·调查与评价·

滇中地区土地生态安全与经济发展耦合协调分析

陈艳梅,马月伟*,张盛蓝,桂雅丽
(西南林业大学水土保持学院,云南　昆明　650224)

摘　要:以滇中地区为研究区域,采用 DPSIR、障碍度、耦合协调度模型对 2012—2022 年滇中地区土地生态安全与经济发展的耦合协调关系进行分析。结果表明:2012—2022 年滇中地区土地生态安全呈现倒“V”型波动,安全等级由临界状态(Ⅳ)升至安全(Ⅱ)又下降到较安全(Ⅲ),空间分布呈现“中部高、四周低”逐渐向“中部低、两侧高”的变化趋势,区内障碍度较大子系统为驱动力和状态子系统。2012—2022 年滇中地区经济发展综合指数总体呈现上升趋势,平均年增长率为 15.4%,土地生态安全与经济发展耦合协调等级由接近协调(Ⅴ)上升到良好协调(Ⅱ),空间分布呈现“中部高、四周低”向“中部低、四周较高”的变化趋势。

关键词:土地生态安全;经济发展;DPSIR 模型;耦合协调度模型;障碍度模型;滇中地区
中图分类号:X22;X913　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1006-2009(2026)03-0043-09

Analysis on Coupling Coordination between Land Ecological Security and Economic Development in Central Yunnan Region

CHEN Yanmei, MA Yuewei*, ZHANG Shenglan, GUI Yali
(*College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650224, *China*)

Abstract: Taking the central Yunnan region as the study area, this paper employed DPSIR model, obstacle degree model and coupling coordination degree model to analyze the coupling coordination relationship between land ecological security and economic development in central Yunnan region from 2012 to 2022. The results showed that from 2012 to 2022, the land ecological security in central Yunnan region exhibited an inverted “Ⅴ”-shaped fluctuation, with the security level rising from critical state (Level Ⅳ) to safe (Level Ⅱ) and then declining to relatively safe (Level Ⅲ). The spatial distribution showed a gradual shift from a pattern of “high in the center and low in the periphery” to “low in the center and high on both sides”. The subsystems with a relatively high obstacle degree in the region were the driving force subsystem and the state subsystem. From 2012 to 2022, the comprehensive economic development index of central Yunnan region showed an overall upward trend, with an average annual growth rate of 15.4%. The coupling coordination level between land ecological security and economic development rose from close to coordination (Level Ⅴ) to good coordination (Level Ⅱ), and the spatial distribution showed a changing trend from “high in the center and low in the periphery” to “low in the center and relatively high in the periphery”.

Key words: Land ecological security; Economic development; DPSIR model; Coupling coordination model; Obstacle degree model; Central Yunnan region

生态安全被认为是可持续发展的基石,是人类社会可持续发展追求的目标之一[1],而实施土地的永续利用则是国民经济与社会可持续发展中至关重要的环节[2]。21 世纪初,我国学者梁留科等[3]、王楠君等[4]开展的研究为推动土地资源的

收稿日期:2025-01-08;**修订日期**:2026-02-26
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41201587);云南省教育厅科学研究基金资助项目(2024Y598)
作者简介:陈艳梅(2000—),女,云南昭通人,在读研究生,研究方向为区域生态。
*通信作者:马月伟,副教授 E-mail: mayuewei007@126.com

可持续利用、保障生态安全提供了理论支持与实践指导。评价研究作为土地生态安全研究的重要内容[5],主要集中在评价尺度、评价指标体系、评价方法上。在评价尺度方面,研究多依据我国省、市、县 3 级行政区划,将评价尺度划分为宏观、中观、微观 3 个层次,如对山东省[6]、湖南省[7]、重庆市[8]、乌鲁木齐市[9]、诏安县[10]等的分析;在构建评价指标体系方面以模型为主,如 PSR 模型[11]、DPSIR 模型[12]、EES 模型[13]等;在评价方法方面主要涉及灰色关联度[14]、TOPSIS[15]、物元分析[16]等,而对于空间上的关联性与聚集特征分析则较少。随着地理信息系统(GIS)、遥感(RS)等技术在土地生态安全评估中被广泛应用,土地生态安全的空间分析与检测精度显著提升,其空间变化特征得以进一步揭示,评价的科学性和准确性亦随之提高[17-18]。大量研究聚焦于土地生态安全,运用不同的模型和指标探讨土地生态安全的变化情况,而土地生态安全与经济发展之间存在密切且复杂的关系,针对二者关系的研究则相对较少[19-20]。

土地生态安全不仅关乎资源永续利用与生态系统稳定,更与区域经济发展密切相关[21]。保护和恢复生态系统健康有助于降低环境风险、提升区域竞争力,为可持续发展奠定基础。因此,加强区域土地生态安全评估及其与经济发展的耦合协调分析尤为重要。滇中地区作为云南省经济的核心增长极,人口、耕地高度集中,正面临着土地资源压力与生态承载力失衡、生物多样性潜在丧失、水资源短缺与水质危机等严峻生态环境挑战,这些问题与区域发展密切相关,而生态环境保护则是实现区域持续发展的基础[22]。现有关于滇中地区的研究多集中于景观生态风险[23-24]、生态安全格局构建[25-26]及生态系统服务评估层面[27-28],直接以滇中地区为研究区、系统探讨土地生态安全与经济发展耦合协调关系的研究尚不多见。今以滇中地区为研究对象,运用 DPSIR 模型、障碍度模型及耦合协调度模型,对 2012—2022 年滇中地区土地生态安全状况进行评价,并分析其与经济发展的耦合协调关系,旨在为促进土地资源合理保护与利用、推动经济可持续发展提供技术支持。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

滇中地区由昆明市、曲靖市、玉溪市和楚雄彝族自治州(以下简称楚雄州)4 个城市组成,见图 1。该地区地处长江、珠江和红河上游,拥有滇池、抚仙湖等高原湖泊,总面积约 9.5×10^4 km^2,占云南省土地面积的 24%。滇中地区属滇东高原盆地,地势和缓,以山地、山间盆地为主。亚热带季风气候下干湿分明、光照充裕、四季如春,极利于农业与旅游业发展。截至 2023 年,滇中地区总人口达到 1 889.5 万人,占云南省总人口的 40.43%。经济发展方面,滇中地区 GDP 占全省总量的 1/2 左右,是云南省经济核心区和发展的重要引擎。

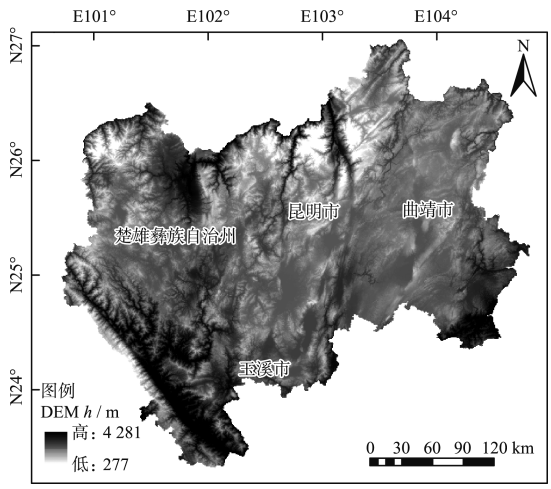

图 1　研究区地理位置

Fig. 1　Geographic location of the study area

1.2　数据来源

研究所需的经济、人口、农业、工业、资源环境等数据来源于 2013—2023 年《云南统计年鉴》;部分补充数据来源于各市统计年鉴及各市国民经济和社会发展统计公报等。

1.3　研究方法

1.3.1　数据归一化处理

由于原始数据的单位和性质不同、指标的正负向性质不同,需要对数据作归一化处理[29],见公式(1)(2)。

$$\text{正向指标:}R_{ij}=\frac{X_{ij}-\min X_j}{\max X_j-\min X_j} \tag{1}$$

$$\text{逆向指标:}R_{ij}=\frac{\max X_j-X_{ij}}{\max X_j-\min X_j} \tag{2}$$

式中:X_{ij} 为第 j 项指标第 i 年的实际值;$i=1,2,\cdots,m$ 代表年份;$\max X_j$ 和 $\min X_j$ 分别为第 j 项指标在研究时段内的最大值和最小值;R_{ij} 为第 j 项指

标第 i 年的标准化后值。

1.3.2　熵权法计算权重

目前,权重的确定主要分为主观和客观两种。主观包括主观经验法、专家调查法,该类方法更多依赖于决策者的经验判断,主观赋权会增加人为干扰因素,削弱权重确定的科学性;客观主要有熵权法、层次分析法(AHP)、因子分析等方法,该类方法侧重于利用数据本身的信息进行客观赋权。今采用熵权法确定指标权重,具体计算步骤如下。

计算第 j 项指标在第 i 年的指标比例 F_{ij}:

$$F_{ij}=\frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}R_{ij}} \tag{3}$$

计算第 j 项指标的熵值 P_j:

$$P_j=-K\times\left(\sum_{i=1}^{m}F_{ij}\times\ln F_{ij}\right) \tag{4}$$

式中:K 是一个与样本数量相关的常数,$K=\frac{1}{\ln N}$(N 为样本时间尺度或地点数);当 $F_{ij}=0$ 时,令 $F_{ij}\times\ln F_{ij}=0$。

计算第 j 项指标权重 W_j:

$$W_j=\frac{1-P_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-P_j)} \tag{5}$$

1.3.3　构建评价指标体系

(1)土地生态安全评价指标。采用 DPSIR 模型构建土地生态安全评价指标体系,结合滇中地区生态系统特征、人口和经济发展等因素并参考相关文献[30-31],选取 19 个指标进行评价(见表 1)。

表 1　滇中地区土地生态安全评价指标体系

Table 1　Evaluation indicator system for land ecological security in central Yunnan region

准则层	指标层	指标性质	准则层	指标层	指标性质
驱动力(D)	城镇化率(A1),%	−		水资源总量(A11),亿 m^3	+
	人口密度(A2),人/km^2	−	影响(I)	人均粮食产量(A12),kg/人	+
	人口自然增长率(A3),‰	−		单位面积粮食产量(A13),kg/hm^2	+
压力(P)	农用化肥负荷(A4),kg/hm^2	−		人均绿地公园面积(A14),m^2/人	+
	农药负荷(A5),kg/hm^2	−		第一产业比例(A15),%	−
	废水排放总量(A6),万 t	−	响应(R)	造林面积(A16),万 hm^2	+
	工业二氧化硫排放量(A7),万 t	−		建成区绿化覆盖率(A17),%	+
状态(S)	人均耕地灌溉面积(A8),m^2/人	+		污水处理率(A18),%	+
	年平均气温(A9),℃	+		工业固体废物处置率(A19),%	+
	年降水量(A10),mm	+			

(2)经济发展评价指标。经济发展是一个综合性的概念,涵盖了经济结构、产出规模、居民生活水平、社会福利、科技创新等多个方面的进步和提高。考虑滇中地区经济发展情况并结合相关文献[19-20,32],选取 12 个指标来评价经济发展水平(见表 2)。

表 2　滇中地区经济发展水平评价指标体系

Table 2　Evaluation indicator system for economic development level in central Yunnan region

评价指标	指标性质	评价指标	指标性质
地区生产总值(B1),亿元	+	人均 GDP(B7),元/人	+
地方财政收入(B2),亿元	+	GDP 增长率(B8),%	+
就业率(B3),%	+	城镇居民家庭人均可支配收入(B9),元/人	+
开发新产品经费(B4),亿元	+	农村居民家庭人均可支配收入(B10),元/人	+
第二产业比例(B5),%	+	社会消费品零售总额(B11),亿元	+
第三产业比例(B6),%	+	年夜间灯光指数总和(B12),无量纲	+

1.3.4　综合评价指数法

综合评价指数法是一种常用的评价方法,通过将多个指标进行加权综合,得出一个综合评价指数,用以反映土地生态安全和经济发展综合值。土

地生态安全指数计算公式如下：

$$E_i = \sum_{j=1}^{n} W_j \times R_{ij} \quad (6)$$

式中：E_i 为第 i 年土地生态安全指数；W_j 为第 j 项评价指标权重；R_{ij} 为第 j 项指标第 i 年的标准化后值。

根据滇中地区土地生态安全评价结果和区域实际情况，结合已有的研究成果[33-34]，将 E_i 分为 5 个土地生态安全等级。其中，$0 \leqslant E_i \leqslant 0.2$ 为较不安全（Ⅴ）；$0.2 < E_i \leqslant 0.4$ 为临界状态（Ⅳ）；$0.4 < E_i \leqslant 0.6$ 为较安全（Ⅲ）；$0.6 < E_i \leqslant 0.8$ 为安全（Ⅱ）；$0.8 < E_i \leqslant 1$ 为理想安全（Ⅰ）。

第 i 年经济发展综合指数（G_i）的计算参照公式(6)进行。

1.3.5　障碍度模型

考虑到土地生态安全和经济发展受多重因素影响，且各因素作用程度各异，文中引入障碍度模型定量识别各指标对评价结果的制约程度[35-36]，进而揭示影响滇中地区土地生态安全和经济发展的主要障碍因子。土地生态安全和经济发展的综合障碍度计算公式如下：

$$M_{ij} = \frac{V_{ij} \times W_j}{\sum_{j=1}^{n} V_{ij} \times W_j} \times 100\% \quad (7)$$

$$V_{ij} = 1 - R_{ij} \quad (8)$$

式中：M_{ij} 为第 j 项指标在第 i 年对土地生态安全或经济发展的障碍度；W_j 为第 j 项评价指标权重；n 为评价指数总个数；R_{ij} 为第 j 项指标第 i 年的标准化后值。

1.3.6　耦合协调度模型

耦合协调度模型常被用于评价多个系统间的相互作用与协调程度。今借助该模型分析区域土地生态安全与经济发展的耦合协调关系，计算公式如下[37-38]：

$$C_i = \left[\frac{E_i \times G_i}{\left(\frac{E_i + G_i}{2} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$D_i = (C_i \times T_i)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$T_i = \alpha \times E_i + \beta \times G_i \quad (11)$$

式中：E_i 和 G_i 分别为土地生态安全指数和经济发展综合指数；C_i 为耦合度，$C_i \in [0,1]$；D_i 为耦合协调度，$D_i \in [0,1]$；T_i 为综合协调度；α 和 β 为待定系数，根据两个系统的重要程度进行取值，本研究视土地生态安全与经济发展同等重要，故均取值为 0.5。结合相关研究[39-40]和实际情况，将耦合协调度划分为 10 个等级（见表 3）。

表 3　耦合协调度等级划分

Table 3　Classification of coupling coordination degree levels

耦合协调度	协调等级	耦合协调度	协调等级
$0 \leqslant D \leqslant 0.099$	极度失调（Ⅹ）	$0.499 < D \leqslant 0.599$	接近协调（Ⅴ）
$0.099 < D \leqslant 0.199$	严重失调（Ⅸ）	$0.599 < D \leqslant 0.699$	初步协调（Ⅳ）
$0.199 < D \leqslant 0.299$	中度失调（Ⅷ）	$0.699 < D \leqslant 0.799$	中度协调（Ⅲ）
$0.299 < D \leqslant 0.399$	轻度失调（Ⅶ）	$0.799 < D \leqslant 0.899$	良好协调（Ⅱ）
$0.399 < D \leqslant 0.499$	濒临失调（Ⅵ）	$0.899 < D \leqslant 1$	优质协调（Ⅰ）

2　结果与讨论

2.1　土地生态安全综合分析

2.1.1　土地生态安全变化分析

2012—2022 年滇中地区土地生态安全综合指数和等级空间分布分别见表 4 和图 2(a)—(d)。由表 4 可知，2012—2022 年滇中地区土地生态安全综合指数呈现倒“V”型波动，安全水平整体较初始评估年份有明显提升，表明滇中地区以加强生态保护、优化土地利用、促进绿色发展为核心，通过一系列措施有效地提升了区域生态环境质量。研究期间滇中地区土地生态安全等级由临界状态（Ⅳ）升至安全（Ⅱ）又下降到较安全（Ⅲ）状态。其中，土地生态安全综合指数最大值为 2021 年的 0.616（Ⅱ），最小值为 2013 年的 0.317（Ⅳ）。刘娇等[31]的研究表明，云南省土地生态安全综合值整体呈逐年提高的态势，这与本研究结果相吻合，也印证了文中结论的可靠性。从各市（州）土地生态安全综合指数看，除昆明市整体较为稳定、未见明显波动外，其余市（州）均呈上升趋势。在 4 个市（州）中土地生态安全综合指数最大值为 0.731

(Ⅱ),出现在 2022 年曲靖市,最小值为 0.236(Ⅳ),出现在 2013 年曲靖市,曲靖市土地生态安全综合指数变化最大,也从侧面反映出曲靖市积极响应环境政策、落实全国资源性城市可持续发展规划。由图 2 可见,2012—2022 年滇中地区土地生态安全等级的空间格局呈现由“中部高、四周低”向“中部低、两侧高”变化的趋势。分区域来看,东部土地生态安全等级由临界状态(Ⅳ)稳步提升至安全状态(Ⅱ);中部经历了由较安全(Ⅲ)下降至临界状态(Ⅳ)再回升至较安全(Ⅲ)的波动过程,整体变化幅度较小;西部从较长时间的临界状态(Ⅳ)跃升至安全状态(Ⅱ),实现跨越式增长。

表 4　2012—2022 年滇中地区土地生态安全综合指数

Table 4　Comprehensive index of land ecological security in central Yunnan region from 2012 to 2022

区域	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
研究区	0.358	0.317	0.356	0.350	0.339	0.401	0.361	0.384	0.482	0.616	0.594
昆明市	0.475	0.448	0.496	0.485	0.467	0.519	0.402	0.368	0.409	0.428	0.444
曲靖市	0.296	0.236	0.241	0.306	0.261	0.364	0.410	0.491	0.526	0.709	0.731
玉溪市	0.361	0.274	0.405	0.305	0.299	0.365	0.308	0.367	0.440	0.603	0.532
楚雄州	0.299	0.311	0.282	0.302	0.327	0.356	0.323	0.309	0.552	0.724	0.670

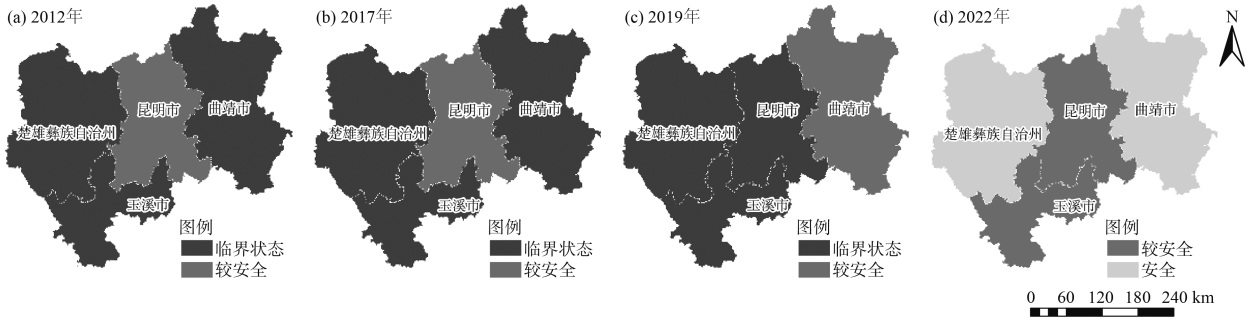

图 2　2012—2022 年滇中地区土地生态安全等级空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of land ecological security levels in central Yunnan region from 2012 to 2022

基于熵权法计算得出滇中地区土地生态安全评价指标权重,见表 5。指标的权重越大,表明其在评估土地生态安全中起到的作用越大。由表 5 可知,昆明市的土地生态安全评价指标 A3、A8、A11、A12 的权重均 > 0.06;曲靖市的土地生态安全评价指标 A3、A4、A5、A9、A14、A19 的权重均 > 0.06;玉溪市的土地生态安全评价指标 A2、A3、A4、A5、A14、A19 的权重均 > 0.06;楚雄州的土地生态安全评价指标 A1、A2、A3、A9、A10 的权重均 > 0.06。

表 5　滇中地区土地生态安全评价指标权重

Table 5　Weights of land ecological security evaluation indicators in central Yunnan region

指标	昆明市	曲靖市	玉溪市	楚雄州	指标	昆明市	曲靖市	玉溪市	楚雄州
A1	0.042	0.047	0.046	0.063	A11	0.144	0.027	0.031	0.036
A2	0.043	0.055	0.074	0.128	A12	0.087	0.023	0.022	0.024
A3	0.087	0.100	0.136	0.095	A13	0.050	0.041	0.035	0.036
A4	0.045	0.085	0.078	0.055	A14	0.041	0.073	0.102	0.048
A5	0.030	0.061	0.064	0.053	A15	0.026	0.056	0.051	0.022
A6	0.053	0.036	0.047	0.051	A16	0.050	0.023	0.036	0.038
A7	0.033	0.055	0.037	0.048	A17	0.019	0.037	0.021	0.023
A8	0.095	0.048	0.041	0.043	A18	0.045	0.041	0.025	0.041
A9	0.041	0.076	0.040	0.084	A19	0.031	0.074	0.067	0.049
A10	0.038	0.042	0.047	0.063					

滇中各市(州)的高权重指标构成呈现显著的空间异质性,映射出不同地理单元在资源禀赋、产业特征及生态治理路径上的差异。其中,昆明市的高权重指标集中于人口压力与水土资源保障等方面,这表明昆明市作为滇中核心增长极,其土地生态安全格局可能主要受制于快速城镇化进程中的人口集聚与有限水土资源之间的矛盾;而曲靖市的高权重指标则聚焦于农业化学品投入强度与环境响应等维度,这揭示了曲靖市作为滇东重化工业基地与传统农业大市,其土地生态系统在一定程度上长期承受着工业“三废”与农业面源污染的双重压力;玉溪市的高权重指标波动特征具有鲜明的高原湖泊保护导向,这些指标的高权重在一定程度上反映了围绕高原湖泊实施的“退人、退房、退田”等强力生态红线管控所产生的数据波动;而楚雄州的高权重指标则兼具自然与社会双重属性,这在一定程度上反映出该区域土地生态安全既深受干热河谷本底脆弱性及极端干旱气候频发的自然约束,又与研究时段内快速城镇化所带来的土地利用剧烈转型密切相关,呈现出“自然-社会”复合驱动特征。

2.1.2　土地生态安全障碍度分析

基于障碍度模型对 2012—2022 年滇中地区土地生态安全子系统障碍度进行测度,结果分别见图 3(a)—(d)。由图 3 可见,2012—2022 年滇中地区各市(州)的主要障碍子系统呈现显著差异。

昆明市主要障碍因素来自 S 子系统,其障碍度 2013 年达到最高值,为 44%,该子系统涵盖生态本底与资源禀赋等相关指标。昆明城市化进程加速导致耕地资源被大量挤压,人均耕地灌溉面积缩减;同时,作为资源型缺水城市,其水资源总量年际波动剧烈,加之气温升高与降水变率增大等因素叠加,使得 S 子系统处于高度不稳定状态,成为生态安全的主要胁迫源。

曲靖市属于多系统复合胁迫,S 子系统表现尤为突出。除 R 子系统外,其余子系统均构成土地生态安全的显著障碍,其中 S 子系统障碍度 2022 年达到最高值,为 43%。曲靖市作为滇东传统农业大市和重化工业基地,S 子系统的高障碍度可能与耕地质量退化、农业面源污染累积效应密切相关。

玉溪市主要障碍来自 D 子系统和 I 子系统,D 子系统障碍度 2019 年达到最高值,为 38%,I 子系统障碍度 2021 年达到最高值,为 40%,玉溪市属于典型的发展驱动与生态影响交互制约型。

楚雄州主要障碍因素来自 D 子系统和 S 子系统,D 子系统障碍度 2019 年达到最高值,为 41%,S 子系统障碍度 2022 年达到最高值,为 47%,这也从侧面反映出社会经济发展驱动与自然生态本底脆弱性的复合作用。

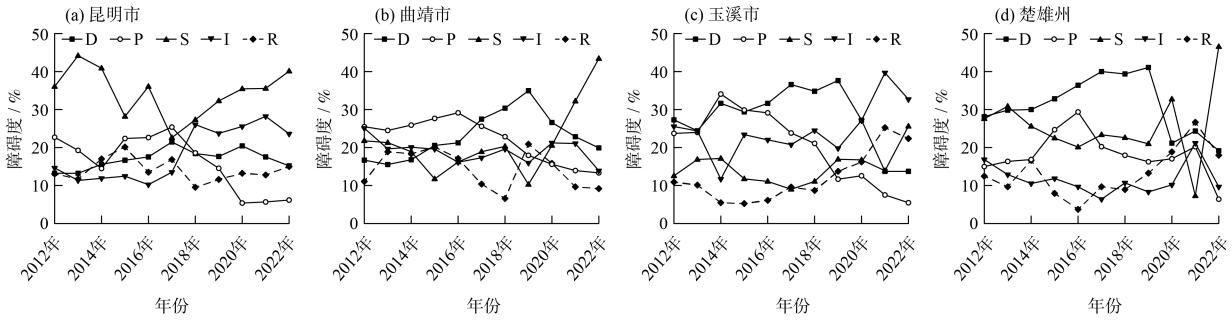

图 3　2012—2022 年滇中地区土地生态安全子系统障碍度

Fig. 3　Obstacle degrees of land ecological security subsystems in central Yunnan region from 2012 to 2022

2.2　经济发展综合分析

表 6 为 2012—2022 年滇中地区经济发展综合指数。由表 6 可知,2012—2022 年滇中地区经济发展综合指数总体呈现上升趋势,其最大值为 2022 年的 0.729,最小值为 2012 年的 0.200,2022 年经济发展综合指数同比 2012 年增长 264.5%,平均年增长率为 15.4%。其中,2018—2019 年增长最快,年增长率为 46.4%。

从各市(州)经济发展综合指数看,整体上均呈现波动上升趋势。在 4 个市(州)中经济发展综

合指数最大值为 0.800,出现在 2021 年的玉溪市;最小值为 0.133,出现在 2012 年的玉溪市。2019 年 4 个市(州)的经济发展综合指数较 2018 年均有显著增长,增长率均超 40%。2012—2022 年玉溪市经济发展综合指数年均增长率达到 21.3%,为 4 个市(州)中最高,表明玉溪市在经济实力、产业发展、区域影响和社会发展等方面具有显著的优势和潜力。

表 6　2012—2022 年滇中地区经济发展综合指数

Table 6　Comprehensive index of economic development in central Yunnan region from 2012 to 2022

区域	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
研究区	0.200	0.239	0.209	0.272	0.358	0.431	0.442	0.647	0.555	0.699	0.729
昆明市	0.304	0.320	0.227	0.292	0.348	0.445	0.424	0.601	0.503	0.601	0.664
曲靖市	0.214	0.248	0.180	0.245	0.327	0.405	0.406	0.613	0.566	0.731	0.775
玉溪市	0.133	0.228	0.249	0.301	0.347	0.398	0.455	0.684	0.655	0.800	0.798
楚雄州	0.149	0.159	0.182	0.251	0.409	0.475	0.483	0.689	0.496	0.663	0.678

借助障碍度模型进一步识别滇中地区经济发展面临的主要制约因子,2012—2022 年各市(州)经济发展障碍度排名前 4 的指标见表 7。由表 7 可知,2012—2022 年滇中地区阻碍经济发展的关键指标虽然存在显著的市域差异,但 B12 指标在所有市(州)中均表现出高障碍度,构成了 2012—2022 年期间制约滇中地区经济发展的共性关键因子。B12 指标在各市(州)持续呈现高障碍度,主要源于滇中地区年夜间灯光指数在空间上高度不均衡,且在长时间尺度上相对滞后,同时也深刻揭示了单中心极化发展模式对区域整体经济发展的制约效应。

表 7　2012—2022 年滇中地区经济发展障碍度排名前 4 的指标

Table 7　Top 4 indicators of obstacle degree for economic development in central Yunnan region from 2012 to 2022

区域	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
昆明市	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B5	B8
	B1	B1	B3	B8	B8	B3	B3	B3	B8	B8	B5
	B10	B10	B8	B1	B1	B8	B8	B5	B5	B12	B3
	B11	B8	B1	B10	B3	B5	B5	B10	B3	B3	B2
曲靖市	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B5
	B7	B7	B7	B7	B5	B5	B5	B5	B5	B5	B3
	B1	B1	B1	B5	B7	B7	B7	B7	B3	B3	B8
	B11	B4	B5	B1	B1	B1	B1	B1	B7	B8	B2
玉溪市	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B5
	B4	B11	B4	B4	B4	B4	B11	B5	B5	B5	B3
	B11	B4	B11	B11	B11	B11	B4	B7	B4	B3	B2
	B7	B7	B7	B7	B7	B7	B7	B4	B7	B8	B8
楚雄州	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B12	B3
	B3	B3	B3	B8	B8	B8	B8	B5	B3	B3	B8
	B7	B7	B7	B7	B7	B7	B7	B4	B8	B4	B4
	B1	B1	B8	B3	B5	B5	B4	B7	B5	B8	B6

2.3　土地生态安全与经济发展耦合协调分析

2012—2022 年滇中地区土地生态安全与经济发展耦合协调度及其空间分布分别见表 8 和图 4(a)—(d)。

由表 8 可知,2012—2022 年滇中地区土地生态安全与经济发展耦合协调度由接近协调(Ⅴ)上升到良好协调(Ⅱ),表明此时段土地生态安全与经济发展之间的关系更加密切和协调。该结论与张焱文等[19]针对广东省土地生态安全与经济发展的耦合协调关系的研究结论具有一致性,其同样揭示了二者协调水平逐步提升的态势,从而印证了本研究结论的可靠性与科学性。

从各市(州)来看,2012—2022 年滇中 4 个市(州)土地生态安全与经济发展耦合协调度虽然均

呈现波动上升态势,但协调水平的跃升幅度和稳定性存在显著差异,其中曲靖市的耦合协调度波动幅度最为剧烈。4 个市(州)土地生态安全与经济发展耦合协调度最低值为 0.456(濒临失调),出现在 2014 年曲靖市,最高值为 0.868(良好协调),出现在 2022 年曲靖市。这种极值共存现象也从一定程度上反映曲靖市在研究期内经历了土地生态安全与经济发展关系的深度重塑与阶段性挑战,其耦合协调水平提升是在反复的"失调-修复-协调"过程中实现,而非线性平滑演进。

由图 4 可见,2012—2022 年滇中地区土地生态安全与经济发展耦合协调度呈现明显的空间分异特征,其格局由初期的"中部高、四周低"渐变为"中部低、四周较高"。其中,协调情况跨越最显著的属西部,从濒临失调上升至良好协调,上升了 4 个协调等级;而东部则在接近协调的情况下上升至良好协调,上升了 3 个协调等级。综上所述,2012—2022 年滇中地区耦合协调度呈现稳步提高的趋势,表明土地生态安全与经济发展的协同性不断增强。

表 8　2012—2022 年滇中地区土地生态安全与经济发展耦合协调度

Table 8　Coupling coordination degree between land ecological security and economic development in central Yunnan region from 2012 to 2022

区域	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
研究区	0.517	0.525	0.523	0.555	0.590	0.645	0.632	0.706	0.719	0.810	0.811
昆明市	0.616	0.615	0.579	0.614	0.635	0.693	0.643	0.686	0.673	0.712	0.737
曲靖市	0.502	0.492	0.456	0.523	0.540	0.620	0.639	0.741	0.739	0.848	0.868
玉溪市	0.469	0.500	0.564	0.550	0.568	0.617	0.612	0.708	0.733	0.833	0.807
楚雄州	0.460	0.472	0.476	0.525	0.605	0.641	0.628	0.680	0.723	0.833	0.821

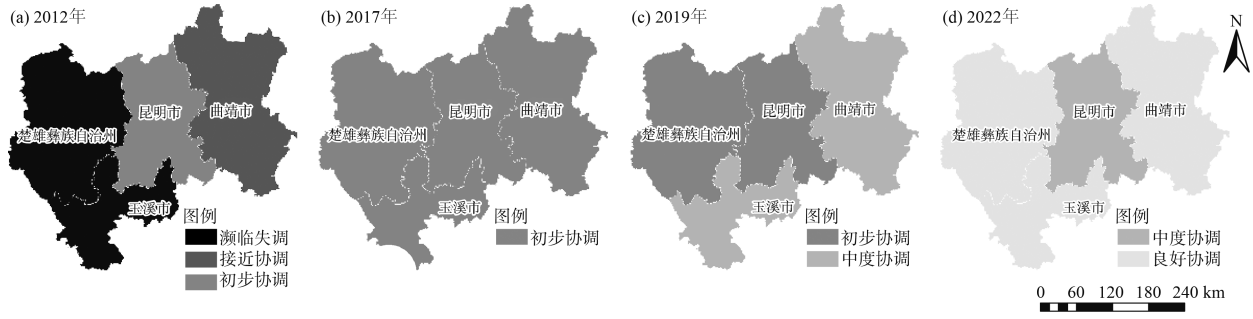

图 4　2012—2022 年滇中地区土地生态安全与经济发展耦合协调度空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of coupling coordination degree between land ecological security and economic development in central Yunnan region from 2012 to 2022

3　结论

(1)2012—2022 年滇中地区土地生态安全呈倒"V"型波动,安全等级由临界状态(Ⅳ)升至安全(Ⅱ)后回落至较安全(Ⅲ),在空间上呈现"中部高、四周低"向"中部低、两侧高"的演替。

(2)2012—2022 年滇中地区经济发展总体呈现上升趋势,2022 年经济发展综合指数较 2012 年增长了 264.5%,平均年增长率为 15.4%;4 个市(州)均呈现波动上升趋势,且 2018—2019 年增长率均超 40%。4 个市(州)年夜间灯光指数总和因子障碍度均较高。

(3)2012—2022 年滇中地区土地生态安全与经济发展耦合协调度总体呈上升趋势,协调等级从接近协调(Ⅴ)上升到良好协调(Ⅱ),在空间上呈现"中部高、四周低"向"中部低、四周较高"的变化趋势。

[参考文献]

[1] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,等. 生态安全研究进展[J]. 生态学报,2005,25(4):861-868.

[2] 马克伟,张巧玲. 土地永续利用和社会经济的可持续发展[J]. 中国土地科学,2001,15(2):1-5.

[3] 梁留科,张运生,方明. 我国土地生态安全理论研究初探[J].

云南农业大学学报,2005,20(6):829-834.
[4] 王楠君,吴群,陈成.城市化进程中土地资源安全评价指标体系研究[J].国土资源科技管理,2006,23(2):28-31.
[5] 吴未,谢嗣频.中国土地生态安全评价研究进展与展望[J].河北农业科学,2010,14(5):99-102.
[6] 黄海,谭晶今,陈春,等.基于 TOPSIS 方法的山东省土地生态安全动态评价[J].水土保持研究,2016,23(3):220-224.
[7] 王文萱,李明孝.基于 DPSIR 的湖南省土地生态安全时空变化[J].生态学杂志,2020,39(8):2724-2736.
[8] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,等.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[J].水土保持研究,2019,26(6):249-258.
[9] 王一山,张飞,陈瑞,等.乌鲁木齐市土地生态安全综合评价[J].干旱区地理,2021,44(2):427-440.
[10] 柳建玲,李胜鹏,范胜龙.脱贫期间诏安县土地生态安全时空演化[J].生态科学,2021,40(4):130-138.
[11] 郑慧玲,王永红,马卫.基于 PSR 模型的珠江三角洲生态环境脆弱性评价[J].水土保持通报,2022,42(4):210-217.
[12] 崔馨月,方雷,王祥荣,等.基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J].生态学报,2021,41(1):302-319.
[13] 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[J].生态学报,2021,41(11):4330-4341.
[14] 杨光明,桂青青,陈也,等.基于灰色关联理论的三峡库区 2015—2019 年生态安全时空演变特征研究[J].水土保持通报,2021,41(5):348-356.
[15] 朱逸凡,何宏,张文静,等.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的长春市水资源脆弱性评价[J].水土保持通报,2022,42(5):174-180.
[16] 郭利刚,冯珍珍,刘庚,等.基于物元模型的汾河流域土地生态安全评价[J].生态学杂志,2020,39(6):2061-2069.
[17] XIE H L,HE Y F,CHOI Y R,et al. Warning of negative effects of land-use changes on ecological security based on GIS[J]. Science of the Total Environment,2020,704:135427.
[18] JIA Q,ZHESSAKOV A. Study on ecological evaluation of urban land based on GIS and RS technology[J]. Arabian Journal of Geosciences,2021,14(261):12517.
[19] 张焱文,王枫.2000—2018 年广东省土地生态安全与经济发展耦合协调分析[J].水土保持研究,2021,28(1):242-249.
[20] 曾艳,廖成浩,罗强煌,等.赣江流域土地生态安全与社会经济发展耦合协调研究[J].环境监测管理与技术,2024,36(4):8-15.
[21] 茹小斌,孙玮健,牛劲达.区域土地生态安全评价研究——以北京市海淀区为例[J].环境与可持续发展,2019,44(6):145-148.
[22] 傅伯杰.区域生态环境预警的原理与方法[J].资源开发与保护,1991,7(3):138-141.
[23] DENG R F,DING X,WANG J L. Landscape ecological risk assessment and spatial pattern evolution analysis of the central Yunnan urban agglomeration from 1995 to 2020 based on land use/cover change[J]. Sustainability,2023,15(24):16641.
[24] WANG S,LIU F L,CHEN W T,et al. Landscape ecological risk evaluation and driving factors in the lake basin of central Yunnan plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(3):391-404.
[25] RAN Y J,LEI D M,LI J,et al. Identification of crucial areas of territorial ecological restoration based on ecological security pattern:A case study of the central Yunnan urban agglomeration,China[J]. Ecological Indicators,2022,143:109318.
[26] 冉玉菊.基于重要性识别的滇中城市群生态用地格局优化研究[D].昆明:云南财经大学,2022.
[27] LIU L F,WANG J L,LI J,et al. Evaluation of ecosystem service capacity using the integrated ecosystem services index at optimal scale in central Yunnan,China[J]. Ecology and Evolution,2025,15(4):71222.
[28] 陈相标,丁文荣,李孝川.滇中城市群土地利用转型及生态系统服务价值交叉敏感性分析[J].水土保持研究,2022,29(6):233-241.
[29] 廖成浩,姚昆,曾艳.安宁河流域土地生态安全动态评价与预测[J].环境监测管理与技术,2022,34(2):27-31.
[30] 张洪,王安琦,宋贝扬.基于 OWA 的大理市土地生态安全评价研究[J].地理科学,2017,37(11):1778-1784.
[31] 刘娇,张超,孙晓莉,等.基于 DPSIR 模型的云南省土地生态安全评价[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(3):113-121.
[32] 杨海菊,梁玉莲,韦锋,等.广西国家重点生态功能区县域生态环境与社会经济协调发展关联分析[J].环境监测管理与技术,2023,35(2):55-59.
[33] 张晓瑶,虞虎,张潇,等.基于多源数据的三江源国家公园土地生态安全综合评价[J].生态学报,2022,42(14):5665-5676.
[34] 张楠楠,石水莲,李博,等.基于“压力-状态-响应”模型的土地生态安全评价及预测——以沈阳市为例[J].土壤通报,2022,53(1):28-35.
[35] 杨振民,刘新平.新疆阿克苏河流域土地生态安全预警演变与时空格局分析[J].生态科学,2021,40(5):129-139.
[36] 刘志有,曲秀武,魏冉,等.生态文明视角下的伊犁河谷绿洲土地生态安全评价及障碍因子诊断[J].水土保持通报,2022,42(1):137-143.
[37] 白芙蓉,陈楠.城市创新与低碳发展耦合协调及预测[J].生态经济,2025,41(6):87-94.
[38] 白祥,张东阳.黄河流域旅游产业发展与生态韧性耦合协调关系研究[J].生态经济,2025,41(12):144-153.
[39] 张韦萍,石培基,尹君锋.兰西城市群土地利用效益时空演变及耦合协调关系[J].生态学杂志,2022,41(11):2226-2235.
[40] 杨清可,段学军,李平星,等.江苏省土地开发度与利用效益的空间特征及协调分析[J].地理科学,2017,37(11):1696-1704.