值越大, 表明相关性越高, 即模型预测精度误差越小; 而 $RMSE$ 值越小则表明模型预测精度误差越小。

2.4 灰色系统 GM(1, 1) 预测模型

灰色系统 GM(1, 1) 预测模型是灰色数列预测中常见的模型之一, 它是以指数形式为基础, 以一次累加数据作为原始观测值来准确确定积分常数, 将时间序列转化为微分方程, 建立发展变化模型并进行决策和预测, 其数学表达式为^[42]:

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (8)$$

式中, $x^{(1)}(t)$ 是 $x^{(0)}(t)$ 的一次累加值, 且 $\hat{x}^{(0)}(t+1) = \hat{x}^{(1)}(t+1) - \hat{x}^{(1)}(t)$, t 为时间序列, u 和 a 为模型参数。

2.5 灰色关联分析

本文使用灰色关联分析法遴选影响普陀山岛旅游生态安全的主要驱动因子。由于灰色关联分析是表征系统中各个元素之间关联程度和相似程度的方法, 能够有效地弥补多元回归分析和多元相关分析等方法的不足, 因而是一种研究因子关联度的重要方法^[43]。

(1) 制定参考数据列(母函数时间数列)和比较数列, 分别记为 x_0, x_i :

$$x_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$$

$$x_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}, i = 1, 2, \dots, m$$

(2) 计算关联系数 ξ , 公式为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (9)$$

式中, $\xi(k)$ 为 k 时刻两比较数列的相对差值, 即 x_i 在 k 时刻对 x_0 的关联系数, ζ 为分辨系数, $0 < \zeta < 1$, 一般情况下取 $\zeta = 0.5$ 。在本研究中, 参考数据列 x_0 、比较数列 x_i 分别为普陀山岛旅游生态安全指数值和指标体系标准化后的数值。

(3) 计算关联度

关联系数 ξ 表示各个时刻比较数列和参考数列之间的关联程度, 由于其数值较多, 且较为分散, 不便比较, 因而需要将各个时刻的关联系数集中为一个值, 本文采用计算各个时段的平均值来计算关联度, 公式为:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (10)$$

式中, r_i 为研究时段 N 内比较序列 x_i 和参考数列 x_0 的关联度, 即普陀山岛旅游生态安全指标体系中各因子的灰色关联度。

2.6 安全等级划分

根据旅游生态安全指数值划分安全等级可为提出科学的旅游生态安全维护路径奠定基础。本研究借鉴省域旅游生态安全等级划分标准^[23], 按照普陀山岛旅游生态安全指数值大小将旅游生态安全划分为 7 个等级(表 2)。

表 2 普陀山岛旅游生态安全等级划分标准

Table 2 Evaluation criterion of cultivated tourism ecological security in Mount Putuo Island

生态安全指数 Ecological Security Indexes	$0 < S \leq 0.3$	$0.3 < S \leq 0.4$	$0.4 < S \leq 0.5$	$0.5 < S \leq 0.6$	$0.6 < S \leq 0.7$	$0.7 < S \leq 0.8$	$0.8 < S \leq 1.0$
生态安全状态 Ecological Security Status	恶化等级	风险等级	敏感等级	临界安全	一般安全	比较安全	非常安全

3 研究结果与分析

3.1 灰色系统 GM(1,1) 模型预测结果

本文采用均方差法^[44]计算普陀山岛旅游生态安全指标体系权重(表 1), 使用极差法将原始数据进行标准化, 运用多目标线性加权函数模型对表 1 中的各指标进行综合, 得到 2000—2014 年普陀山岛旅游生态安全指数实际值(表 3)。对该结果进行累加处理, 解出灰色系统 GM(1, 1) 预测模型重要参数 a 和 u 的数值, 继而得到普陀山岛旅游生态安全指数累加值的灰色系统 GM(1, 1) 预测模型方程和普陀山岛旅游生态安全指数预测值(公式(11)和表 3):

$$x(t+1) = 7.5381e^{0.0524t} - 7.1813 \quad (11)$$

表 3 基于灰色系统 GM(1, 1) 模型的普陀山岛旅游生态安全指数预测值

Table 3 List of prediction values by the GM (1, 1) model of the tourism ecological security in Mount Putuo Island

年份 Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
安全指数实际值 Actual value of security index	0.3568	0.4108	0.4502	0.4636	0.4651	0.4671	0.5221	0.5376	0.5810	0.6475
实际累加值 Actual cumulative value	0.3568	0.7676	1.2178	1.6814	2.1465	2.6136	3.1357	3.6733	4.2543	4.9018
预测累加值 Predictive cumulative value	0.3568	0.7623	1.1897	1.6400	2.1146	2.6147	3.1417	3.6970	4.2822	4.8989
安全指数预测值 Predictive value of security index	0.3568	0.4055	0.4273	0.4503	0.4746	0.5001	0.527	0.5553	0.5852	0.6167

3.2 RBF 神经网络模型预测结果

3.2.1 主要驱动因子遴选

依据表 3 中的普陀山岛旅游生态安全指数实际值, 依据公式 7 和 8 对指标体系中各因子做灰色关联分析。结果如表 4 所示, 计算结果显示: 普陀山岛旅游生态安全指标体系各因子灰色关联度位于 0.3928—0.6354 之间, 其数值大小排序为: $X_4 > X_{21} > X_{24} > X_{23} > X_{26} > X_{17} > X_{25} > X_{22} > X_{15} > X_{27} > X_3 > X_{14} > X_{30} > X_{28} > X_{19} > X_7 > X_{29} > X_8 > X_{16} > X_{10} > X_6 > X_{11} > X_1 > X_{20} > X_5 > X_2 > X_{12} > X_9 > X_{18} > X_{13}$ 。本研究选取指标总数的前 1/3, 即关联度数值大于 0.57 的 10 个指标作为普陀山岛旅游生态安全的主要驱动因子。

表 4 普陀山岛旅游生态安全指标体系各因子的灰色关联度

Table 4 The influence factors gray correlation degree of the tourism ecological security of in Mount Putuo Island

影响因子 Influence factors	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}	X_{15}
关联度 Grey relativity	0.4862	0.4534	0.5656	0.6354	0.4696	0.4937	0.526	0.5115	0.4079	0.5025	0.4908	0.4203	0.3928	0.5647	0.5763
影响因子 Influence factors	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}	X_{28}	X_{29}	X_{30}
关联度 Grey relativity	0.5107	0.5951	0.4034	0.529	0.4853	0.6148	0.5876	0.5998	0.6075	0.5949	0.5981	0.5753	0.5544	0.5213	0.5595

3.2.2 主成分分析结果

运用 SPSS 19.0 软件中的因子分析模块对普陀山岛旅游生态安全主要驱动因子提取主成分,以达到降维和消除因子共线性的目的,共提取 $PC1$ 到 $PC9$ 共 9 个主成分,其累计贡献率为 100%,分值见表 5。

表 5 普陀山岛旅游生态安全主要驱动因子的主成分得分值

Table 5 The principal component values of the Influence factors of the tourism ecological security of in Mount Putuo Island

年份 Year	$PC1$	$PC2$	$PC3$	$PC4$	$PC5$	$PC6$	$PC7$	$PC8$	$PC9$
2005	-0.3558	0.5771	-0.0493	0.8877	-0.0914	0.1633	-0.6672	1.4033	-0.2272
2006	-0.1365	0.9844	0.1628	0.1600	-0.8698	-0.0011	0.8146	-0.1957	1.3911
2007	-0.9806	0.4402	0.6973	-0.6717	1.5834	1.2544	0.8535	-0.6188	-0.9030
2008	-0.4917	-0.0314	-0.3620	0.2032	0.4739	0.0156	-0.7038	-0.3304	-0.0211
2009	-0.2808	-0.9396	-0.0062	0.1438	0.9158	-0.0409	0.9552	1.6429	1.2857
2010	0.2435	-0.6095	1.6395	0.0222	0.0283	-0.5067	0.1502	-0.0300	-0.6838
2011	0.5091	0.5252	-0.1993	-2.5233	-0.5444	-0.2586	-0.6798	0.5723	0.0744
2012	0.8278	-0.0397	1.3696	0.6221	-0.3757	1.5789	-0.8807	0.0859	1.3165
2013	1.2044	-0.4761	-0.9651	0.2240	-0.2922	0.7763	1.4206	-0.6341	-0.8652
2014	1.4607	1.5695	-0.2872	0.9321	1.1721	-0.9814	-0.2627	0.1045	-0.3675

3.2.3 主要驱动因子预测

使用 SPSS 19.0 中的图形功能和曲线估计功能对普陀山岛旅游生态安全 10 个主要驱动因子的原始数值和时间序列进行线性分析或非线性分析,并构建最优拟合方程(表 6),使用这些方程预测 2015—2020 年的主要驱动因子变化状况,再利用主成分得分系数矩阵计算得出各主成分得分预测值的归一化结果(表 7)。

表 6 普陀山岛旅游生态安全主要驱动因子拟合方程

Table 6 The main driving factors of the tourism ecological security and their fitted equations in Mount Putuo Island

指标 Index	回归方程 Regression equation	R^2	F	Sig
X_{24}	$Y = 56.453e^{0.003x}$	0.879	58.019	0.000
X_4	$Y = 63.524e^{0.011x}$	0.978	356.819	0.000
X_{23}	$Y = 517.994x + 7817.533$	0.875	55.955	0.000
X_{21}	$Y = 0.061x^2 - .358x + 40.933$	0.801	17.070	0.004
X_{26}	$Y = 0.551x + 36.901$	0.989	688.188	0.000
X_{22}	$Y = 87.008x^2 - 81.471x + 7504.5$	0.950	65.932	0.000
X_{17}	$Y = 285.427e^{0.059x}$	0.862	49.976	0.000
X_{25}	$Y = 3.902x + 5.349$	0.977	347.528	0.000
X_{15}	$Y = 0.321x^2 + 41.009x + 197.891$	0.984	217.466	0.000
X_{27}	$Y = 17954.762x^{0.623}$	0.950	151.082	0.000

3.2.4 RBF 神经网络计算

本研究把从普陀山岛旅游生态安全主要驱动因子中提取的主成分分值作为 RBF 神经网络模型的输入样本,将 AR(1) 模型预测的 2005—2014 年生态安全指数残差为输出样本,节点个数分别设置为 9 和 1,且输入和输出样本皆进行归一化处理,选取 2015—2020 年数据为检测样本,其余 2005—2014 年份为训练样本,而后

用 Matlab 软件中的 Newrb 功能对网络进行训练,而隐含节点数和扩展常数最优值的获得则是通过反复试验方式,其结果分别为 10 和 0.5,最终模型训练误差为 $5.5852e^{-31}$,用训练好的模型对 2015—2020 年的残差进行预测,得出普陀山岛 2015—2020 年旅游生态安全指数的预测结果(表 8)。

表 7 样本归一化结果

Table 7 Normalized data of samples

年份 Year	生态安全指数 Ecological safety index	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
2005	0.3568	0.0000	0.6938	0.6164	0.0140	0.9707	0.4326	0.5373	0.5361	0.4690
2006	0.4108	0.0370	0.7008	0.8002	0.1575	0.8074	0.6409	0.0000	0.7254	0.7482
2007	0.4502	0.0629	0.6982	0.6042	0.7850	0.0042	0.3231	0.3559	0.9566	0.0000
2008	0.4636	0.1391	0.2762	0.2793	0.0000	0.0643	0.4911	0.3804	0.0000	0.3553
2009	0.4651	0.1738	0.2824	0.2794	0.1433	0.0000	0.5228	0.6374	1.0000	0.7745
2010	0.4671	0.2615	0.2918	0.0000	1.0000	0.7763	0.8480	0.2300	0.6798	0.7981
2011	0.5221	0.3126	0.2804	1.0000	0.9824	0.1785	0.2703	0.2339	0.3434	1.0000
2012	0.5376	0.3553	0.3164	0.4390	0.8312	1.0000	0.1273	0.7929	0.4615	0.2140
2013	0.581	0.4161	0.0000	0.5347	0.0392	0.6614	0.0000	0.4352	0.9078	0.8570
2014	0.6475	0.4553	0.2354	0.9465	0.3802	0.4672	1.0000	1.0000	0.6393	0.5412
2015	0.7017	0.5105	0.1568	0.5899	0.2870	0.5377	0.5759	0.1065	0.5601	0.3146
2016	0.7241	0.5638	0.1811	0.5847	0.2605	0.5211	0.5642	0.1126	0.6074	0.3028
2017	0.7464	0.6122	0.3152	0.6357	0.4592	0.5629	0.5481	0.2875	0.7423	0.2708
2018	0.7688	0.6675	0.3441	0.6037	0.3761	0.5252	0.5159	0.2791	0.7441	0.3111
2019	0.7912	0.7237	0.3754	0.5575	0.2648	0.4772	0.4796	0.2488	0.6950	0.3664
2020	0.8135	1.0000	1.0000	0.3749	0.3310	0.3633	0.3905	0.5258	0.5161	0.8198

表 8 基于 RBF 神经网络法的普陀山岛旅游生态安全预测结果

Table 8 The forecast results of tourism ecological security based on RBF neural network in Mount Putuo Island

年份 Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
模型预测值 Predictive value of model	0.3568	0.4108	0.4502	0.4636	0.4651	0.4671	0.5221	0.5376
年份 Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
模型预测值 Predictive value of model	0.5810	0.6475	0.7017	0.7241	0.7464	0.7688	0.7912	0.8135

3.3 精度检验与趋势分析

3.3.1 模型精度检验

以普陀山岛旅游生态安全指数实际值和两个模型的预测值分别作为横轴 x 和纵轴 y , 建立直角坐标系(图 2), 每个旅游生态安全指数值均可以在图中找到相应的模型预测值。如果预测值等于实际值, 则该点落在直线 $y=x$ 上, 偏离直线 $y=x$ 越远, 则预测误差越大^[45]。从图 2 可以看出, RBF 神经网络模型的拟合结果明显优于灰色系统 GM(1, 1) 预测模型。使用 Pearson 相关系数 R (公式 6) 和误差均方根 RMSE(公式 7) 对预测精度进行检验, 结果显示: 灰色系统 GM(1, 1) 预测模型和 RBF 神经网络模型的 Pearson 相关系数 R 值及 RMSE 值分别为: 0.9745、0.9999 和 0.01792、 2.56117×10^{-5} 。再次证明 RBF 神经网络模型在普陀山岛旅游生态安全预测研究中具有更高的精度。

3.3.2 结果分析

普陀山岛旅游生态安全指数的 RBF 神经网络模型预测结果由 2005 年的 0.3568 增加至 2014 年的 0.6475, 旅游生态安全状态由风险等级逐渐改善至敏感等级、临界等级和一般安全等级。2005—2014 年, 普陀山岛旅游生态安全状况之所以逐渐改善, 是由于随着生态文明建设的持续推进, 普陀山风景名胜区管委会同舟山市各职能部门采取措施维护其海岛生态系统安全, 努力协调生态系统安全与旅游经济发展之间的关系。

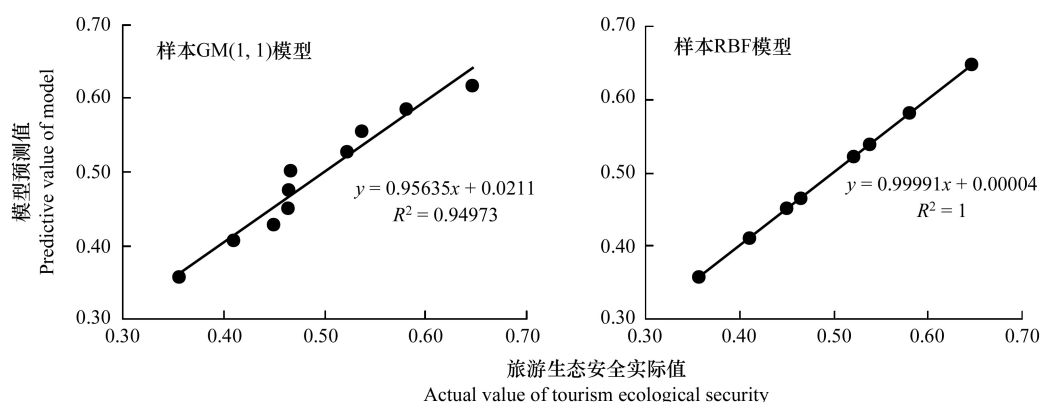


图2 普陀山岛旅游生态安全实际值与模型预测值

Fig.2 The actual value and the model predictive value of Tourism ecological security in Mount Putuo Island

从普陀山岛旅游生态系统的承载力和支持力两个子系统来看:普陀山海岛旅游发展过程中坚持保护和开发统一、永续发展的原则,确定各景点环境容量;合理安排游览活动;开发和建设同风景区容量一致的旅游接待服务设施,并严格控制其规模,严禁开发和建设与景区大气、水体、噪声环境保护相冲突的项目;适时进行评价监测区内的水质和噪声等环境质量,其空气质量优良率由 95.23% 上升至 96.38%,生活污水集中处理率由 2005 年的 61.3% 上升至 2014 的 74.3%,清洁能源比例和生活垃圾处理率接近 100%。与此同时,多种措施用于保护森林资源和野生动植物,如完善防火设施,建立防火隔离带,森林病虫害防治措施等,全岛林地面积在研究时段内保持在 91773hm² 的水平。全岛严格控制保护区内现有旅游服务规模,不得随意扩建旅游基础设施,禁止任何新建宾馆、饭店、商场等旅游服务设施侵占沙滩和水域,其沙滩斑块面积比例和道路斑块面积比例基本维持 1.80% 和 1.76% 的水平。然而,部分指标也呈现出下降趋势,如近海一、二类海水水质标准海域面积比例由 61% 将至 15%,海岛环境噪声平均生效等级由 39.1dB 上升至 44.3dB,水域斑块面积比例 3.22% 下降至 2.77%,这些指标数值的变化在一定程度上制约了普陀山岛旅游生态安全状况改善。

从吸引力和发展力延续力子系统的驱动因子来看,普陀山风景名胜区管委会在确保旅游资源质量和生态环境质量的前提下,适度拓展旅游市场规模,合理优化市场结构,努力实现环境承载力范围内的旅游经济总量持续增加。在巩固沪、浙、闽传统基础市场的基础上,适度拓展沿海地区目标市场,以宗教观光产品巩固港澳台市场,拓展东亚、东南亚市场,积极争取欧美市场。研究时段内的游客接待量从 247.3 万人次增加至 625.6 万人次,游客接待量与人口数量比由 292.9 增加至 466.1,游客床位个数也由 7225 张增加至 14893 张,门票收入由 2.13 亿元增至 7.62 亿元。延续力子系统的主要驱动因子也呈现出优化态势,人口总数由 4790 人小幅增至 4951 人,非农业人口比例由 56.91% 上升至 58.23%,经济总收入 11.63 亿增加至 44.43 亿元,城镇化率则是由 37.42% 上升至 42.12%。

2015—2020 年普陀山岛旅游生态安全指数的 RBF 神经网络模型预测结果为 0.7017、0.7241、0.7464、0.7688、0.7912、0.8135,年均增速为 3%,小于 2005—2014 年 6.85% 的平均增长率。随着普陀山景区管委会对海岛及周边海域生态环境治理和保护力度的加大,游客环保意识的持续加强,以及海岛社区生态保护的逐渐完善,2015—2020 年旅游生态安全状况将会不断改善,原因可能是:首先,舟山市将会进一步落实中央提出的“发展生态经济、推进美丽乡村建设”号召,为普陀山岛旅游地生态系统的良性循环创造了条件。其次,普陀山岛传统的自然海岛风景与佛教文化遗产资源经过 30 多年的旅游开发,新的旅游拓展空间所剩不多,开发程度已经接近上限,为了保障普陀山旅游的可持续发展,必须保留充分的空间和余地,严格保护森林、沙滩等重要的旅游资源。再者,当前普陀山岛旅游业已经进入了“积极推进经济结构调整,努力实现经济发展质量和效益的提高”的深入转型和调整时期,必须遵循绿色、低碳和循环的旅游发展理念,推进普陀山旅游从粗放式的资源消耗模式向集约型发展模式转变,旅游经济发展速度与质量之间的关系将会得到更好地协调。最

后,涉海部门也将进一步加大联合执法力度,强化海洋环境管理和监测,加强入海污染防治,完善海洋灾害预警、预报系统,制定海域防灾减灾预案,还将进一步协调旅游岸线与渔业生产岸线关系,把渔业用地与旅游用地相对分开。

4 结论与讨论

(1)为了科学地预测普陀山岛旅游生态安全发展趋势,本研究从可持续发展的角度出发,在分析旅游地复合生态系统承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力(CSAED模型)功能的基础上,构建了旅游生态安全指标体系,使用灰色关联度模型遴选主要驱动因子,利用主要驱动因子线性或非线性分析结果构建的最优拟合方程进行趋势外推,并基于趋势外推结果的主成分分析值作为输入层进行RBF神经网络模型预测,为旅游生态安全发展趋势预测研究提供了一个新的研究思路。

(2)本研究分别使用灰色系统GM(1,1)预测模型和RBF神经网络模型预测普陀山岛2005—2014年旅游生态安全趋势。结果显示:RBF神经网络模型预测结果的Pearson相关系数 R 的数值大于灰色系统GM(1,1)预测模型,其误差均方根RMSE数值小于灰色系统GM(1,1)预测模型。说明与灰色系统GM(1,1)预测模型相比较,RBF神经网络模型能够更精确地预测普陀山岛旅游生态安全发展趋势。

(3)2005—2014年普陀山岛旅游生态安全指数由0.3568增加至0.6475,旅游生态安全状态沿着风险等级、敏感等级、临界等级和一般安全等级方向演化;2015—2020年普陀山岛旅游生态安全指数将呈持续增长趋势,旅游生态安全等级由比较安全等级上升至非常安全等级。然而,海岛旅游地生态系统运行受自然、社会、经济等多种因素的影响。就普陀山岛而言,在预测期范围内可能受到台风、赤潮等灾害影响,加之旅游产业本身的脆弱性,可能导致预测结果出现偏差。

(4)本研究仍存在需要改进的地方。首先,本文从可持续发展的视角,基于旅游地复合生态系统功能的CSAED框架模型构建了普陀山岛旅游生态安全指标体系。该框架模型在旅游地复合生态系统安全研究中的适宜性还需要更多地实证研究来验证;未来还需要从自然生态系统的视角,构建更加完善的旅游生态安全指标体系。再者,尽管同灰色系统GM(1,1)预测模型比较,RBF神经网络模型在预测旅游地生态安全发展态势具有较高的精度,然而这是以普陀山岛为案例地进行研究的结果,其普适性还有待深入探讨;在将来的预测研究中,仍须要通过更精确的数学算法进一步优化RBF神经网络模型。

(5)旅游生态安全是当前旅游地理学和旅游生态研究的热点问题之一。旅游生态安全研究仍需要在理论基础、研究内容、研究方法和技术手段方面不断加强。①如何将生态学中的系统理论、等级理论、尺度理论、汇源理论和岛屿生物地理学理论等应用到旅游生态安全研究中,促进其基础理论研究朝向更加完善的方向发展。②在研究方法和技术手段上,野外调查与观测、实验方法、数学模拟与模型以及社会科学研究中的扎根理论方法、访谈研究法、德尔菲法等还需要不断深化,使旅游生态安全研究方法和手段更加科学。③在研究内容上,旅游地生态系统内涵、结构功能、稳定性、能量转化和物质循环机制;旅游活动和旅游生态安全相互作用机制和演变趋势;旅游生态安全的形成机理、影响机制、动态模拟、综合集成和决策支持等诸多问题仍需要深入探究。

参考文献(References):

- [1] 胡光宇. 蓝色经济发展的混沌条件与经济预测方法. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(8): 1134-1138.
- [2] 向宝惠, 王灵恩. 中国海洋海岛旅游发展战略探讨. 生态经济, 2012, (9): 141-145.
- [3] Hall C M. Trends in ocean and coastal tourism: the end of the last frontier?. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(9/10): 601-618.
- [4] 周彬, 钟林生, 陈田, 赵宽. 舟山群岛旅游生态健康动态评价. 地理研究, 2015, 34(2): 306-318.
- [5] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱——基于Citespace的计量分析. 生态学报, 2014, 34(13): 3693-3703.
- [6] 陈国阶. 论生态安全. 重庆环境科学, 2002, 24(3): 1-3.
- [7] 王耕, 王利, 吴伟. 区域生态安全概念及评价体系的再认识. 生态学报, 2007, 27(4): 1627-1637.

- [8] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [9] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [10] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(6): 971-981.
- [11] 蒙古军, 赵春红, 刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价——以鄂尔多斯市为例. 自然资源学报, 2011, 26(4): 578-590.
- [12] 任志远, 刘焱序. 基于价值量的区域生态安全评价方法探索——以陕北能源区为例. 地理研究, 2013, 32(10): 1771-1781.
- [13] 赵静静, 柴立和, 杜慧滨. 基于 MIEP 模型的城市生态安全评价——以宁波市为例. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2989-2995.
- [14] 傅伯杰. 区域生态环境预警的原理与方法. 资源开发与保护, 1991, 7(3): 138-141.
- [15] 游巍斌, 何东进, 覃德华, 纪志荣, 巫丽芸, 俞建安, 陈炳容, 谭勇. 世界双遗产地生态安全预警体系构建及应用——以武夷山风景名胜区为例. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1455-1467.
- [16] 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.
- [17] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警. 地理学报, 2012, 67(10): 1411-1422.
- [18] 王耕, 刘秋波, 丁晓静. 基于系统动力学的辽宁省生态安全预警研究. 环境科学与管理, 2013, 38(2): 144-149.
- [19] 郑永贤, 张智光. 森林旅游景区生态安全要素及其景观感知传递性分析. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(2): 123-129, 134-134.
- [20] 郑永贤, 薛菲, 张智光. 森林旅游景区生态安全 IRDS 模型实证研究. 资源科学, 2015, 37(12): 2350-2361.
- [21] 吕君, 于相贤, 刘丽梅. 旅游发展生态安全的动力学机制探讨. 干旱区资源与环境, 2009, 23(4): 146-149.
- [22] Li Y J, Chen T, Hu J, Wang J. Tourism ecological security in Wuhan. Journal of Resources and Ecology, 2013, 4(2): 149-156.
- [23] 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.
- [24] 闫云平, 余卓渊, 富佳鑫, 王文志. 西藏景区旅游承载力评估与生态安全预警系统研究. 重庆大学学报, 2012, 35(S1): 92-98.
- [25] 张广海, 王佳. 海南省旅游开发生态风险评价与预警机制. 热带地理, 2013, 33(1): 88-95.
- [26] Jing X Y. Ecological security assessment and the sustainable development of tourist destination: a case study of Taining scenic area. Journal of Landscape Research, 2010, 2(10): 61-65, 75-75.
- [27] 肖建红, 于庆东, 刘康, 陈东景, 陈娟, 肖江南. 海岛旅游地生态安全与可持续发展评估——以舟山群岛为例. 地理学报, 2011, 66(6): 842-852.
- [28] 杜忠潮, 李志霞. 基于生态足迹模型的旅游地生态安全评价研究——以咸阳市为例. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2011, 47(3): 110-115.
- [29] 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.
- [30] Liu X L, Yang Z P, Di F, Chen X G. Evaluation on tourism ecological security in nature heritage sites—case of Kanas Nature Reserve of Xinjiang, China. Chinese Geographical Science, 2009, 19(3): 265-273.
- [31] 郑永贤, 张智光. 森林旅游景区生态安全影响因素的 IRDS 模型研究——基于扎根理论. 世界林业研究, 2015, 28(1): 23-30.
- [32] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13(10): 397-402.
- [33] Spiegel J M, Bonet M, Yassi A, Molina E, Concepcion M, Mast P. Developing ecosystem health indicators in Centro Habana: a community-based approach. Ecosystem Health, 2001, 7(1): 15-26.
- [34] 张鹏, 丘萍. 岩溶地区旅游生态安全评价及趋势分析——以广西为例. 中国岩溶, 2014, 33(4): 483-489.
- [35] 赵新伟. 区域旅游可持续发展的生态安全预警评价研究——以开封市为例. 平顶山工学院学报, 2007, 16(6): 13-17.
- [36] 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, 28(4): 1736-1747.
- [37] 韦健华, 王尔大. 基于游客体验效用的旅游承载力评价方法. 旅游学刊, 2015, 30(4): 105-114.
- [38] Fyall A, Garrod B, Leask A. 旅游吸引物管理: 新的方向. 郭英之主, 译. 大连: 东北财经大学出版社, 2005: 6-8.
- [39] 邵琪伟. 中国旅游大辞典. 上海: 上海辞书出版社, 2012: 417-418.
- [40] 唐启义. DPS 数据处理系统(第三版). 北京: 科学出版社, 2013: 634-638.
- [41] 赵强, 徐征和, 苏万敏. 基于 RBF 神经网络的城市需水量预测——以济南市为例. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 124-127, 132-132.
- [42] 陈彦光. 基于 EXCEL 的地理数据分析. 北京: 科学出版社, 2010: 260-268.
- [43] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选(第二版). 北京: 清华大学出版社, 2008: 112-115.
- [44] 陈克龙, 苏茂新, 李双成, 卢京花, 陈英玉, 张斐, 刘志杰. 西宁市城市生态系统健康评价. 地理研究, 2010, 29(2): 214-222.
- [45] 李启权, 王昌全, 岳天祥, 李冰, 杨娟. 基于 RBF 神经网络的土壤有机质空间变异研究方法. 农业工程学报, 2010, 26(1): 87-93.