

DOI: 10.5846/stxb202012253275

石丹, 关婧文, 刘吉平. 基于 DPSIR-EES 模型的旅游型城镇生态安全评价研究. 生态学报, 2021, 41(11): 4330-4341.

Shi D, Guan J W, Liu J P. Ecological security evaluation of tourism towns based on DPSIR-EES-matter element. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4330-4341.

基于 DPSIR-EES 模型的旅游型城镇生态安全评价研究

石 丹*, 关婧文, 刘吉平

吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 四平 136000

摘要: 保障生态安全是旅游型城镇实现环境、经济、社会系统健康发展的基础, 二道白河镇作为典型的旅游型城镇, 旅游业快速发展的同时生态环境保护面临着巨大压力。针对当前生态安全评价中信息屏蔽和主观性问题, 基于 DPSIR-EES 模型构建生态安全评价指标体系, 运用熵值法和均方差法确定权重, 引入物元分析模型, 实现 2010—2019 年二道白河镇生态安全评价与评价结果的可视化表达与分析。结果表明: (1) 2010—2019 年二道白河镇生态安全水平从不安全向安全水平不断转化, 2016 年后上升趋势尤为突出; (2) GDP 增长率、社会保障建设水平、节能环保力度等三项指标以及影响层面、社会层面、经济压力层面等三个层面的影响最为突出, 是二道白河镇生态安全水平健康发展的主要制约条件。多维度指标结合物元分析模型, 既能得到综合质量信息以及反映评价对象的稳定状况, 同时直观揭示各单项评价指标的分异情况, 为二道白河镇下一阶段生态安全决策提供科学依据。下一阶段工作应以环境开发和保护为重点, 积极采取对策, 弥补生产、生活行为对生态环境系统的负面影响, 从根本上减轻生态环境压力, 实现二道白河镇经济、社会、环境协调发展。

关键词: 旅游型城镇; 生态安全; DPSIR-EES 模型; 物元分析; 二道白河镇

Ecological security evaluation of tourism towns based on DPSIR-EES-matter element

SHI Dan*, GUAN Jingwen, LIU Jiping

College of Tourist and Geoscience, Jilin Normal University, Siping 136000, China

Abstract: Safeguarding ecological security is the basis for healthy development of the environment, economy, and social system of tourism towns. In recent years, the fact that the development and construction of tourism towns have become a leading direction of new urbanization construction has been a widespread concern. The town of Erdaobaihe is a typical tourism town. With the rapid development of tourism, the ecological environment is facing great pressure and the threshold of ecological security carrying capacity of tourism towns has been reached. This has seriously affected the self-integrity and sustainable development of the tourism town ecosystem and even threatened its ecological security. Targeting the problems of information shielding and subjectivity in current ecological security evaluation, an ecological security evaluation index system was developed based on the DPSIR-EES model. The weight was determined by the entropy weight and mean square difference methods, and a matter-element analysis model was introduced to evaluate the ecological security level, analyze the trend of the ecological security level among various indicators, and realize visualization and analysis of the ecological security evaluation and evaluation results for Erdaobaihe from 2010 to 2019. The research produced the following results: (1) From 2010 to 2019, the ecological security level of Erdaobaihe changed constantly from the insecurity level to the

基金项目: 吉林省社科基金项目(2018B48); 国家自然科学基金项目(41801165)

收稿日期: 2020-12-25; 修订日期: 2021-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 109008028@qq.com

security level, with a prominent increase after 2016. (2) Based on the level of the DPSIR-EES, GDP growth rate, social security construction level, and energy conservation and environmental protection are the three most prominent indicators; based on the analysis of the element change of the DPSIR-EES evaluation index system, the fluctuation of the economic pressure level was obvious. The influence, social, and economic levels are the main constraints for the healthy development of ecological security in Erdaobaihe. The combination of the multi-dimensional index and the matter-element analysis model could not only provide comprehensive quality information and reflect the stability of the evaluation object but also directly reveal the differentiation of each single evaluation index to overcome the subjectivity of human influence in the process of assessment and improve the accuracy of ecological security assessment, thus providing a scientific basis for the next stage of ecological security decision-making in Erdaobaihe. The next stage of work should focus on environmental development and protection, actively taking response measures to compensate for the negative impacts of production and life behaviors on the ecological environment system and fundamentally reducing the pressure on the regional ecological environment to realize harmonious development of economy, society, and environment.

Key Words: tourism town; ecological security; DPSIR-EES; matter element analysis; Erdaobaihe town

生态安全是指区域内生态系统的完整情况和健康水平,其本质在于强调生态系统的自身结构是否受到破坏,同时强调生态系统对人类生活所提供的服务是否得到满足^[1],即区域内自然生态环境状况能够维系其经济、社会可持续发展时,这种状态下生态处于安全水平,反之则处于不安全水平^[2]。随经济、社会发展进入纵深阶段,旅游业在国民经济中的比重越来越大,旅游型城镇建设日趋成熟,但在加快发展过程中粗放式、无节制地开发,使得旅游型城镇生态环境保护形势十分严峻,已经逼近旅游型城镇生态安全承载力阈值,资源环境持续恶化与生态系统可持续发展的目标不相符^[3],严重影响旅游型城镇生态系统的自我完整性及可持续发展,还威胁其生态安全^[4],如何实现旅游型城镇发展与资源环境的全面脱钩是现阶段亟待解决的重要问题,生态安全问题引发业界对旅游型城镇生态安全和环境保护的理性思考。对于生态安全的研究,大多数学者主要集中在生态安全的概念和内涵^[5]、评价指标模型^[6]和格局构建与优化^[7]等方面的研究,评价方法涉及模糊分析法^[8]、层次分析法^[9]、TOPSIS 法^[10]、灰色聚类分析法^[11]等,指标构建主要选取 PSR 模型^[12-13]、DPSIR 模型^[14-16]、EES 模型^[17]等。研究尺度大多为省域^[18]、市域^[19]或区域^[20],研究分析方法主要集中在生态足迹法^[21]、正态云模型^[22]、ARIMA 模型^[23]、物元模型^[24-27]、GIS 技术^[28-29]等。

对于旅游型城镇生态安全评价分析而言,仍存在以下三点问题亟待解决:(1)现有研究针对生态安全研究领域,大多数采用中、大尺度,虽从不同角度丰富和完善了生态安全的研究体系,但缺乏通过从单一旅游型城镇小尺度视角进行生态安全评价分析;(2)大部分生态安全评价体系多以单一模型构建为主,其只能反映各子系统间的相互关系,不能更好地实现各子系统内部相互作用关系;(3)多数生态安全评价模型仅考虑各评价指标之间的相互影响,未考虑各评价指标因素间具有不相容性且存在交叉作用,忽视评价过程中信息屏蔽和主观性等问题。针对上述问题,基于区域可持续发展理论,运用 DPSIR-EES 复合模型进一步完善生态安全评价指标体系,以二道白河镇为例,通过熵值法和均方差决策法对数据进行处理并赋权,引入物元分析模型,评价 2010—2019 年生态安全水平,分析各指标之间的生态安全水平变化趋势,以期更好地实现二道白河镇生态系统可持续发展,对其自身及同类型旅游型城镇改善生态安全环境质量、促进生态系统良性循环、实现经济社会环境可持续发展具有指导意义。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

二道白河镇位于吉林省东南部,地理位置处于东经 127°53′—128°34′、北纬 42°01′—42°48′之间,地处长白山脚下,使得二道白河镇旅游业发展独具优势^[30]:(1)境内林地面积 272883hm²,森林覆盖率达 94%,拥有

丰富的森林资源;(2)境内除长白山外,地势开阔、起伏较小,草原面积 12342hm²,适合人类开展各类活动;(3)区域内有 120 余种植物种类,其中 30 多种树种属于经济价值高的种类,具有丰富的自然生态资源。独特的地理位置和丰富自然生态资源为二道白河镇的生态环境发展奠定了良好的基础,同时为该区域生态环境建设发挥了极其重要的作用。

1.2 数据来源

生态安全评价指标可分为原始指标数据以及构建指标数据,选择 2010—2019 年作为研究期。原始指标数据主要通过查阅《中国区域经济统计年鉴(2011—2020 年)》、《吉林统计年鉴(2011—2020 年)》、《长白山保护开发区年鉴(2014—2019 年)》,其中个别数据来源于以下三个方面:(1)《延边年鉴(2011—2015 年)》、《延吉年鉴(2011—2019 年)》;(2)吉林省延边州、安图县市(州)旅游局、统计局等官方网站;(3)吉林省国民经济和社会发展统计公报和安图县、长白山保护区其他相关政府网站等有关旅游业发展的政府工作报告。构建指标数据通过原始指标数据复合计算得出,例如人均生产总值=生产总值/人口数。对于个别缺失数据,根据已有数据通过算法计算进行合理性赋值。

2 旅游型城镇生态安全物元评价模型

2.1 DPSIR-EES 生态安全评价模型框架

由“驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)、响应(R)”五个方面所构成的 DPSIR 模型^[14-16],用于表达影响生态安全整个系统各因素之间的信息耦合关系;由“环境(E)、经济(E)、社会(S)”三个层面所构成的 EES 模型^[17],用于描述整个人类活动系统中各属性之间的协同关系。DPSIR 模型能够较好地反映生态各系统之间的因果影响,但无法实现各系统内部的分析;EES 模型能够较好地反应生态系统内部复合属性,进行系统内部结构分析,但无法反映系统内因果关系。利用两个单项模型的优点实现有机结合,形成 DPSIR-EES 模型(图 1),将各要素有机结合,能更清晰地反映之间相互作用关系。

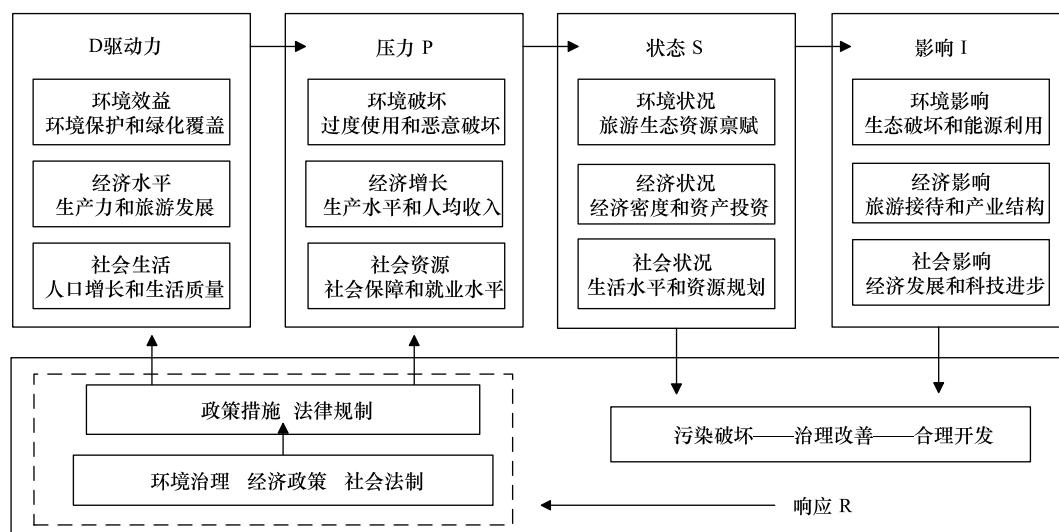


图 1 二道白河镇生态安全评价 DPSIR-EES 模型框架

Fig.1 DPSIR-EES model framework for ecological security assessment in Erdaobaihe town

2.2 DPSIR-EES 生态安全评价指标体系构建

初步选取 45 项具体评价指标,为保证指标体系的科学性,参考 SDGs(可持续发展目标指标)^[31]、EPI(环境绩效评估指标)^[32]以及综合相关研究成果^[2-3,9,16,25-27],运用 SPSS22.0 和 Delphi 法进行主成分分析和因子分析,最终确定 36 个指标(表 1)。明确各指标属性,分为效益型(+)或成本型(-),结合熵权法和均方差决策法

综合计算得出更为精确的综合权重(C_i)。

表 1 二道白河镇生态安全评价指标体系

Table 1 Ecological security evaluation index system of Erdaobaihe town

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	要素层 Element layer	指标层 Index layer	指标符号 Indicator symbol	属性 Attribute	熵值权重 Entropy weight	均方差权重 Mean square error weight	综合权重 Comprehensive weight
旅游型城镇生态安全 Ecological security of tourist towns(ES)	驱动力 Driving force (D)	环境 ED ₁	森林覆盖率/%	ED ₁₁	+	0.0291	0.0242	0.0266
			建成区绿化率/%	ED ₁₂	+	0.0285	0.0254	0.0269
			空气质量优良天数水平/%	ED ₁₃	+	0.0275	0.0252	0.0263
		经济 ED ₂	经济发展水平/亿元	ED ₂₁	+	0.0289	0.0238	0.0264
			人均生产总值/元	ED ₂₂	+	0.0287	0.0245	0.0266
			旅游业发展水平/%	ED ₂₃	+	0.0258	0.0339	0.0299
		社会 SD ₃	人口密度/(人/km ²)	SD ₃₁	-	0.0286	0.0266	0.0276
			人口自然增长率/%	SD ₃₂	-	0.0263	0.0297	0.0280
			城镇化水平/%	SD ₃₃	+	0.0287	0.0286	0.0287
	压力 Pressure(P)	环境 EP ₁	农药化肥使用量/万吨	EP ₁₁	-	0.0281	0.0271	0.0276
			工业固体废物综合水平/%	EP ₁₂	+	0.0278	0.0295	0.0287
		经济 EP ₂	GDP 增长率/%	EP ₂₁	+	0.0284	0.0255	0.0269
			人均可支配收入/元	EP ₂₂	+	0.0285	0.0263	0.0274
		社会 SP ₃	社会保障建设水平/%	SP ₃₁	+	0.0280	0.0298	0.0289
			城镇登记失业率/%	SP ₃₂	-	0.0273	0.0317	0.0295
		状态 State(S)	人均水资源占有量/(m ³ /人)	ES ₁₁	+	0.0274	0.0287	0.0281
			旅游资源禀赋情况/个	ES ₁₂	+	0.0290	0.0247	0.0269
			经济密度/(亿元/hm ²)	ES ₂₁	+	0.0289	0.0238	0.0264
	影响 Impact(I)	经济 ES ₂	人均固定资产投资额/元	ES ₂₂	+	0.0279	0.0291	0.0285
			人均消费能力/元	SS ₃₁	+	0.0285	0.0282	0.0283
			人均建设用地面积/hm ²	SS ₃₂	+	0.0285	0.0258	0.0271
		环境 EI ₁	水土流失率/%	EI ₁₁	-	0.0273	0.0297	0.0285
			清洁能源使用率/%	EI ₁₂	+	0.0279	0.0303	0.0291
		经济 EI ₂	第三产业比重/%	EI ₂₁	+	0.0259	0.0332	0.0295
			旅游接待能力/万人次	EI ₂₂	+	0.0275	0.0265	0.0270
		社会 SI ₃	就业与经济增长关联度/%	SI ₃₁	+	0.0284	0.0304	0.0294
			科技进步对经济贡献率/%	SI ₃₂	+	0.0275	0.0271	0.0273
	响应 Response(R)	环境 ER ₁	生活污水处理能力/%	ER ₁₁	+	0.0290	0.0274	0.0282
			生活垃圾处理能力/%	ER ₁₂	+	0.0289	0.0279	0.0284
			土地退化治理率/%	ER ₁₃	+	0.0284	0.0265	0.0274
		经济 ER ₂	社会消费品零售总额/亿元	ER ₂₁	+	0.0289	0.0277	0.0283
			节能环保力度/%	ER ₂₂	+	0.0268	0.0270	0.0269
			财政支出总额/亿元	ER ₂₃	+	0.0252	0.0294	0.0273
		社会 SR ₃	公共设施建设水平/%	SR ₃₁	+	0.0280	0.0307	0.0293
			居民人均居住用地/(m ² /人)	SR ₃₂	+	0.0255	0.0272	0.0264
			区域开发比例/%	SR ₃₃	+	0.0245	0.0271	0.0258

2.3 生态安全物元分析模型

2.3.1 确定生态安全评价物元

旅游型城镇生态安全 N ,生态安全特征 w 和特征量值 v 共同构成生态安全物元。假设生态安全 N 中有多个特征值则表示为:

$$R = \begin{vmatrix} N & w_1 & v_1 \\ & w_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & w_n & v_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{vmatrix}$$

式中, R 为生态安全的 n 维物元, 可表示为 $R = (N, w, v)$ 。

对于二道白河镇生态安全综合性评价物元表示为:

$$R = \begin{vmatrix} \text{旅游型城镇生态安全} & \text{驱动力} & v_1 \\ & \text{压力} & v_2 \\ & \text{状态} & v_3 \\ & \text{影响} & v_4 \\ & \text{响应} & v_5 \end{vmatrix}$$

对于二道白河镇生态安全准则层评价, 如驱动力环境层面 ED_1 生态安全水平评价的物元表示为:

$$R = \begin{vmatrix} \text{驱动力环境} ED_1 & \text{森林覆盖率} ED_{11} & v_1 \\ & \text{建成区绿化率} ED_{12} & v_2 \\ & \text{空气质量优良天数} ED_{13} & v_3 \end{vmatrix}$$

2.3.2 确定经典域、节域

旅游型城镇生态安全的经典域物元 $R_{oj} = (N_{oj}, W_i, V_o)$, 其矩阵表示为:

$$R_{oj} = (N_{oj}, W_i, V_o) = \begin{vmatrix} N_{oj} & w_1 & (a_{oj1}, b_{oj1}) \\ & w_2 & (a_{oj2}, b_{oj2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & w_n & (a_{ojn}, b_{ojn}) \end{vmatrix}$$

式中, R_{oj} 为生态安全经典域物元, N_{oj} 为第 j 个生态安全评价等级, W_i 为第 i 个生态安全评价指标, (a_{oji}, b_{oji}) 为生态安全对应评价等级 j 的量值范围, 即旅游型城镇生态安全评价经典域。

旅游型城镇生态安全的节域物元 $R_p = (N_p, W_n, V_p)$, 其矩阵表示为:

$$R_p = (N_p, W_n, V_p) = \begin{vmatrix} N_p & w_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & w_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & w_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{vmatrix}$$

式中, R_p 为生态安全节域物元, N_p 为生态安全评价等级, (a_{pn}, b_{pn}) 为生态安全节域物元对应 W_n 的取值范围, 即旅游型城镇生态安全评价节域。

旅游型城镇生态安全待评价对象 N_x 的物元可表示为 $R_x = (N, W, V)$, 其矩阵表示为:

$$R_x = (N, W, V) = \begin{vmatrix} N_x & w_1 & v_1 \\ & w_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & w_n & v_n \end{vmatrix}$$

2.3.3 确定评价指标关联度函数及关联度

旅游型城镇生态安全关联函数 $K(x)$ 数值表示评价对象与某一标准范围的符合程度, 物元模型的逻辑值从模糊数学的 $[0, 1]$ 取值范围扩展到 $(-\infty, +\infty)$ 实数轴, 在实数轴上的数值表示评价对象与某标准范围的隶属程度; $K(x) < -1$, 则表示被评价对象不符合标准对象的要求且不具备转化对标准对象的条件; $-1 \leq K(x) <$

0,则表示被评价对象不符合标准对象的要求,但具备转化为标准对象的条件; $0 \leq K(x) < 1$,则表示被评价对象符合标准对象的要求,数值越大则表示越接近标准上限; $K(x) \geq 1$,则表示被评价对象超过标准对象的要求上限,数值越大则表示具有越大的开发潜力^[26-27,33-35]。

旅游型城镇生态安全评价指标关联度函数 $K(x)$ 表示为:

$$K(x) = \begin{cases} \frac{-\rho(X, X_o)}{|X_o|} & (X \in X_o) \\ \frac{\rho(X, X_o)}{\rho(X, X_p) - \rho(X, X_o)} & (X \notin X_o) \end{cases}$$

其中实变函数距离表示为:

$$\begin{cases} \rho(X, X_o) = \left| X - \frac{1}{2}(a_o + b_o) \right| - \frac{1}{2}(b_o - a_o) \\ \rho(X, X_p) = \left| X - \frac{1}{2}(a_p + b_p) \right| - \frac{1}{2}(b_p - a_p) \end{cases}$$

式中, $\rho(X, X_o)$ 为点 X 与有界区间 $X_o = [a_o, b_o]$ 的距离, $\rho(X, X_p)$ 为点 X 与对应节域的有界区间 $X_p = [a_p, b_p]$ 的距离, X, X_o, X_p 为旅游型城镇生态安全评价物元的量值、经典域及节域物元量值范围。

2.3.4 计算综合关联度并确定评价等级

旅游型城镇生态安全待评价对象 N_x 关于等级 j 的综合关联度 $K_j(N_x)$ 表示为:

$$K_j(N_x) = \sum_{i=1}^N C_i K_j(x_i)$$

式中, $K_j(x_i)$ 为各评价等级水平, C_i 为第 i 个指标的权重。确定评价对象归属等级标准采用最大值原则 $K_j = \max K_j(N_x)$, 则可评定评价对象 N_x 属于对应评价等级标准 j 级。

2.4 生态安全评价经典域、节域的确定

确定经典域是物元评价的基础,依据生态安全综合属性,参照国家环保总局《生态县、生态市、生态省建设指标(试行)》标准值、国际通行标准、全国及区域平均水平及同类相关指标等标准值,参考相关研究^[2-6,26-27,30-35],将二道白河生态安全等级分为五个等级:Ⅴ级(安全)、Ⅳ级(较安全)、Ⅲ级(临界安全)、Ⅱ级(较不安全)、Ⅰ级(不安全)。评价主要标准从以下方面选取:(1)国际、国家、地方所规定的标准,如 ED_1 、 EP_1 、 EI_1 、 ER_1 等与生态环境质量标准为主要统计指标,采取对应标准值划分等级;(2)类比同类标准,如 ED_2 、 SD_3 、 EP_2 、 SP_3 、 ES_1 、 ES_2 、 SS_3 、 EI_2 、 SI_3 、 ER_2 、 SR_3 等与经济发展、社会生活为主要统计指标,参考国内外具有良好特色的同类区域现状值作为标准值或趋势值外推设定“Ⅴ级(安全)”,并以国内外同类区域现状较劣值或国际公认的警戒线指标设定“Ⅰ级(不安全)”,最后综合二道白河镇实际情况,得出该区域生态安全评价经典域复合物元量值范围以及节域物元量值范围评价标准(见表2),通过关联度函数计算判断待评价对象所属等级。

3 旅游型城镇生态安全物元分析结果

3.1 生态安全评价指标及综合关联度分析

计算得 2010—2019 年二道白河镇生态安全评价指标关联度(表3)及综合关联度(表4)结果以及对应安全等级。

从表3可知,在 2010—2019 年 ED_{11} 、 ED_{21} 、 EP_{11} 、 EP_{22} 、 SP_{32} 、 ES_{11} 、 ES_{12} 、 ES_{21} 、 ES_{22} 、 SS_{31} 、 EI_{11} 、 EI_{22} 、 ER_{13} 、 ER_{21} 、 SR_{31} 均呈现出不同程度的从Ⅰ级(不安全)向Ⅴ级(安全)逐年转化的上升趋势,说明以上指标对于二道白河镇生态安全水平的提升具有积极作用。而 ED_{13} 、 EP_{21} 、 SP_{31} 、 SI_{31} 、 ER_{11} 、 ER_{22} 在 2019 年仍处于Ⅰ级(不安全)、Ⅱ级(较不安全)或Ⅲ级(临界安全)水平,且呈现明显波动变化,其中 EP_{21} 、 SP_{31} 、 ER_{22} 呈现逐年下降的趋势,已成为制约二道白河镇生态安全进一步提升的主要因素。

表 2 二道白河镇生态安全评价经典域及节域量值范围

Table 2 The range of classical and joint domains of ecological security assessment in Erdaobaihe town

目标层 Target layer	准则层 Criteria Layer	要素层 Element layer	指标层 Index layer	评价标准(经典域) Evaluation criteria (classical domain)					节域 Joint domains
				V—安全 Safety	IV—较安全 Relatively safety	III—临界安全 Critical safety	II—较不安全 Less safety	I—不安全 Unsafety	
旅游型城镇生态安全 Ecological security of tourist towns(ES)	驱动力(D)	环境 ED ₁	森林覆盖率 ED ₁₁	0.8—1	0.6—0.8	0.5—0.6	0.3—0.5	0—0.3	0—1
			建成区绿化率 ED ₁₂	0.75—1	0.6—0.75	0.45—0.6	0.25—0.45	0—0.25	0—1
			空气质量优良天数水平 ED ₁₃	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.3—0.4	0—0.3	0—1
	经济 ED ₂	经济 ED ₂	经济发展水平 ED ₂₁	0.7—1	0.5—0.7	0.4—0.5	0.2—0.4	0—0.2	0—1
			人均生产总值 ED ₂₂	0.8—1	0.7—0.8	0.5—0.7	0.25—0.5	0—0.25	0—1
			旅游业发展水平 ED ₂₃	0.7—1	0.5—0.7	0.4—0.5	0.2—0.4	0—0.2	0—1
	社会 SD ₃	社会 SD ₃	人口密度 SD ₃₁	0.8—1	0.65—0.8	0.5—0.65	0.35—0.5	0—0.35	0—1
			人口自然增长率 SD ₃₂	0.75—1	0.6—0.75	0.45—0.6	0.25—0.45	0—0.25	0—1
			城镇化水平 SD ₃₃	0.8—1	0.65—0.8	0.45—0.65	0.3—0.45	0—0.3	0—1
	压力(P)	环境 EP ₁	农药化肥使用量 EP ₁₁	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2	0—1
工业固体废物综合水平 EP ₁₂			0.85—1	0.7—0.85	0.5—0.7	0.35—0.5	0—0.35	0—1	
经济 EP ₂			0.7—1	0.6—0.7	0.45—0.6	0.2—0.45	0—0.2	0—1	
状态(S)	社会 SP ₃	社会 SP ₃	人均可支配收入 EP ₂₂	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2	0—1
			社会保障建设水平 SP ₃₁	0.85—1	0.7—0.85	0.5—0.7	0.25—0.5	0—0.25	0—1
			城镇登记失业率 SP ₃₂	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2	0—1
	环境 ES ₁	环境 ES ₁	人均水资源占有量 ES ₁₁	0.8—1	0.7—0.8	0.5—0.7	0.25—0.5	0—0.25	0—1
			旅游资源禀赋情况 ES ₁₂	0.85—1	0.65—0.85	0.45—0.65	0.25—0.45	0—0.25	0—1
			经济密度 ES ₂₁	0.75—1	0.6—0.75	0.45—0.6	0.2—0.45	0—0.2	0—1
	经济 ES ₂	经济 ES ₂	人均固定资产投资额 ES ₂₂	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2	0—1
			人均消费能力 SS ₃₁	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.15—0.4	0—0.15	0—1
			人均建设用地面积 SS ₃₂	0.75—1	0.65—0.75	0.45—0.65	0.3—0.45	0—0.3	0—1
	影响(I)	环境 EI ₁	环境 EI ₁	水土流失率 EI ₁₁	0.8—1	0.6—0.8	0.3—0.6	0.1—0.3	0—0.1
清洁能源使用率 EI ₁₂				0.75—1	0.6—0.75	0.4—0.6	0.25—0.4	0—0.25	0—1
第三产业比重 EI ₂₁				0.9—1	0.8—0.9	0.5—0.8	0.1—0.5	0—0.1	0—1
响应(R)	经济 EI ₂	经济 EI ₂	旅游接待能力 EI ₂₂	0.8—1	0.65—0.8	0.4—0.65	0.25—0.4	0—0.25	0—1
			就业与经济增长关联度 SI ₃₁	0.85—1	0.7—0.85	0.6—0.7	0.4—0.6	0—0.4	0—1
			科技进步对经济贡献率 SI ₃₂	0.85—1	0.65—0.85	0.45—0.65	0.25—0.45	0—0.25	0—1
	环境 ER ₁	环境 ER ₁	生活污水处理能力 ER ₁₁	0.9—1	0.8—0.9	0.6—0.8	0.3—0.6	0—0.3	0—1
			生活垃圾处理能力 ER ₁₂	0.85—1	0.7—0.85	0.6—0.7	0.4—0.6	0—0.4	0—1
			土地退化治理率 ER ₁₃	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2	0—1
	经济 ER ₂	经济 ER ₂	社会消费品零售总额 ER ₂₁	0.85—1	0.65—0.85	0.5—0.65	0.3—0.5	0—0.3	0—1
			节能环保力度 ER ₂₂	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.25—0.4	0—0.25	0—1
			财政支出总额 ER ₂₃	0.8—1	0.6—0.8	0.3—0.6	0.1—0.3	0—0.1	0—1
	社会 SR ₃	社会 SR ₃	公共设施建设水平 SR ₃₁	0.9—1	0.75—0.9	0.45—0.75	0.2—0.45	0—0.2	0—1
居民人均居住用地 SR ₃₂			0.65—1	0.3—0.65	0.25—0.3	0.1—0.25	0—0.1	0—1	
区域开发比例 SR ₃₃			0.8—1	0.6—0.8	0.2—0.6	0.1—0.2	0—0.1	0—1	

表 3 2010—2019 年二道白河镇生态安全评价指标关联度
Table 3 Correlation degree of ecological security evaluation indexes in Erdaobaihe town from 2010 to 2019

指标及年份 Index and year	2010					等级 Grade									
	V—安全 Safety	IV—较安全 Relatively safety	III—临界安全 Critical safety	II—较不安全 Less safety	I—不安全 Unsafe	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$k_j(ED11)$	0.0333	-0.9667	-0.9800	-0.9833	-0.9875	I	II	II	II	II	III	IV	IV	V	V
$k_j(ED12)$	-0.1699	0.3217	-0.3015	-0.4761	-0.5809	II	I	II	III	III	IV	IV	I	V	V
$k_j(ED13)$	0.0333	-0.9667	-0.9750	-0.9833	-0.9875	I	I	II	I	II	II	V	V	I	II
$k_j(ED21)$	0.0500	-0.9667	-0.9750	-0.9800	-0.9857	I	II	II	III	IV	IV	IV	V	V	V
$k_j(ED22)$	0.0400	-0.9600	-0.9800	-0.9857	-0.9875	I	I	II	II	III	III	III	III	V	V
$k_j(ED23)$	0.4348	-0.5652	-0.7826	-0.8260	-0.8758	I	I	I	I	II	II	IV	V	V	V
$k_j(SD31)$	-0.1185	0.3624	-0.1913	-0.3779	-0.4946	II	I	I	II	II	III	IV	V	V	V
$k_j(SD32)$	0.0400	-0.9600	-0.9778	-0.9833	-0.9867	I	I	I	I	I	II	II	V	V	V
$k_j(SD33)$	0.0333	-0.9667	-0.9778	-0.9846	-0.9875	I	III	II	II	I	IV	V	V	V	V
$k_j(EP11)$	0.0500	-0.9500	-0.9750	-0.9833	-0.9875	I	I	II	II	III	III	IV	IV	V	V
$k_j(EP12)$	0.0286	-0.9714	-0.9800	-0.9857	-0.9882	I	I	I	I	III	IV	IV	IV	V	V
$k_j(EP21)$	-0.8167	-0.7334	-0.6335	-0.5113	0.4887	V	V	V	II	II	I	I	III	II	III
$k_j(EP22)$	0.0500	-0.9500	-0.9750	-0.9833	-0.9875	I	I	II	III	III	III	IV	V	V	V
$k_j(SF31)$	-0.7588	-0.6381	-0.3969	0.2062	-0.1460	IV	V	V	III	V	IV	I	III	I	I
$k_j(SF32)$	0.0500	-0.9500	-0.9750	-0.9833	-0.9875	I	I	I	II	III	IV	IV	V	V	V
$k_j(ES11)$	0.0400	-0.9600	-0.9800	-0.9857	-0.9875	I	I	I	II	II	II	III	IV	V	V
$k_j(ES12)$	0.0400	-0.9600	-0.9778	-0.9846	-0.9882	I	I	II	II	III	III	IV	IV	V	V
$k_j(ES21)$	0.0500	-0.9500	-0.9778	-0.9833	-0.9867	I	II	II	III	III	III	III	IV	V	V
$k_j(ES22)$	0.4055	-0.4055	-0.7028	-0.8018	-0.8514	I	I	I	III	II	IV	IV	V	V	V
$k_j(SS31)$	0.0667	-0.9333	-0.9778	-0.9833	-0.9867	I	I	II	III	IV	IV	IV	V	V	V
$k_j(SS32)$	0.0333	-0.9667	-0.9778	-0.9846	-0.9867	I	II	I	III	III	III	III	III	V	V
$k_j(EH11)$	0.1000	-0.9000	-0.9667	-0.9833	-0.9875	I	I	II	III	III	IV	III	IV	V	V
$k_j(EH12)$	0.0400	-0.9667	-0.9750	-0.9833	-0.9867	I	I	I	III	V	V	V	V	I	IV
$k_j(EH21)$	0.3616	-0.6385	-0.9277	-0.9548	-0.9598	I	I	I	I	II	IV	V	IV	IV	III
$k_j(EH22)$	0.0400	-0.9600	-0.9750	-0.9846	-0.9875	I	I	I	II	II	II	III	IV	V	V
$k_j(SB1)$	0.2055	-0.7945	-0.8630	-0.8826	-0.9033	I	I	I	III	IV	V	IV	IV	V	V
$k_j(SB2)$	0.0400	-0.9600	-0.9778	-0.9846	-0.9882	I	I	I	III	II	III	IV	III	IV	V
$k_j(ER11)$	-0.2291	0.4228	-0.2886	-0.4665	-0.5257	II	IV	III	III	I	IV	V	I	V	III
$k_j(ER12)$	0.0250	-0.9750	-0.9833	-0.9857	-0.9882	I	I	V	V	IV	IV	IV	III	V	V
$k_j(ER13)$	0.0500	-0.9500	-0.9750	-0.9833	-0.9875	I	I	II	II	III	III	IV	IV	V	V
$k_j(ER21)$	0.0333	-0.9667	-0.9800	-0.9846	-0.9882	I	I	II	III	IV	IV	IV	V	V	V
$k_j(ER22)$	-0.6897	-0.6122	-0.4183	0.1635	-0.1232	IV	V	IV	III	II	I	I	II	I	I
$k_j(ER23)$	0.1000	-0.9000	-0.9667	-0.9833	-0.9875	I	I	I	II	II	II	III	III	V	V
$k_j(SR31)$	0.0500	-0.9500	-0.9778	-0.9867	-0.9889	I	I	II	III	III	III	IV	IV	V	V
$k_j(SR32)$	0.0561	-0.0561	-0.6224	-0.6854	-0.8548	I	II	IV	I	I	II	II	III	V	V
$k_j(SR33)$	0.1000	-0.9000	-0.9500	-0.9833	-0.9875	I	I	I	II	II	II	II	III	IV	V

由表 4 看出,2010—2019 年生态安全等级呈现逐年递增转化且接近向 V 级(安全)的趋势,由 2010 年向 I 级(不安全)转化发展至 2019 年向 V 级(安全)转化,其中 2018 年已达到 V 级(安全)。划分为四个阶段:(1)2010—2012 年:关联度量值 $k_j(w_{2012}) < k_j(w_{2010}) < k_j(w_{2011})$,说明 2011 年生态安全水平较 2010 年有所提升且属于 I 级(不安全),2012 年生态安全水平较 2010—2011 年有所下滑;(2)2013—2015 年:2013 年生态安全关联度最大值 $-0.0496 < 0$,有向 II 级(较不安全)转化的趋势,2014—2015 年关联度量值 $k_j(w_{2015}) < k_j(w_{2014}) < 0$,说明 2015 年生态安全水平较 2014 年有所下降且均属于向 III 级(临界安全)转化;(3)2016—2017 年:关联度量值 $k_j(w_{2017}) < k_j(w_{2016}) < 0$,说明 2017 年生态安全较 2016 年有所下降且均属于向 IV 级(较安全)转化;(4)2018—2019 年:2018 年最大值 0.0484 属于 V 级(安全),但 2019 年关联度量值 $-0.0476 < 0$,整体而言已趋近于 0,则表示具备转化为 V 级(安全)的趋势。

综上,自 2016 年二道白河镇的生态安全水平向 IV 级(较安全)、V 级(安全)转化,整体生态安全等级不断上升且趋安全等级发展,为了使二道白河镇生态安全水平日后发展过程中处于稳定的 V 级(安全),需针对制约因素及时合理调整,制定相应政策措施。

表 4 2010—2019 年二道白河镇生态安全综合关联度比较

Table 4 Comparison of comprehensive correlation degree of ecological security in Erdaobaihe town from 2010 to 2019

	I—不安全	II—较不安全	III—临界安全	IV—较安全	V—安全	等级
$k_j(w_{2010})$	-0.0005	-0.7542	-0.8479	-0.8394	-0.8486	向 I 级转化
$k_j(w_{2011})$	0.0455	-0.5376	-0.7038	-0.7753	-0.7607	I 级
$k_j(w_{2012})$	-0.0948	-0.1025	-0.4256	-0.5478	-0.6178	向 I 级转化
$k_j(w_{2013})$	-0.2255	-0.0496	-0.1157	-0.3911	-0.5188	向 II 级转化
$k_j(w_{2014})$	-0.3213	-0.1241	-0.1240	-0.2744	-0.4529	向 III 级转化
$k_j(w_{2015})$	-0.4788	-0.2539	-0.1428	-0.1676	-0.3685	向 III 级转化
$k_j(w_{2016})$	-0.5124	-0.4068	-0.2533	-0.1075	-0.2811	向 IV 级转化
$k_j(w_{2017})$	-0.6087	-0.5297	-0.3635	-0.1746	-0.2052	向 IV 级转化
$k_j(w_{2018})$	-0.7243	-0.7395	-0.6578	-0.4826	0.0484	V 级
$k_j(w_{2019})$	-0.8212	-0.8243	-0.8005	-0.8523	-0.0476	向 V 级转化

3.2 生态安全各层面影响要素变化分析

同理可计算出二道白河镇 2010—2019 年按 DPSIR-EES 层面的各年间综合关联度(图 2)。由图 2 可知,除 EP_2 在 2010 年为 V 级(安全)外,其余层面关联度量值等级均为 I 级(不安全),具体结果:(1) EP_1 、 ES_1 、 ES_2 、 EI_1 关联度量值,按照 I 级(不安全)—II 级(较不安全)—III 级(临界安全)—IV 级(较安全)—的趋势逐年发展;(2) EP_2 在 2010 年为 V 级(安全),2011 年降至 I 级(不安全)—2012 年至 2014 年提升至 II 级(较不安全)—2015 年、2016 年回降至 I 级(不安全)—2017 年提升至 III 级(临界安全)—2018、2019 年升回 V 级(安全),呈现明显的波动;(3) SP_3 、 ER_1 在 2015 年第一次达到 V 级(安全),此外 SP_3 在 2017、2019 年达到 V 级(安全)、2018 年降至 I 级(不安全),而 ER_1 则在 2018、2019 年再次达到 V 级(安全);(4) 除上述层面外,其余层面各年间变化均呈现上下一至两级波动变化趋势。

无论从 DPSIR 层面或 EES 层面分析,2010—2019 年二道白河镇生态安全水平均大致呈现出从 I 级(不

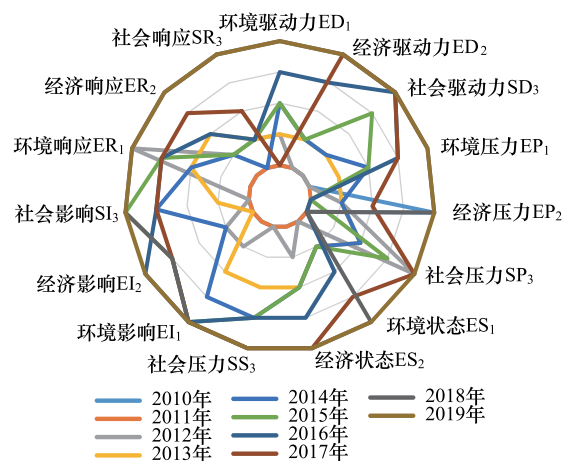


图 2 2010—2019 年二道白河镇生态安全 DPSIR-EES 评价结果

Fig. 2 DPSIR-EES evaluation results of ecological security in Erdaobaihe town from 2010 to 2019

安全)向V级(安全)逐年转化的上升趋势。从DPSIR层面看,驱动力(D)、状态(S)层面生态安全水平在2019年处于V级(安全),其余层面在2019年均处于向V级(安全)转化水平;影响(I)层面的关联度量值明显低于其余四个层面,除2010—2012年外均<0,说明一直处于转化水平,是影响二道白河镇生态安全水平基于DPSIR层面不断提升的制约因素。从EES层面看,环境(E)在2019年处于V级(安全),其余层面在2018年处于V级(安全),但在2019年处于向V级转化水平;社会(S)层面的关联度量值明显低于其余两个层面,除2012、2018年外均<0,说明一直处于转化水平,是影响二道白河镇生态安全水平基于EES层面不断提升的制约因素。

表 5 2010—2019 年二道白河镇生态安全评价 DPSIR 的等级比较

Table 5 Comparison of DPSIR grades of ecological security assessment in Erdaobaihe town from 2010 to 2019										
年份 Year DPSIR 各维度 dimensions	驱动力 Driving force		压力 Pressure		状态 State		影响 Impact		响应 Response	
	关联度 Correlation degree	等级 Grade	关联度 Correlation degree	等级 Grade	关联度 Correlation degree	等级 Grade	关联度 Correlation degree	等级 Grade	关联度 Correlation degree	等级 Grade
2010	0.0462	I 级	-0.2299	向 I 级转化	0.1082	I 级	0.1339	I 级	-0.0555	向 I 级转化
2011	0.0769	I 级	0.0769	I 级	0.1013	I 级	0.2658	I 级	-0.0348	向 I 级转化
2012	0.0164	I 级	-0.1568	向 II 级转化	0.0114	II 级	0.1646	I 级	-0.1389	向 II 级转化
2013	0.0104	II 级	0.0663	II 级	0.0507	III 级	-0.1170	向 II 级转化	-0.0886	向 III 级转化
2014	0.0346	II 级	0.0686	III 级	-0.0237	向 III 级转化	-0.1322	向 II 级转化	-0.2434	向 II 级转化
2015	0.0034	III 级	-0.0918	向 IV 级转化	0.0511	III 级	-0.2206	向 IV 级转化	-0.2181	向 II 级转化
2016	-0.0576	向 IV 级转化	-0.0961	向 IV 级转化	0.0319	IV 级	-0.1640	向 V 级转化	-0.2013	向 IV 级转化
2017	-0.0981	向 V 级转化	-0.1145	向 IV 级转化	0.0665	IV 级	-0.0150	向 IV 级转化	-0.2358	向 IV 级转化
2018	0.0798	V 级	-0.0868	向 IV 级转化	0.3927	V 级	-0.2096	向 V 级转化	0.0577	V 级
2019	0.0094	V 级	-0.1613	向 V 级转化	<0.0001	V 级	-0.0412	向 V 级转化	-0.0630	向 V 级转化

表 6 2010—2019 年二道白河镇生态安全评价 EES 的等级比较

Table 6 Comparison of EES grades of ecological security assessment in Erdaobaihe town from 2010 to 2019						
年份 Year	环境 Environment		经济 Economics		社会 Sociology	
	关联度 Correlation degree	等级 Grade	关联度 Correlation degree	等级 Grade	关联度 Correlation degree	等级 Grade
2010	0.0037	I 级	0.0136	I 级	-0.0184	向 I 级转化
2011	0.1752	I 级	0.0043	I 级	-0.0420	向 I 级转化
2012	-0.0354	向 II 级转化	-0.0817	向 II 级转化	0.0073	I 级
2013	-0.0716	向 II 级转化	-0.0491	向 II 级转化	-0.0284	向 II 级转化
2014	-0.0672	向 III 级转化	0.0468	II 级	-0.2001	向 II 级转化
2015	-0.1099	向 IV 级转化	-0.1858	向 III 级转化	-0.1134	向 III 级转化
2016	-0.0157	向 IV 级转化	-0.1951	向 IV 级转化	-0.1122	向 IV 级转化
2017	-0.1396	向 IV 级转化	-0.1124	向 IV 级转化	-0.1772	向 V 级转化
2018	0.0188	V 级	0.0490	V 级	0.0772	V 级
2019	0.0108	V 级	-0.1402	向 V 级转化	-0.0142	向 V 级转化

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 物元分析法将研究问题概括为关联或不关联并进行转化处理,能更为清晰地揭示当中分异信息。将旅游型城镇生态安全特征及特征量值作为物元,对评价对象进行量化处理,结合二道白河镇实际状况及相关指标标准得到经典域、节域,建立物元评价模型,借助熵权法和均方差法得出综合权重,计算出生态安全关联度量值及对应等级,克服评价过程中主观人为影响,提高生态安全评价的精度。

(2) 基于 DPSIR-EES 层面, 结合物元分析模型对 2010—2019 年二道白河镇生态安全进行评价, 结果表明: 2010—2013 年二道白河镇生态安全水平较差, 其中 GDP 增长率、社会保障建设水平、节能环保力度等三项指标影响最为突出, 自 2010 年处于安全级后呈现逐年下降趋势, 但在 2016 年后二道白河镇的各项政策与措施发挥显著作用, 生态安全水平逐年向安全水平转化。基于 DPSIR-EES 评价指标体系进行各层面要素变化分析, 经济压力(EP_2)层面的波动变化趋势明显, 影响(I)层面、社会(S)层面已成为二道白河镇生态安全进一步提升的制约因素。

(3) 综合 DPSIR-EES-物元分析, 二道白河镇下一阶段的工作重点: 第一, 应不断提升经济发展水平, 同时重视 GDP 增长率的变化情况以及人均可支配收入水平; 第二, 注重人民生活水平质量的提升以及社会保障体系的建设, 重视环境开发与保护, 实现环境、经济、社会和谐发展; 第三, 政府积极采取响应措施弥补由于生产、生活行为的消极影响给生态环境系统带来的压力, 目前应加强节约资源和能源、加大节能环保力度、推进清洁生产和循环经济等, 从根本上降低区域生态环境压力, 才能保证二道白河镇生态安全迈向更高的水平。

4.2 讨论

引入物元分析模型对旅游型城镇生态安全进行评价, 基本实现分异及综合指标评价信息的目的。但物元模型要求必须确定评价的经典域及节域, 而目前较多标准和准则中仅有标准等级值, 而并非对应标准等级的量值范围, 因此对于旅游型城镇生态安全评价经典域和节域的界定等问题还有待进一步研究和探讨。同时, 生态系统的动态平衡往往由内力和外力共同确定, 对于旅游型城镇而言, 空间范围尺度明显差别于区域层面(大尺度或中等尺度), 致使其难以构成一个完整的生态系统, 在探究过程中更多的考虑内力影响, 对于外力的影响分析仅做表面探究, 还有待进一步深挖。另外, 由于旅游产业边界模糊, 综合交叉所涉及的内容复杂, 以旅游业为主导产业的旅游型城镇研究过程中很难将因单一原因造成生态环境破坏、环境污染等数据一一剥离, 致使指标体系设定和数据统计工作难度加大, 这将是日后研究与旅游相关的生态安全需面临的挑战。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 郭付友, 吕晓, 于伟, 任嘉敏, 初楠臣. 山东省绿色发展水平绩效评价与驱动机制——基于 17 地市面板数据. 地理科学, 2020, 40(2): 200-210.
- [4] 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.
- [5] 庞雅颂, 王琳. 区域生态安全评价方法综述. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 340-344.
- [6] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [7] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [8] 翁钢民, 潘越, 李凌雁. 基于改进 DPSIR-DS 模型的旅游生态安全等级测度及时空演变分析——以“丝绸之路”沿线五省区为例. 旅游科学, 2018, 32(6): 17-32.
- [9] 张建清, 张岚, 王嵩, 范斐. 基于 DPSIR-DEA 模型的区域可持续发展效率测度及分析. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 1-9.
- [10] 王磊, 郭灿, 李慧明. 基于 PSR-TOPSIS 模型的宁夏回族自治区土地生态安全评价. 水土保持研究, 2016, 23(6): 154-159.
- [11] 柯小玲, 向梦, 冯敏. 基于灰色聚类法的长江经济带中心城市生态安全评价研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(11): 1734-1742.
- [12] 黄烈佳, 杨鹏. 长江经济带土地生态安全时空演化特征及影响因素. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1780-1790.
- [13] 吕亚玲, 李巧云. 基于改进 PSR 模型的洞庭湖区生态安全评价及主要影响因素分析. 农业现代化研究, 2021, 42(1): 132-141.
- [14] Gari S R, Newton A, Icely J D. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. Ocean & Coastal Management, 2015, 103: 63-77.
- [15] Ehara M, Hyakumura K, Sato R, Kurosawa K, Araya K, Sokh H, Kohsaka R. Addressing maladaptive coping strategies of local communities to changes in ecosystem service provisions using the DPSIR framework. Ecological Economics, 2018, 149: 226-238.
- [16] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 康俊峰. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究. 生态学报, 2021, 41(1): 302-319.
- [17] 王大海, 张荣群, 艾东, 孙玮健. 基于 EES-PSR 的土地生态安全物元模型评价方法实证研究. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 228-237.

- [18] 马金涛, 苗红, 温胜强, 卜新春. 基于 P-S-R 模型的甘肃省旅游生态安全时空格局演变. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2020, 35(3): 118-124.
- [19] 赵文祯, 韩增林, 闫晓露, 钟敬秋. 基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建——以大连市瓦房店为例. 自然资源学报, 2020, 35(3): 546-562.
- [20] 刘晓阳, 曾坚, 贾梦圆, 张森. 闽三角城市群生态安全格局构建及城镇扩展模拟. 生态学报, 2020, 40(21): 7873-7885.
- [21] 魏黎灵, 李岚彬, 林月, 吴仪, 祁新华. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价. 生态学报, 2018, 38(12): 4317-4326.
- [22] 何刚, 王雯雯, 夏业领, 朱艳娜. 基于正态云模型的区域生态安全评价. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 807-813.
- [23] 王毅, 魏江超, 孙启元, 王菲凤. 基于 ARIMA-ANN 模型的生态安全评价及预测——以河西走廊城市群为例. 生态学杂志, 2020, 39(1): 326-336.
- [24] 何刚, 金兰, 朱艳娜. 基于云物元的合肥市生态安全评价及生态阻力分析. 地域研究与开发, 2020, 39(6): 171-176.
- [25] 黄和平, 杨宗之. 基于 PSR-熵权模糊物元模型的森林生态安全动态评价——以中部 6 省为例. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11): 42-51.
- [26] 曹秉帅, 邹长新, 高吉喜, 何萍. 生态安全评价方法及其应用. 生态与农村环境学报, 2019, 35(8): 953-963.
- [27] 张凤太, 王腊春, 苏维词. 基于物元分析-DPSIR 概念模型的重庆土地生态安全评价. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3126-3134.
- [28] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1990—2018 年海南岛湿地景观生态安全格局演变. 生态环境学报, 2020, 29(2): 293-302.
- [29] 苏凯, 王茵然, 孙小婷, 岳德鹏. 基于 GIS 与 RS 的东北森林带景观格局演变与模拟预测. 农业机械学报, 2019, 50(12): 195-204.
- [30] 赵宏波, 马延吉. 基于变权-物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究——以吉林省为例. 生态学报, 2014, 34(16): 4720-4733.
- [31] 朱婧, 孙新章, 何正. SDGs 框架下中国可持续发展评价指标研究. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(12): 9-18.
- [32] 文博, 魏微, 王杰才, 尚英男, 江沂璟, 王琴, 李琳. 环境绩效评估中多种赋权方法的对比分析. 环境保护科学, 2020, 46(1): 41-46.
- [33] 吕广斌, 廖铁军, 姚秋昇, 邓薇. 基于 DPSIR-EES-TOPSIS 模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异. 水土保持研究, 2019, 26(6): 249-258, 266-266.
- [34] 杨建宇, 张欣, 李鹏山, 欧聪, 马瑞明, 朱德海. 基于物元分析的区域土地生态安全评价方法研究. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 238-246.
- [35] 陈伊多, 杨庆媛, 杨人豪, 曾黎. 基于熵权物元模型的土地生态安全评价——重庆市江津区实证. 干旱区地理, 2018, 41(1): 185-194.