

# 基于PSR-TOPSIS模型的陇中陇东黄土高原 土地生态安全评价及障碍因子诊断

刘洋豪<sup>1</sup>, 谢保鹏<sup>1</sup>, 陈英<sup>1</sup>, 裴婷婷<sup>1</sup>, 王雯<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学 管理学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 自然资源部土地利用重点实验室甘肃分中心, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** [目的] 分析陇中陇东黄土高原地区土地生态环境的脆弱及复杂性, 对其土地生态安全进行评价和诊断, 为黄土高原地区生态治理提供理论依据。[方法] 以陇中陇东黄土高原区7个州市为研究单元, 基于压力—状态—响应(PSR)模型构建土地生态安全评价指标体系, 采用TOPSIS、熵权法和障碍因子诊断等方法, 探究其2010—2022年土地生态安全状况及影响因素。[结果] ①整体上, 研究区土地生态安全水平呈上升趋势。该区域在2010和2011年的土地生态安全评价等级为Ⅳ级, 之后2012—2022年期间安全等级均为Ⅲ级。时空上, 2010—2022年兰州市土地生态安全水平提升至Ⅱ级, 临夏州、定西市和天水市先后提升至Ⅲ级, 土地生态安全格局呈西高东低。②准则层在2010—2022年压力与状态系统安全评价等级均由Ⅳ级提升至Ⅲ级, 响应系统一直保持为Ⅲ级。③主要障碍因子为地均固定资产投资, 产水模数, 地均二、三产业产值, 有效灌溉面积比, 人均GDP。此外, 人口密度和土地利用率的障碍度逐年递增, 其对土地生态安全的影响力不可忽视。[结论] 陇中陇东黄土高原地区土地生态安全水平整体呈上升趋势, 但仍长期处于“临界安全”状态, 要想进一步提升区域土地生态安全水平, 需重视水土治理强化、产业结构优化和土地利用集约化等问题, 在促进经济发展的同时应继续强化生态保护修复。

**关键词:** 土地生态; 压力—状态—响应(PSR)模型; TOPSIS评价法; 障碍因子; 陇中陇东黄土高原

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2026)01-0130-11

中图分类号: X171.1, X826

**文献参数:** 刘洋豪, 谢保鹏, 陈英, 等. 基于PSR-TOPSIS模型的陇中陇东黄土高原土地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 130-140. Liu Yanghao, Xie Baopeng, Chen Ying, et al. Evaluation of land ecological security and diagnosis of obstacle factors in Loess Plateau of central and eastern Gansu Province based on PSR-TOPSIS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 130-140.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.010

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.010

## Evaluation of land ecological security and diagnosis of obstacle factors in Loess Plateau of central and eastern Gansu Province based on PSR-TOPSIS model

Liu Yanghao<sup>1</sup>, Xie Baopeng<sup>1</sup>, Chen Ying<sup>1</sup>, Pei Tingting<sup>1</sup>, Wang Wen<sup>2</sup>

(1. School of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Branch of Key Laboratory of Land Use, Ministry of Natural Resources, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** [Objective] The fragile and complex of the land ecological environment in the Loess Plateau region of central and eastern Gansu Province were analyzed, and the land ecological security was evaluated and diagnosed, in order to provide a theoretical basis for the ecological management of the Loess Plateau region. [Methods] Taking the seven cities and prefectures in the Loess Plateau of central and eastern Gansu Province as the research units, a land ecological security evaluation indicator system was constructed based on the pressure-state-response (PSR) model. The TOPSIS method, entropy weight method, and obstacle factor diagnosis were then employed to investigate the land ecological security status and influencing factors from 2010 to 2022. [Results] ① Overall, the land ecological security level of the study area showed an upward trend. The land ecological security level of

收稿日期: 2025-06-24

修回日期: 2025-09-09

采用日期: 2025-09-12

资助项目: 甘肃省省级科技计划(重点研发计划): 省级生态文明建设重点研发专项“陇中黄土高原乡村空间生态修复关键技术集成与示范研究”(24YFFA050)

第一作者: 刘洋豪(2000—), 男(汉族), 河南省西峡县人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。Email: 1127802852@qq.com。

通信作者: 陈英(1969—), 男(汉族), 甘肃省武威市人, 博士, 教授, 主要从事土地生态研究。Email: chenying@gsau.edu.cn。

the region was IV in 2010 and 2011, and remained at III in the period of 2012—2022. Spatially and temporally, the land ecological security level of Lanzhou City improved to II in 2010—2022, and Linxia Prefecture, Dingxi City, and Tianshui City successively increased to III, showing a pattern of high security in the west and low in the east. ② At the criterion level, the security evaluation levels of the pressure and state systems both upgraded from IV to III from 2010 to 2022, while the response system consistently remained at III. ③ The main obstacle factors were per-unit fixed asset investment, water yield modulus, per-unit output value of secondary and tertiary industries, proportion of effective irrigated area, and per capita GDP. In addition, the obstacle degrees of population density and land use rate increased year by year, and their effects on land ecological security could not be ignored. [Conclusion] The land ecological security level in the Loess Plateau of central and eastern Gansu Province generally shows an upward trend, but remains in a long-term “critical security” state. To further enhance the regional land ecological security level, attention should be given to issues such as soil and water conservation, optimization of industrial structure, and intensive land use. While promoting economic development, ecological protection and restoration should continue to be strengthened.

**Keywords: land ecology; pressure-state-response (PSR) model; TOPSIS evaluation method; obstacle factor; Loess Plateau of central and eastern Gansu Province**

在中国大力推进生态文明建设,持续完善国土空间治理体系的背景下,土地生态保护治理已然成为国家战略布局中不可或缺的一环。中国共产党第十八次全国代表大会以来,国家高度重视生态环境与土地资源的协调发展,“绿水青山就是金山银山”这一科学论断深入人心,成为各项政策制定与实施的重要指引。土地作为人类赖以生存和发展的生产资料,是生态环境系统的重要组成部分。只有保障土地生态安全,才能为区域生态环境和经济发展创造有利条件,进而实现人与自然和谐共生<sup>[1]</sup>。土地生态安全评价主要通过多学科方法,对特定时空范围内土地生态系统的结构、功能、健康状态及其与自然、环境、经济、社会要素的相互作用进行动态分析与综合评估的过程<sup>[2-4]</sup>。

土地生态安全评价已成为土地生态研究领域的热点之一,国内外学者在此方面取得了一定进展。研究尺度上,涵盖省<sup>[5]</sup>、市<sup>[6]</sup>、县<sup>[7]</sup>、城市群<sup>[8]</sup>、河流域等<sup>[9]</sup>区域范围,多从其中选取典型案例,注重不同尺度的多重转换,并结合相关统计、多源数据和政策材料,探究土地生态空间分异规律,识别评价单元的障碍因子。评价指标体系上,多选择PSR(压力—状态—响应),DPSIR(驱动力—压力—状态—影响—响应),DSR(驱动力—状态—响应),NES(自然—经济—社会)和EES(环境—经济—社会)等模型构建评价指标体系<sup>[10-13]</sup>,根据其研究区域自然、社会、经济等多方面条件筛选评价指标开展评价。评价方法上,广泛运用RS-GIS<sup>[14]</sup>、TOPSIS评价法<sup>[15]</sup>、物元模型法<sup>[16]</sup>、BP神经网络模型<sup>[17]</sup>和GM灰度预测模型等<sup>[18]</sup>多种数学模型进行综合评估预测。在研究内容上,学者们从多个角度进行了安全评估,包括土地生

态风险<sup>[19]</sup>、土地生态敏感性<sup>[20]</sup>、土地生态健康<sup>[21]</sup>、土地生态脆弱性<sup>[22]</sup>和土地生态服务价值<sup>[23]</sup>。目前,张楠楠等<sup>[6]</sup>、于潇等<sup>[8]</sup>、王大海等<sup>[12]</sup>、杨振民等<sup>[13]</sup>、王洋等<sup>[15]</sup>、郭利刚等<sup>[16]</sup>分别从沈阳市、京津冀城市群、哈尔滨市、新疆阿克苏河流域、郑州市、汾河流域进行土地生态安全评价。黄土高原是生态环境脆弱区,对黄土高原“陇中陇东”地区进行土地生态安全评价的研究未见报道。学者们为生态评价提供了多种思路和方法,但现有的指标体系仍存在不完整、适用性低的问题。

陇中陇东黄土高原是黄土高原地区最典型的地貌类型和空间单元。该区域自然地理条件既复杂又脆弱,但同时既是中国西北内陆地区的人口、经济、文化中心,又是西北地区重要的耕地保护区。近年来,由于城镇建设用地无序扩张、土地资源过度开发,生态系统退化,地质灾害频繁,水土流失等资源环境问题,已经成为该区经济与社会可持续发展的严重障碍,在此背景下,对该地区土地生态安全进行评价诊断,不仅有利于提高区域土地生态环境,实现土地生态高质量可持续发展,还可为黄土高原地区生态治理与决策提供理论依据。因此,本文基于PSR模型构建土地生态安全评价指标体系,采用TOPSIS评价模型、熵权法和障碍因子诊断等模型方法,探究陇中陇东黄土高原2010—2022年土地生态安全及影响因子,精准识别土地生态问题,以期揭示陇中陇东黄土高原土地生态的发展规律,为黄土高原地区构建绿色国土空间格局提供支撑。

## 1 研究区概况

陇中陇东地区地处黄土高原西部,甘肃省中东

部,处于多省区交界地带。以南北向的六盘山脉为界,以东为陇东黄土高原沟壑区,以西为陇中黄土丘陵沟壑区,地势总体起伏较大。该区包括兰州、白银、定西、天水、平凉、庆阳、临夏7个市州,面积约 $1.15 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。截至2022年年底,研究区GDP总量达7 423.29亿元,常住人口约1 748.25万人。研究区由于长期受自然环境侵蚀,地形地貌沟壑纵横,水土流失严重。

## 2 数据来源

本研究土地生态评价指标数据主要来源于中国统计年鉴(2010—2022年)、甘肃省统计年鉴(2010—2022年)、甘肃农村年鉴(2010—2022年)、甘肃省水土保持公报(2010—2022年),其中部分指标数据可直接从统计年鉴中查到,其余则根据已有数据计算得出。水土流失综合治理面积等指标个别年份存在数据缺失,为保证数据准确性与完整性,本文采用前后2 a的平均值进行填补。

## 3 研究方法

### 3.1 评价指标体系构建

PSR模型于1990年由联合国经济合作开发署(OECD)提出用于测算生态安全,主要用于研究人类活动与生态系统之间的相互关系<sup>[7]</sup>。EES模型则是在可持续发展理念不断深化以及对复杂系统综合分析需求日益增长的背景下逐步发展形成的<sup>[24]</sup>。将PSR模型与环境-经济-社会(EES)复杂系统理论进行有机融合后,能够更加全面、系统地评估区域的土地生态安全水平。基于科学严谨性、综合性、层次性、空间性和数据可得性等原则,通过PSR-EES模型构建了压力、状态和响应3个维度的指标体系,并参考前人相关研究<sup>[12,15,25]</sup>从环境、经济、社会3个要素层选取了21个指标(表1)。<sup>①</sup>压力指标用来反映土地生态所承受的人类生产生活带来的压力,而陇中陇东黄土高原地处西北干旱半干旱地区,水土流失,土壤退化,水资源短缺等问题突出。地方政府为应对生态压力,保障粮食安全,将绿色农业作为现代农业转型的核心方向。而土地生态的压力与地方经济发展也是不可分割的,故在压力层面选取了耕地化肥使用量、耕地地膜使用量、农作物受灾面积占比、地均固定资产投资、第一产业构成、人口密度、产水模数7项指标。<sup>②</sup>状态指标可反映土地生态环境在人类活动等压力下所呈现出来的状态,人类的生产效能与生活质量可以间接地反映土地生态状态的真实情况,生产效能主要体现在粮食生产、产业产值及

耕种灌溉效率,而生活质量方面空气质量、恩格尔系数、水资源量则更具代表性。状态层面具体选取了人均水资源量,空气质量指数,地均二、三产业产值,人均粮食产量,城镇居民恩格尔系数、有效灌溉面积比、耕地复种指数7项指标。<sup>③</sup>响应指标是反映人类对生态环境问题做出的响应,陇中陇东黄土高原地区多年以来对水土流失问题持续开展治理,且在水土综合治理方面成效较为显著。而土地的不合理开发利用垦殖都会加剧土地生态的恶化,土地利用和垦殖率可以一定程度上监控响应此类现象。此外研究区有一定的工业基础,工业废物的利用率可以反映人类在工业废物处理治理方面的响应情况。鉴于此,结合人居环境与收支水平,在响应层面具体选取了人均公园绿地面积、水土流失治理面积、人均GDP、农村居民人均可支配收入、一般工业固体废物综合利用率、土地利用率和土地垦殖率7项指标。

### 3.2 指标权重确定

#### 3.2.1 评价指标标准化

由于各评价指标数据正负性质、数量级不同,为了消除量纲的影响,首先对评价指标进行极值标准化处理。

$$A_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (\text{正向指标}) \quad (1)$$

$$A_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (\text{负向指标}) \quad (2)$$

式中: $x_{ij}$ 为指标的实际值, $i=1 \cdots m$ 代表年份数, $j=1 \cdots n$ 代表评价指标; $\max(x_j)$ , $\min(x_j)$ 为第 $j$ 项指标的最大值和最小值。

#### 3.2.2 熵权法确定权重

目前,权重的计算方法有AHP层次分析法、特尔菲法、熵权法、专家打分法等,为减少人为主观因素影响,本文采用熵权法来确定指标权重。

(1) 计算第 $i$ 年第 $j$ 项指标所占的比重 $P_{ij}$ :

$$P_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^m A_{ij}} \quad (3)$$

(2) 计算第 $j$ 项指标的信息熵 $e_j$ :

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (4)$$

式中:当 $P_{ij}=0$ 时,令 $P_{ij} \ln P_{ij}=0$ 。

(3) 计算第 $j$ 项指标的权重 $w_j$ :

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (5)$$

表 1 土地生态安全评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system for land ecological security

目标层	准则层	要素层	指标层	指标说明	方向	权重	
土地生态安全	压力	环境	$S_1$ 单位面积耕地化肥使用量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	反映耕地环境压力	负	0.020 6	
			$S_2$ 单位面积耕地地膜使用量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	反映耕地环境压力	负	0.017 1	
			$S_3$ 农作物受灾面积比例/%	反映农作物受灾情况	负	0.013 7	
		经济	$S_4$ 地均固定资产投资/(万元 $\cdot \text{km}^{-1}$ )	反映土地投资发展情况	正	0.085 6	
			$S_5$ 第一产业构成(地区生产总值=100)	反映第一产业发展情况	正	0.034 2	
		社会	$S_6$ 人口密度/(人 $\cdot \text{km}^{-2}$ )	反映人口压力	负	0.028 6	
			$S_7$ 产水模数/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	反映地区水资源利用效率和产水能力	正	0.081 7	
		状态	环境	$S_8$ 人均水资源量( $\text{m}^3/\text{人}$ )	反映水资源状况	正	0.053 5
				$S_9$ 空气质量指数/%	反映空气质量情况	正	0.014 1
	经济		$S_{10}$ 地均二、三产业产值/(元 $\cdot \text{km}^{-2}$ )	反映第二、三产业发展情况	正	0.135 1	
			$S_{11}$ 人均粮食产量/kg	反映粮食产量情况	正	0.032 7	
	社会		$S_{12}$ 城镇居民恩格尔系数/%	反映城镇居民生活水平	负	0.047 3	
			$S_{13}$ 有效灌溉面积比/%	反映水资源的有效利用情况和耕地的抗旱能力	正	0.104 0	
	响应	环境	$S_{14}$ 耕地复种指数/%	反映耕地在一年内被重复利用的程度	正	0.049 5	
			$S_{15}$ 人均公园绿地面积/ $\text{m}^2$	反映土地覆被状态	正	0.028 5	
		经济	$S_{16}$ 水土流失治理面积/( $10^3 \text{ hm}^2$ )	反映水土流失治理情况	正	0.053 3	
			$S_{17}$ 人均 GDP/(元 $\cdot \text{人}^{-1}$ )	反映人民生活水平和地区经济状况	正	0.064 7	
		社会	$S_{18}$ 农村居民人均可支配收入/(元 $\cdot \text{人}^{-1}$ )	反映农村居民人均可支配收入情况	正	0.045 4	
			$S_{19}$ 一般工业固体废物综合利用率/%	反映工业固体废物处理水平	正	0.012 2	
	$S_{20}$ 土地利用效率/%	反映土地开发利用程度	负	0.040 3			
	$S_{21}$ 土地垦殖率/%	反映土地资源的利用水平	负	0.037 8			

3.3 TOPSIS 法评价模型

TOPSIS 法即逼近理想解排序法。其通过定义正理想解和负理想解,计算各评价对象与正、负理想解的距离即贴进度,然后根据距离来对评价对象进行排序。

(1) 计算加权矩阵:

$$x_{ij} = A_{ij} \cdot \omega_j \quad (6)$$

式中: $A_{ij}$  为标准化矩阵; $\omega_j$  为指标权重。

(2) 确定正负理想解  $Z_j^+$  和  $Z_j^-$ :

$$\text{正理想解: } Z_j^+ = \{ \max Z_{ij} = 1, 2, 3 \dots m \} \quad (7)$$

$$\text{负理想解: } Z_j^- = \{ \min Z_{ij} = 1, 2, 3 \dots m \} \quad (8)$$

式中: $\max Z_{ij}, \min Z_{ij}$  为加权规范化矩阵最大值和最小值。

(3) 计算指标到正负理想解距离  $D_i^+$  和  $D_i^-$ :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^+)^2} \quad (i = 1, 2, 3 \dots m) \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, 3 \dots m) \quad (10)$$

(4) 计算指标贴进度  $C_i$ :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

式中: $C_i$  介于 0~1 之间,其数值越大,表明第  $i$  年土地生态越安全。借鉴已有研究<sup>[7,15,26]</sup>,根据研究区实际情况与数据分布特征,采用非等间距法将土地生态安全划分为 5 个等级(表 2)。

表 2 土地生态安全评价标准与安全等级

Table 2 Evaluation criteria and safety levels of land ecological security

安全性	极不安全	较不安全	临界安全	较安全	安全
贴进度 $C_i$	(0,0.2]	(0.2,0.3]	(0.3,0.5]	(0.5,0.8]	(0.8,1]
等级	V	IV	III	II	I

3.4 障碍因子诊断模型

障碍因子诊断模型在分析研究区域土地生态安全结果的基础上,通过障碍因子诊断模型,对其中主要障碍因子进行计算分析<sup>[27]</sup>。

$$I_{ij} = 1 - R_{ij} \quad (12)$$

$$M_{ij} = \frac{F_{ij} \cdot I_{ij}}{\sum_{j=1}^{21} F_{ij} \cdot I_{ij}} \times 100\% \quad (13)$$

$$N_{ij} = \sum_{j=1}^n M_{ij} \quad (14)$$

式中: $F_{ij}$  为因子贡献度,以单项指标权重  $\omega_j$  表示; $I_{ij}$

为单项因子偏离度;  $R_{ij}$  为单项指标标准化值;  $M_{ij}$  为单项指标对总目标障碍度;  $N_{ij}$  为准则层指标障碍度。

## 4 结果与分析

### 4.1 整体分析

运用 TOPSIS 模型, 以贴近度表征研究区土地生态安全指数, 计算得到陇中陇东黄土高原土地生态安全发展趋势(图1)。2010—2022年研究区土地生态安全指数在 0.297 8~0.389 9, 土地生态安全状况由“较不安全(Ⅳ)”提升为“临界安全(Ⅲ)”。研究区土地生态安全指数由2010年的 0.297 8 增长至2022年的 0.371 7, 上涨 24.81%。具体可分为3个阶段。

①第1个阶段(2010—2013年)。土地生态安全等级在此阶段从“较不安全(Ⅳ)”提升为“临界安全(Ⅲ)”, 安全指数也提升至 0.331 7。研究区安全指数小幅上升, 呈缓慢增长态势。2010年后, 陇中陇东黄土高原地区落实国家退耕还林工程, 地区水资源短缺问题得以缓解, 人均水资源量和产水模数分别增长 67.71% 和 67.98%。地区并对农业资源进行了集约化转型, 土地利用率和人均粮食产量分别增长 9.20% 和 18.50%。同期, 经济稳步发展, 生态污染得到有效遏制, 空气质量指数和一般工业固体废物综合利用率持续增长。②第2个阶段(2013—2017年)。土地安全指数呈水平波动且有小幅下降, 稳定在“临界安全(Ⅲ)”。2013年后地方工业化发展迅速, 短期内污染排放增加, 空气质量指数和一般工业固体废物综合利用率波动明显。同时“生态红线”制度的实施有利于地区生态恢复, 但在实施初期不同地区治理进度不一, 且此期间自然灾害多发, 导致人均水资源量、人均粮食产量、第一产业构成占比水平波动。③第3个阶段(2017—2022年), 土地生态安全爬升期, 先增后减再增再减, 安全指数上升幅度大于下降幅度。该阶段首次上升在2017—2018年主要原因是2017年地区启动了黄土高原沟壑区综合治理, 提高了植被覆盖率, 水土流失治理面积、人均水资源量等指标均有所增长。2018—2019年出现短暂回落, 主要是人均水资源量、产水模数出现明显下降, 分别下降 22.87% 和 21.71%。2019—2020年再次上升, 是由于陇中陇东地区积极响应黄河流域生态保护和高质量发展战略, 强化水土流失治理和湿地保护, 水土流失综合治理面积和人均公园绿地面积均有所增加, 且白银、定西等地在“绿色种养循环农业试点”项目覆盖下, 补贴农户粪肥收集和施用成本, 单位面积耕地化肥使用量降低 46.95%。2020—2022年安全指数再次小幅下降, 主要是单位面积耕

地化肥/地膜使用量增长, 人均水资源量等指数小幅下降。

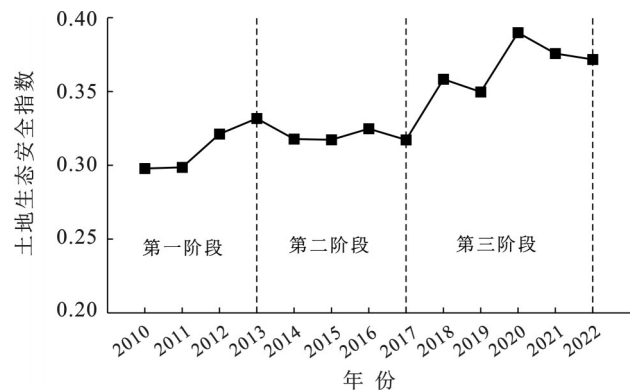


图1 陇中陇东黄土高原土地生态安全指数变化

Fig.1 Changes of land ecological security index in Loess Plateau of central and eastern Gansu Province

### 4.2 土地生态安全时空变化分析

由图2可知, 2010—2022年各市州土地生态评价安全水平较2010年均有提升。兰州市土地生态安全指数高于研究区其他市州, 除2017年有所下降外, 其他年份整体均呈上升趋势。白银市次之, 安全指数低于兰州市高于研究区其他市州, 整体呈平稳上升趋势。天水市安全指数整体看仅高于平凉市, 增长起伏较大, 土地生态评价安全水平不稳定。平凉市安全指数呈水平波动增长趋势, 但土地生态安全指数整体上低于其他市州, 土地生态评价安全水平较差。由表3可知, 研究区在2010年各市州土地生态安全指数为 0.229 4~0.430 4, 最小值和最大值分别为平凉市和兰州市, 其中兰州市、白银市和庆阳市为“临界安全(Ⅲ)”, 天水市、平凉市、定西市和临夏州为“较不安全(Ⅳ)”。2014年, 研究区各市州安全指数为 0.203 3~0.536 8, 最小值和最大值分别为天水市和兰州市, 较2010年兰州市安全等级由“临界安全(Ⅲ)”提升为“较安全(Ⅱ)”, 临夏州提升为“临界安全(Ⅲ)”, 其他市州安全等级较2010年未发生等级变化。2018年, 研究区各市州安全指数为 0.270 4~0.561 0, 最小值和最大值分别为平凉市和兰州市, 较2014年只有定西市从“较不安全(Ⅳ)”提升为“临界安全(Ⅲ)”, 其他市州安全等级相对于2014年未发生等级变化。2022年, 研究区各市州土地生态安全指数为 0.277 8~0.614 3, 最小值和最大值分别为平凉市和兰州市, 较2018年天水市完成了从“较不安全(Ⅳ)”到“临界安全(Ⅲ)”的提升, 其他市州未发生等级变化。综上所述, 2010—2022年兰州市完成了从“临界安全(Ⅲ)”向“较安全(Ⅱ)”安全等级的转变, 临夏州、定西市和天水市先后完成了从“较不安全

(IV)”向“临界安全(III)”的等级转变,其他市州安全等级未发生变化。由图 3 可知,陇中陇东黄土高原西部城市土地生态安全水平高于东部,兰州市安全等

级较高,而平凉市较低。综合 2010,2014,2018 和 2022 年土地生态安全评价空间演化,研究区整体安全水平向良好方向发展。

表 3 研究区各市州 2010,2014,2018 和 2022 年安全评价等级

Table 3 Security evaluation levels of cities and prefectures in study area in 2010, 2014, 2018 and 2022

年份	土地生态安全指数(等级)						
	兰州市	白银市	天水市	平凉市	庆阳市	定西市	临夏州
2010	0.430 4(Ⅲ)	0.344 9(Ⅲ)	0.235 7(Ⅳ)	0.229 4(Ⅳ)	0.300 8(Ⅲ)	0.281 2(Ⅳ)	0.262 3(Ⅳ)
2014	0.536 8(Ⅱ)	0.355 0(Ⅲ)	0.203 3(Ⅳ)	0.244 1(Ⅳ)	0.308 6(Ⅲ)	0.275 1(Ⅳ)	0.302 0(Ⅲ)
2018	0.561 0(Ⅱ)	0.379 7(Ⅲ)	0.293 3(Ⅳ)	0.270 4(Ⅳ)	0.307 5(Ⅲ)	0.324 1(Ⅲ)	0.372 1(Ⅲ)
2022	0.614 3(Ⅱ)	0.442 3(Ⅲ)	0.304 9(Ⅲ)	0.277 8(Ⅳ)	0.335 7(Ⅲ)	0.306 6(Ⅲ)	0.320 5(Ⅲ)

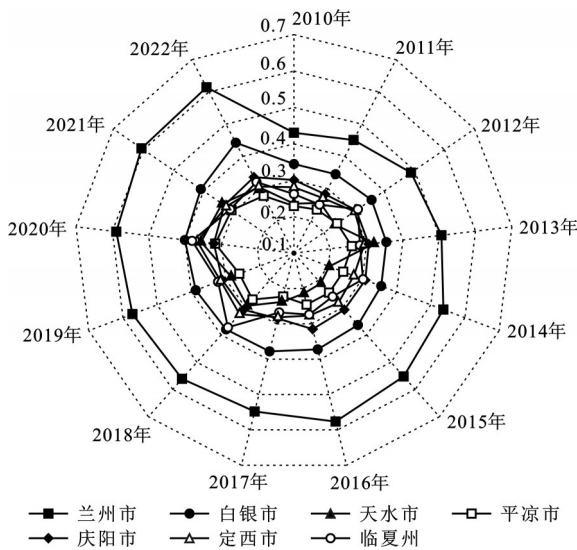


图 2 研究区各市州土地生态安全评价指数雷达图

Fig.2 Radar chart of land ecological security evaluation index for each city and prefecture in study area

### 4.3 土地生态安全各层面要素分析

#### 4.3.1 压力系统变化分析

由图 4 可知,土地生态压力指数整体上先升后降,最后呈 M 形上升的变化。其安全指数由 2010 年的 0.28 上升至 2013 年的 0.35,接着下降至 2017 年的 0.29,最后呈 M 形变化增减至 2022 年的 0.34,土地生态压力指数增长 21.69%。2010—2013 年压力指数变化主要受经济和社会要素影响,此阶段单位面积耕地化肥使用量和单位面积耕地地膜使用量虽有所增长,但地均固定资产投资和产水模数的好转抵消了环境要素的负面影响,且使压力指数小幅上升。2013—2017 年的变化主要受社会要素的影响,具体表现在人口密度的持续增长和产水模数的起伏波动,导致土地生态压力增大,压力指数持续下降。2017—2022 年压力系统的变化主要受环境和社会要素的影响,其中农作物受灾面积比例和产水模数增减起伏变化较大,但对比 2017 年压力指数 2022 年仍

增长 17.24%,得益于单位面积耕地化肥使用量和人口密度有所好转。总体上,土地生态压力指数由“较不安全(IV)”提升至“临界安全(III)”,得益于此时期陇中陇东黄土高原地区大力推进农村环境整治,严格管控农业面源污染,大力推进测土配方施肥,落实严格的农膜管理制度,推动农村生态环境得以改善。此外,在退耕还林还草政策引领下,生态环境明显改善,水土流失得到有效控制,农村产业结构进一步优化,地区环境、经济和社会向好发展,土地生态压力得以缓解。

#### 4.3.2 状态系统变化分析

如图 4 所示,土地生态状态指数整体上呈波动上升趋势,由 2010 年的 0.254 4 上升至 2022 年的 0.339 2,其土地生态系统由“较不安全(IV)”向“临界安全(III)”转变。2010—2013 年土地生态状态指数小幅上升,主要受环境和经济要素影响,得益于人均水资源量、地均二、三产业产值和人均粮食产量的增长,分别增长 67.71%,59.50% 和 18.50%。2013—2022 年土地生态状态指数呈上升变化,这一变化得益于经济和社会要素的改善,具体反映在地均二、三产业产值增长 87.79%,人均粮食产量增长 11.20% 与有效灌溉面积比增长 8.85%,以及城镇居民恩格尔系数减低 18.08%,陇中陇东黄土高原地区在此时期通过退耕还林还草、水土保持等生态工程,逐步减少对传统农业的依赖,推动产业向二、三产业转型,并积极推进高标准农田建设,采用水肥一体化、膜下精准滴灌等现代农业技术,提高粮食产量和灌溉效率。生态建设的快速发展带动了区域经济发展,优化了地区产业结构,最终提高了城镇居民收入水平,从而土地生态状态得以改善。

#### 4.3.3 响应系统变化分析

由图 4 可得,土地生态响应系统先降后升,从 2010 年的 0.371 5 下降到 2013 年的 0.350 8,随后上升

至2022年的0.4819,2010—2022年增长29.72%。2010—2013年出现下降主要受环境和社会要素的影响,具体表现在水土流失治理面积和土地垦殖率的降低。2013—2022年土地生态响应指数持续上升,是环境、经济与社会三方要素稳定增长、互相促进的结果,陇中陇东黄土高原地区全力构筑陇生态安全屏障,加强荒漠化综合防治和推进“三北”等重点生态工程建设,促进人均公园绿地面积自2013年的7.80 m<sup>2</sup>增长至2022年的15.58 m<sup>2</sup>,涨幅达99.73%,其中庆阳市截至2020年底,累计完成“再造一个子午岭”工程人工造林4.87×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>,当地生态环境得到明显改善。与此同时,陇中陇东黄土高原地区通

过生态修复和绿色产业发展,推动了经济结构优化,并带动了特色农业、生态旅游等绿色产业的发展,促进地方经济稳步增长,2013—2022年人均GDP和农村居民人均可支配收入分别增长56.24%与53.42%。此外,地区推动工业绿色转型和循环经济发展,促使企业加强工业固体废物的综合利用管理,拓宽工业固废利用渠道,研发固废资源化利用新技术,提高工业固废处理及综合利用水平,一般工业固体废物综合利用率由2013年79.63%提升至2022年89.34%。

上述结果表明,陇中陇东黄土高原地区在研究期间响应强烈,响应指数整体呈增长态势。

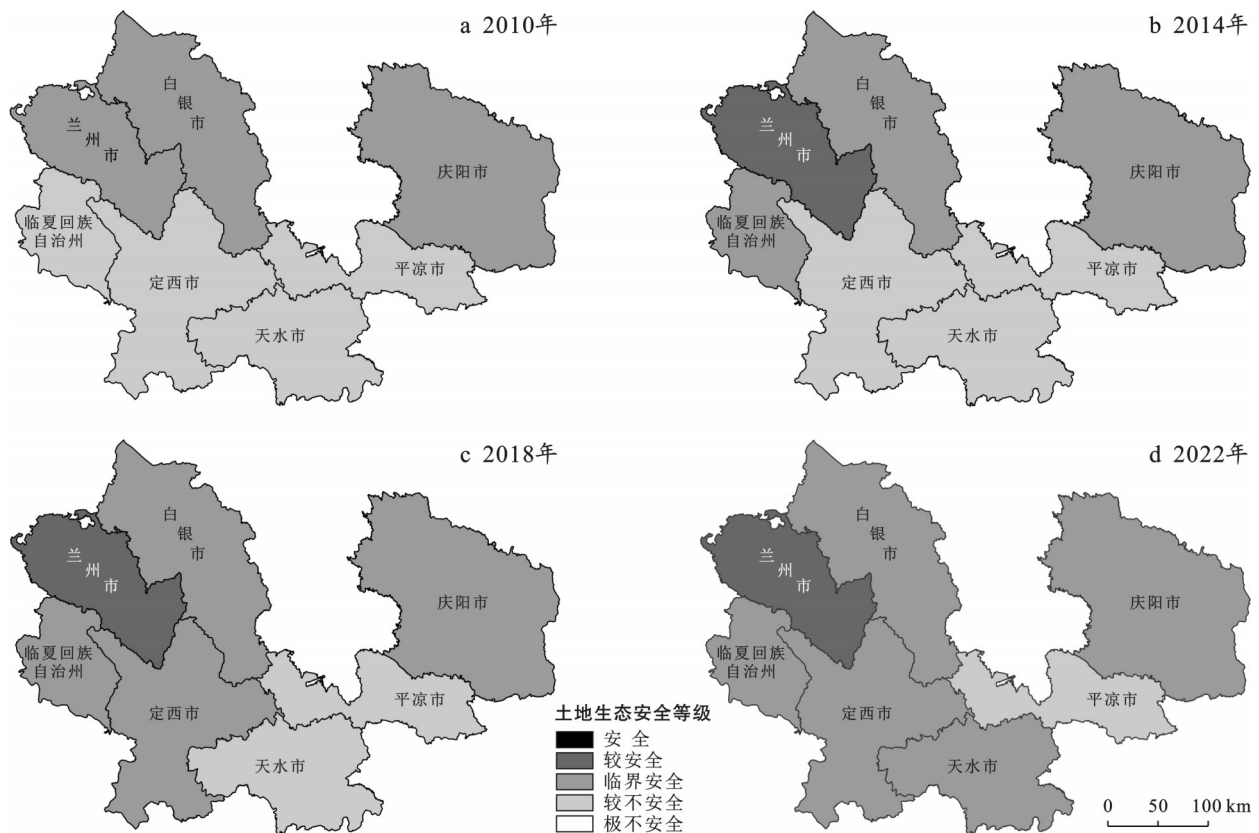


图3 陇中陇东黄土高原土地生态安全评价空间演化

Fig.3 Spatial evolution of land ecological security evaluation in Loess Plateau of central and eastern Gansu Province

#### 4.4 障碍因子诊断分析

##### 4.4.1 准则层障碍因子分析

由图5可知,研究区准则层障碍度整体上看,状态系统的障碍度最大,压力系统次之,响应系统障碍度最小。压力系统于2010—2012年障碍度有所下降,之后障碍度呈波动增长趋势,整体上压力系统障碍度位于25%以上。状态系统于2010—2018年障碍度呈波动发展趋势,2017—2020年有增长趋势,至2020年障碍度增至最大值45.56%。响应系统呈先增后降的趋势,2010—2013年响应系统障碍度不断

增加,随后从2013—2022年逐年递减,其最小值在2021年为24.13%。综上可知,研究区准则层障碍度主要分布于压力和状态系统,二者处于增长趋势,而响应层障碍度占比较小且处于下降趋势,反映出研究区针对人类对生态环境问题的响应得到了正反馈,有效地提升了研究区生态的安全水平。

##### 4.4.2 指标层障碍因子分析

本研究选取2010—2022年每年指标障碍度排名前5的指标作为陇中陇东黄土高原土地生态安全的主要障碍因子(表4)。2010—2022年研究区地均二、

三产业产值( $X_{10}$ )在障碍因子排序中一直处于第 1 位,但 2022 年较 2010 年有一定程度的下降,说明研究区在此期间尝试开展了调控治理,但受区域自然条件限制了大规模的开发建设,使得二、三产业的发展受到空间上的制约,且陇中陇东黄土高原产业结构发展不均衡,比较依赖传统的第一产业。地均固定资产投资( $X_4$ )在 2010—2012 年居于主要障碍因子第 2 位,2012 年之后退出第 2 位,其在 2010—2016 年在不断下降,2016 年后开始增长,说明在 2016 年之前陇中陇东黄土高原地区的固定资产投资市场处于发展阶段,之后市场逐渐趋于饱和,导致有关行业投资回报率相对较低或风险较高。产水模数( $X_7$ )和有效灌溉面积比( $X_{13}$ )障碍度从 2010 年的 10.04% 和 10.16% 增长至 2022 年的 12.27% 和 10.98%,二者障碍度增加说明研究区水资源的自然分布情况较差,水土流失问题严重,水资源利用率较低。人均 GDP( $X_{17}$ )除 2016 年和 2022 年退出主要障碍因子,其他年份均位于主要障碍因子第 5 位,但其障碍度在逐年下降,从 2010 年的 8.44% 降至 2022 年的 5.76%,说明地区经济发展水平在稳步提升,居民生活水平在持续改善,经济发展潜力也在不断增强。值得注意的是,人口密度( $X_6$ )和土地利用率( $X_{20}$ )虽然障碍度较低,但二者在研究年份内障碍度逐年增加,说明人口密度在持续增大,土地利用的强度高,二者对于研究区土地生态安全提供一定程度上的压力。综合来看,研究区的障碍因子主要为地均固定资产投资( $X_4$ ),产水模数( $X_7$ ),地均二、三产业产值( $X_{10}$ ),有效灌溉面积

比( $X_{13}$ ),人均 GDP( $X_{17}$ )。主要障碍因子集中作用于压力、状态系统,而响应系统影响较低,符合土地生态安全影响因素发展规律。

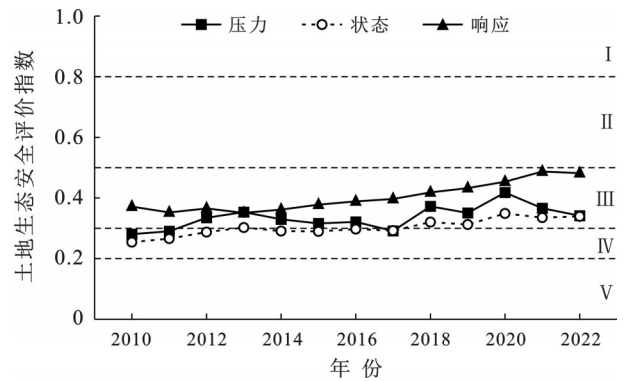


图 4 各子系统土地生态安全指数变化  
Fig.4 Change of land ecological security index across subsystems

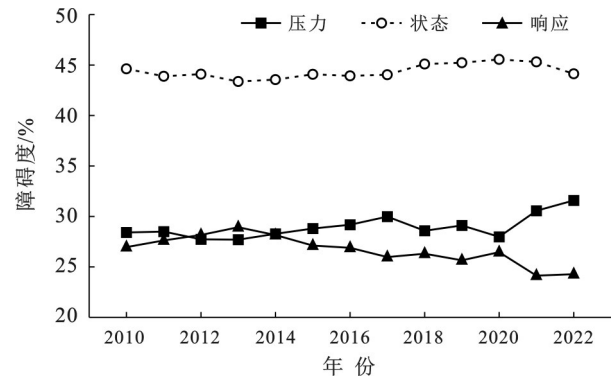


图 5 陇中陇东黄土高原准则层障碍度变化  
Fig.5 Variation of obstacle degree at criterion layer in Loess Plateau of central and eastern Gansu Province

表 4 陇中陇东黄土高原 2010—2022 年土地生态安全主要障碍因子

Table 4 Major obstacle factors of land ecological security in Loess Plateau of central and eastern Gansu Province (2010—2022)

年份	障碍因子(障碍度)排序				
	1	2	3	4	5
2010	$X_{10}$ (18.67%)	$X_4$ (11.73%)	$X_{13}$ (10.16%)	$X_7$ (10.04%)	$X_{17}$ (8.44%)
2011	$X_{10}$ (18.23%)	$X_4$ (11.30%)	$X_{13}$ (10.18%)	$X_7$ (9.85%)	$X_{17}$ (8.01%)
2012	$X_{10}$ (18.84%)	$X_4$ (10.86%)	$X_{13}$ (10.51%)	$X_7$ (9.56%)	$X_{17}$ (8.05%)
2013	$X_{10}$ (18.61%)	$X_{13}$ (10.83%)	$X_4$ (10.72%)	$X_7$ (8.88%)	$X_{17}$ (7.78%)
2014	$X_{10}$ (18.10%)	$X_{13}$ (10.68%)	$X_7$ (10.43%)	$X_4$ (9.79%)	$X_{17}$ (7.42%)
2015	$X_{10}$ (18.02%)	$X_7$ (11.46%)	$X_{13}$ (10.42%)	$X_4$ (9.22%)	$X_{17}$ (7.40%)
2016	$X_{10}$ (17.98%)	$X_7$ (11.97%)	$X_{13}$ (10.29%)	$X_4$ (8.71%)	$X_8$ (7.51%)
2017	$X_{10}$ (17.34%)	$X_7$ (10.84%)	$X_4$ (10.81%)	$X_{13}$ (10.40%)	$X_{17}$ (7.09%)
2018	$X_{10}$ (17.98%)	$X_{13}$ (11.77%)	$X_4$ (11.47%)	$X_7$ (8.43%)	$X_{17}$ (7.11%)
2019	$X_{10}$ (17.81%)	$X_{13}$ (11.92%)	$X_4$ (11.39%)	$X_7$ (9.82%)	$X_{17}$ (6.92%)
2020	$X_{10}$ (19.15%)	$X_{13}$ (12.48%)	$X_4$ (11.88%)	$X_7$ (8.50%)	$X_{17}$ (7.37%)
2021	$X_{10}$ (17.83%)	$X_{13}$ (12.05%)	$X_4$ (11.06%)	$X_7$ (10.73%)	$X_{17}$ (6.36%)
2022	$X_{10}$ (17.34%)	$X_7$ (12.27%)	$X_{13}$ (10.98%)	$X_4$ (10.75%)	$X_{16}$ (8.04%)

注:括号内数据为障碍度。

## 5 讨论

根据陇中陇东黄土高原地区土地生态评价结果来看,地区土地生态安全水平整体呈上升趋势,由2010年的0.297 8增长至2022年的0.371 7,且研究区西部城市土地生态安全水平高于东部城市,与吴艳霞等人<sup>[25]</sup>的评价结果相近。陇中陇东黄土高原地区呈西高东低的土地生态安全格局,且研究中兰州市是唯一安全等级为“较安全”的城市,其内在原因值得讨论与探究。分析研究发现,地形地貌的自然条件差异是核心因素之一,西部城市靠近黄河干流河谷,地形破碎但起伏较为缓和,且多大型水利工程有利于调节水资源,缓解侵蚀从而减少水土流失,而东部城市为典型的“塬”地貌分布区,地貌更为脆弱,水土流失严重;研究区都存在干旱缺水的现象,但西部近黄河干流,有一定用水保障,相比之下东部更多依赖降水,水资源短缺问题更为突出;西部兰州等城市,产业结构中第二、三产业比重较高,二、三产业经济产出有一定污染,但其对土地的直接依赖小于第一产业,且集中治理效率高,而东部平凉等城市为传统农业核心区,土地垦殖率较高,对生态系统的扰动更为剧烈,且有较大的农业面源污染压力;兰州作为省会所在地和“全国性综合交通枢纽城市”,在生态方面的财政支持与投入力度巨大,其生态治理保护工作起步时间早、持续周期长,兰州市从卫星看不到的城市到兰州蓝,这是区域生态治理最有力的体现。

陇中陇东黄土高原地区土地生态安全从指数上看是不断上升的,但仍长期处于“临界安全”状态。研究区压力与状态系统的安全指数整体上看是增长的,但在研究后期出现退化迹象,与压力系统障碍度后期增长和状态层系统障碍度居高不下形成呼应,说明地方政府要着重关注地区压力与状态指标的变化,及时减轻相应压力或加强响应干预。对陇中陇东黄土高原地区土地生态安全造成障碍主要表现在经济和社会要素上,而地方环境要素发展良好,说明在此时期地方重视环境保护和生态建设,坚持生态优先、绿色发展,严守生态保护红线,生态环境保护成效显著。依据主要障碍因子排序结果,要想进一步提升区域土地生态安全水平,则需重视水土治理强化、产业结构优化和土地利用集约化等问题。在促进经济发展的同时应进一步强化生态保护修复。首先要持续推进陇中陇东黄土高原水土保持综合治理,实施小流域综合治理,坡耕地综合整治等工程,从源头上有效控制水土流失,提高土壤抗侵蚀能力。其次,加强水资源管理,推广节水技术,保护水资源,

协调农业灌溉与生态补水关系。再次,引导产业绿色转型,扶持新兴和生态友好型产业,完善生态补偿机制,实现生态与经济良性互动。最后,依据国家黄河流域生态保护和高质量发展国家战略要求,优化土地利用结构,加强建设用地管控,提高土地集约利用水平。

本文充分考虑参考已有土地生态评价指标体系<sup>[12,15,25]</sup>,选择将PSR模型与EES模型有机组合,构建了土地生态复合评价体系,其可一定程度上避免评价角度单一的问题,弥补土地生态子系统中各要素间作用状况反映不良的缺陷,且组合熵权法和TOPSIS模型可以更科学客观地反映土地生态系统的整体安全情况和可持续性<sup>[24]</sup>。另与相关地区研究成果对比发现,韩瑜等<sup>[9]</sup>对黄河流域土地生态安全评价分析认为其主要障碍因子为景观破碎度、森林覆盖率、人均GDP等因素,而奥勇等<sup>[27]</sup>研究得出黄河流域土地生态质量主要障碍因子为经济密度、土地利用结构多样性等因素,与本文的主要障碍因子研究分析不尽相同,主要是因为研究区域存在地域偏差,指标体系构建权衡考虑不同,且评价切入点和侧重点有所差异。

陇中陇东黄土高原地区进行土地生态安全评价和障碍因子分析,有助于改善土地生产力,为区域生态治理、农民生计提供依据,对维护生态安全和保障社会经济发展具有重要理论和实践意义。本研究围绕区域特点、战略价值和生态重要性,通过PSR-EES复合指标体系客观评价了陇中陇东黄土高原地区土地生态安全和障碍因子,以期研究结果为黄土高原地区因地制宜实施特色化土地生态安全保护,以及筑牢国家西部生态安全屏障提供参考。此外,本文基于数据的连续性和可获得性等原因导致时长区间不理想,同时缺乏对遥感数据等多源数据的充分融合利用,数据单元不够精细,故本研究存在一定的客观性和局限性。后续研究可选择更长的时间尺度,以小尺度单元为研究对象,加强多源数据的融合,对黄土高原地区生态建设细化研究进行延伸。

## 6 结论

(1) 整体上看,2010—2022年研究区土地生态评价安全水平整体呈上升趋势。2010和2011年土地生态安全评价等级为“较不安全(Ⅳ)”,之后2012—2022年期间安全等级均为“临界安全(Ⅲ)”。从时空层面来看,2010—2022年兰州市土地生态安全指数最高,平凉市安全指数最低。陇中陇东黄土高原西部城市土地生态安全水平高于东部。

(2) 研究区压力系统安全指数从 2010—2022 年波动增长,安全评价等级由Ⅳ级提升至Ⅲ级。状态系统土地生态安全水平从 2010—2022 年波动增长,安全评价等级由Ⅳ级提升至Ⅲ级。响应系统土地生态安全水平数从 2010—2022 年由 0.371 5 增长至 0.481 9,安全水平有一定提升,但安全评价等级始终保持为Ⅲ级。

(3) 研究区准则层障碍度主要分布于压力和状态系统,二者处于增长趋势,而响应层障碍度占比较小且处于下降趋势,符合土地生态安全影响因素发展态势。研究区的障碍因子主要为地均固定资产投资( $X_4$ ),产水模数( $X_7$ ),地均二、三产业产值( $X_{10}$ ),有效灌溉面积比( $X_{13}$ ),人均 GDP( $X_{17}$ )。人口密度( $X_6$ )和土地利用率( $X_{20}$ )障碍度较低,但二者在 2010—2022 年障碍度逐年增加,其对土地生态安全的影响力不可忽视。

### 参考文献 (References)

- [1] Li Lijiao, Fu Meichen, Zhu Youxiang, et al. The current situation and trend of land ecological security evaluation from the perspective of global change [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 167: 112608.
- [2] 杨清可,王磊,吕立刚,等.江苏土地生态状况评价及其障碍因子诊断[J].*环境科学*, 2024, 45(10): 5880-5889. Yang Qingke, Wang Lei, Lü Ligang, et al. Evaluation of land ecological status and diagnosis of obstacle factors in Jiangsu, China [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(10): 5880-5889.
- [3] Zhang Mingxi, Bao Yongbin, Xu Jie, et al. Ecological security evaluation and ecological regulation approach of East-Liao River basin based on ecological function area [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108255.
- [4] Ren Li, Song Shuping, Zhou Yue. Evaluation of river ecological status in the plain river network area in the context of urbanization: A case study of 21 rivers' ecological status in Jiangsu Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109172.
- [5] 岳文泽,代子伟,高佳斌,等.面向省级国土空间规划的资源环境承载力评价思考[J].*中国土地科学*, 2018, 32(12): 66-73. Yue Wenzhe, Dai Ziwei, Gao Jiabin, et al. Study on the evaluation of resources and environment carrying capacity for provincial territorial planning [J]. *China Land Science*, 2018, 32(12): 66-73.
- [6] 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. Zhang Nannan, Shi Shuilian, Li Bo, et al. Evaluation and prediction of land ecological security based on PSR model: Take Shenyang as an example [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 28-35.
- [7] 陕永杰,魏绍康,苗圆,等.基于 PSR-TOPSIS 模型的“晋陕豫黄河金三角”地区土地生态安全评价[J].*生态经济*, 2022, 38(7): 205-211. Shan Yongjie, Wei Shaokang, Miao Yuan, et al. Evaluation of land ecological security in the Yellow River golden triangle of Shanxi, Shaanxi and Henan based on PSR-TOPSIS model [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(7): 205-211.
- [8] 于潇,吕春艳,郭旭东,等.京津冀城市群地区土地生态状况评估[J].*中国土地科学*, 2018, 32(4): 89-96. Yu Xiao, Lyu Chunyan, Guo Xudong, et al. Assessment on the status of land ecosystem in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Land Science*, 2018, 32(4): 89-96.
- [9] 韩磊,陶德鑫,史鲁彦.黄河流域两大区域的土地生态安全动态评价及比较[J].*水土保持学报*, 2024, 38(1): 255-266. Han Lu, Tao Dexin, Shi Luyan. Dynamic evaluation and comparison of land ecological security in the two regions of the Yellow River basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 255-266.
- [10] Ashraf A, Haroon M A, Ahmad S, et al. Use of remote sensing-based pressure-state-response framework for the spatial ecosystem health assessment in Langfang, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(38): 89395-89414.
- [11] 郑乐乐,马小雯,安翔,等.基于 DPSIR-GM(1,1)模型的甘肃省生态安全评价与预测[J].*生态科学*, 2022, 41(4): 60-69. Zheng Lele, Ma Xiaowen, An Xiang, et al. Evaluation and prediction of ecological security in Gansu Province based on DPSIR-GM(1, 1) model [J]. *Ecological Science*, 2022, 41(4): 60-69.
- [12] 王大海,张荣群,艾东,等.基于 EES-PSR 的土地生态安全物元模型评价方法实证研究[J].*农业机械学报*, 2017, 48(S1): 228-237. Wang Dahai, Zhang Rongqun, Ai Dong, et al. Empirical study on evaluation method of land ecological security matter-element model based on EES-PSR [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(S1): 228-237.
- [13] 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. Yang Zhenmin, Liu Xinping. Analysis of early warning evolution and spatio-temporal pattern of land ecological security in Aksu River basin in Xinjiang [J]. *Ecological*

- Science, 2021, 40(5):129-139.
- [14] 余文波, 蔡海生, 张莹, 等. 基于RS及GIS的南昌市土地生态安全动态评价及分区[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4):244-249.  
Yu Wenbo, Cai Haisheng, Zhang Ying, et al. Land ecological security dynamic evaluation and regionalization in Nanchang City based on RS and GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4):244-249.
- [15] 王洋, 董晓光, 王海帆, 等. 基于PSR-TOPSIS模型的郑州市土地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(5):845-852.  
Wang Yang, Dong Xiaoguang, Wang Haifan, et al. Evaluation and obstacle factor diagnosis of land ecological security in Zhengzhou based on PSR-TOPSIS model [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(5):845-852.
- [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.  
Guo Ligang, Feng Zhenzhen, Liu Geng, et al. Evaluation of land eco-security in Fenhe River basin based on matter-element model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(6):2061-2069.
- [17] 杨人豪, 杨庆媛, 曾黎, 等. 基于BP-ANN模型的农村土地生态安全评价及影响因素分析:以重庆市丰都县为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3):206-213.  
Yang Renhao, Yang Qingyuan, Zeng Li, et al. Evaluation on ecological security and analysis of influence factors of rural land based on BP-ANN model: A case study of Fengdu County in Chongqing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3):206-213.
- [18] 罗鹏, 谈存峰, 齐婷婷. 基于PSR模型的黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3):180-189.  
Luo Peng, Tan Cunfeng, Qi Tingting. Evaluation and prediction of ecosystem health in Gansu section of Yellow River basin based on PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3):180-189.
- [19] 胡海, 周勇, 徐涛. 1980—2018年湖北省土地生态风险时空演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(10):2246-2258.  
Hu Hai, Zhou Yong, Xu Tao. Spatial-temporal evolution of land ecological risk in Hubei Province, China from 1980 to 2018 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(10):2246-2258.
- [20] 周小丹, 胡秀艳, 王君楠, 等. 江苏省土地生态网络规划中源地的选取研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8):1746-1756.  
Zhou Xiaodan, Hu Xiuyan, Wang Junxiao, et al. Study on the selection of source sites in the land ecological network planning of Jiangsu Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8):1746-1756.
- [21] 王同达, 曹锦雪, 赵永华, 等. 基于PSR模型的陕西省土地生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5):1563-1572.  
Wang Tongda, Cao Jinxue, Zhao Yonghua, et al. Evaluation of land ecosystem health in Shaanxi Province, northwest China based on PSR model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5):1563-1572.
- [22] 乌宁巴特, 刘新平, 马相平. 叶尔羌河流域土地生态脆弱性差异评价[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3):849-858.  
Wu Ningbate, Liu Xinping, Ma Xiangping. Evaluation on the difference of land ecological vulnerability in the Yarkant River basin [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3):849-858.
- [23] Kang Peng, Chen Weiping, Hou Ying, et al. Spatial-temporal risk assessment of urbanization impacts on ecosystem services based on pressure-status-response framework [J]. Scientific Reports, 2019, 9:16806.
- [24] 蔡霄, 杨洋, 李鹏山, 等. 基于PSR-NES耦合模型的土地生态状况综合评估:以大邑县为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(4):685-694.  
Cai Xiao, Yang Yang, Li Pengshan, et al. PSR-NES coupling model based land ecological status comprehensive assessment [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(4):685-694.
- [25] 吴艳霞, 邱乐. 黄河流域土地生态安全时空演化分析及预测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4):258-265.  
Wu Yanxia, Qiu Le. Analysis and prediction of temporal and spatial evolution of land ecological security in Yellow River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4):258-265.
- [26] 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.  
Lü Guangbin, Liao Tiejun, Yao Qiusheng, et al. Spatiotemporal variation and land ecological security and its evaluation in Chongqing City based on DPSIR-EES-TOPSIS model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6):249-258.
- [27] 奥勇, 蒋岭峰, 白召弟, 等. 基于格网GIS的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1):164-175.  
Ao Yong, Jiang Lingfeng, Bai Zhaodi, et al. Comprehensive evaluation of land ecological quality in the Yellow River basin based on Grid-GIS [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1):164-175.