

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.032.

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.

黄河流域土地生态安全时空演化分析及预测

吴艳霞, 邱乐

(西安理工大学 经济与管理学院, 西安 710054)

摘要: [目的]揭示黄河流域土地生态安全时空演化特征并厘清其演绎规律,助力黄河流域加快生态文明建设发展进程。[方法]基于 2012—2021 年统计数据,选取黄河流域 58 市州为研究单元,通过 PSR 模型构建指标评价体系,采用熵权 TOPSIS 法评价了黄河流域土地生态安全时空演绎规律,运用莫兰指数揭示其空间自相关问题,最后运用灰色预测模型 GM(1,1)探究了其未来趋势。[结果](1) 时间序列演化上,黄河流域土地生态安全整体水平不高但呈现逐年向好的发展态势,10 年间经历了从“敏感级”向“良好级”的提升;(2) 空间格局演化上,黄河流域土地生态安全呈现“大杂居,小聚集”的特征,始终表现出“下游最优、中游次之、上游最差”的阶梯状分布格局;(3) 黄河流域土地生态安全存在明显空间正相关,集聚特征显著,高值区主要分布于下游山东、河南的部分地区,低值区主要分布中上游青海、甘肃、陕西部分地区;(4) 2022—2025 年土地生态安全水平将保持平稳上升,土地生态安全等级将保持在“良好级”。[结论]黄河流域土地生态安全水平持续向好发展,但整体水平不高,流域沿线地区应持续促进土地生态系统治理与联合保护。

关键词: 土地生态安全评价; 黄河流域; 熵权 TOPSIS 模型; 灰色预测 GM(1,1)

中图分类号: F301; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0258-08

Analysis and Prediction of Temporal and Spatial Evolution of Land Ecological Security in Yellow River Basin

Wu Yanxia, Qiu Le

(School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the temporal and spatial evolution characteristics of land ecological security in the Yellow River Basin, to clarify its deductive law, and to help accelerate the construction and development of ecological civilization in the Yellow River Basin. [Methods] Based on the statistical data from 2012 to 2021, 58 cities in the Yellow River Basin were selected as the research unit, system of evaluation index was established, integrated entropy weight TOPSIS method and Moran index were used to explore the temporal and spatial evolution law, and grey prediction GM(1,1) model was used to explore future trend. [Results] (1) In terms of time, the whole level of land ecological security was not high in Yellow River Basin, but showed a trend of good development year by year, and experienced an improvement from 'sensitive level' to 'good level'. (2) From the spatial distribution point of view, the land ecological security presented the characteristics of 'large cohabitation and small aggregation', which always showed a step-shaped distribution pattern of 'the highest level in downstream was, the medium level in the middle reaches, and the lowest level in upper reaches'. (3) The land ecological security of the Yellow River Basin had obvious positive correlation in space and significant agglomeration characteristics. Locally, the high safety values (H-H) were clustered in Shandong and Henan, the low safety value are clustered in Qinghai, Gansu and Shaanxi of the middle and upper reaches. (4) From 2022 to 2025, the land ecological security level

收稿日期: 2023-09-08

修回日期: 2023-09-13

资助项目: 国家社会科学基金“新发展阶段黄河流域生态安全评估、预警及实现机制研究”(21BJY169)

第一作者: 吴艳霞(1964—), 女, 江苏南京人, 博士, 教授, 主要从事技术经济及管理、区域经济发展研究。E-mail: 2214861742@qq.com

<http://stbcj.paperonce.org>

will maintain a steady rise, and the land ecological security level will remain at ‘good level’. [Conclusion] The level of land ecological security in the Yellow River Basin continues to improve, but the overall level is not high, and land ecosystem governance and joint protection in the areas along the basin should be continually promoted.

Keywords: land ecological security evaluation; Yellow River Basin; entropy weight TOPSIS model; grey prediction GM(1,1)

随着国内外大环境发生深刻变化,中国在“十四五”规划中提出将步入新发展阶段这一重要研判。新发展阶段的发展主题是实现高质量发展,“三区两流域”国家级区域战略则为高质量发展进程注入澎湃动力。相比京津冀、长三角、粤港澳三大城市群主要以经济发展为高质量注入动力源泉,黄河与长江两大流域则重在坚守生态优先和绿色发展理念,尤其是黄河流域生态本底脆弱、经济发展落后,加之过去高强度、低效率的土地利用方式导致流域内水土流失、土地污染及人口贫困现象加重^[1],习近平总书记提出黄河流域高质量发展要以生态保护为先,而土地作为自然资源与人类活动的空间载体,兼有经济、社会和生态等战略功能^[2],保障黄河流域土地生态安全已成为其生态保护的应有之义和推进高质量发展进程的前沿课题。

目前,国外学者对于土地生态安全的研究侧重于土地生态风险评价^[3]与生态系统服务价值^[4]等方面。国内的研究主要从区域尺度、评价指标体系、评价方法等多角度展开。从研究对象来看,包括以省^[5]、市^[6]、县^[7]等为尺度的行政区域,或是以自然区域为主的河流库区^[8-9]、绿洲^[10]、荒漠^[11]等自然区域;评价指标体系多基于 PSR^[11-12]、DPSIR^[13]等模型进行构建,也存在与 NES、EES 概念相结合的模式^[14];评价方法常用生态足迹法^[15]、物元模型法^[16]、综合指数法^[17]、TOPSIS 法^[7,14,18]、主成分分析法^[19]。回溯相关文献发现,既有研究多以小尺度、行政区为单元进行时间序列总体研究,忽略空间上的关联性与聚集特征,并且缺乏对于土地生态安全的预测研究,不利于系统研究土地生态安全的演替过程与趋势预测。

鉴于此,本文以黄河流域 58 市州为研究对象,选取 2012—2021 年时间序列数据,通过熵权 TOPSIS 模型计算土地生态安全指数,剖析黄河流域土地生态安全时空演化特征,并应用灰色预测 GM(1,1)模型探究未来发展趋势,以期揭示黄河流域土地生态安全的演绎规律。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域($90^{\circ}34' - 118^{\circ}24'E, 32^{\circ}23' - 42^{\circ}47'N$)位于

我国中部地区,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区并经历高原、平原等一系列迥然不同的地貌。截至 2021 年,黄河流域 58 市州集聚了 2.1 亿人,人口密度达 370 人/km^2 ,实现生产总值 144 181.76 亿元,占全国的 12.6%,第一、二、三产业占比为 7.3 : 39.4 : 53.3。作为我国重要的农业生产基地和重工业基地,黄河流域一直以来承担着我国粮食生产与能源供给两大任务。近年来,随着“黄河国家战略”“西部大开发战略”等国家级区域经济发展战略的提出,黄河流域经济发展水平得到了较大提升。然而,经济水平提升建立在自然资源消耗和生态环境破坏的基础上,加之黄河流域自古就是自然灾害频发区和生态脆弱区,导致流域土地污染严重,土地生态功能减弱,影响流域的可持续发展,土地生态系统健康亟待改善。黄河流域片涉及到的地级州市约有 64 个,并研究参照郭晗^[20]的划分标准,将黄河流域进行上中下游的划分。由于部分市州的数据缺失严重且难以获取,本文选取其中 58 个地级市州作为研究单元并形成区位图(图 1)。

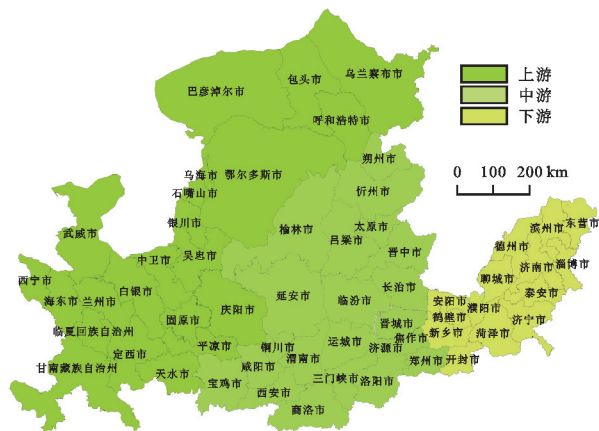


图 1 黄河流域研究区位

Fig. 1 Location map of the Yellow River Basin

1.2 数据来源及标准化处理

研究数据主要源于2013—2022年各省区统计年鉴、统计公报以及《中国城市建设统计年鉴》,对于个别缺失数据利用插值法与拟合回归法补齐。考虑指标原始数据性质与量纲不同导致指标之间不可比较且无法综合,利用极差化法对原始数据进行标准化处理。此外,制图研究所使用的地理信息基础数据源于中国科学院资源环境科学与数据中心。

2 评价指标体系及研究方法

2.1 评价指标体系构建

PSR(压力-状态-响应)概念模型是一种用于研究环境问题的框架体系,该模型具有“土地承受人类活动的压力—压力下土地的状态变化—针对状态变化做出的响应”的因果逻辑,已经得到普遍认可与运用^[11-12]。指标选取遵循如下原则:(1)依据 PSR 模型,其中“压力”是指经济社会对自然环境产生的直接

影响;“状态”表示环境响应压力的自然或人为变化的结果;“响应”是为了缓解压力、改善状态而采取的行动。(2)紧扣关键领域原则,聚焦粮食安全、水土流失、产业升级、环境保护等重点领域。(3)便于实际操作原则,梳理既有文献的指标体系,最大限度衡量指标的权威性、可得性与替代性,尽量选用比值类指标避免规模差异影响,平衡各子系统指标数量。根据以上原则,最终选取 18 项指标形成黄河流域土地生态安全评价指标体系(表 1)。

表 1 土地生态安全评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of land ecological security

目标层	准则层	指标层	指标示意	指标性质	指标权重
黄河流域 土地生态 安全评价 指标体系	压力	人口自然增长率	表征人口增长压力	—	0.0367
		城市化率	表征城市扩张压力	—	0.0532
		人口密度	表征土地承载人口压力	—	0.0142
		单位耕地面积化肥施用量	表征农业污染压力	—	0.0144
		单位 GDP 废水排放量	表征土地污染压力	—	0.0556
		城市建设用地占比	表征建设用地开发状况	—	0.0979
	状态	经济密度	表征土地集约利用状况	+	0.0119
		人均耕地面积	表征土地资源状况	+	0.1509
		人均公园绿地面积	表征城市公园绿地状况	+	0.0080
		建成区绿化覆盖率	表征城市土地覆盖状况	+	0.0109
		人均 GDP	表征经济发展水平	+	0.0568
		人均粮食产量	表征粮食安全保障状况	+	0.0400
	响应	水土流失率	表征水土资源状态	—	0.1464
		生活垃圾无害化处理率	表征土地生态维护水平	+	0.0487
		农业机械化水平	表征农业科技水平	+	0.0706
		第三产业占比	表征良好的产业发展条件	+	0.0457
		工业固体废物综合利用率	表征土地生态维护水平	+	0.0443
		污水集中处理率	表征环境保护的资金投入水平	+	0.0938

2.2 研究方法

2.2.1 熵权法 土地生态安全评价是一个多指标定量综合评价的过程,指标权重的确定将直接影响到土地生态安全评价的准确度。熵权法是一种常见的指标赋权方法,它是基于信息熵和权重熵来确定指标的权重,能够避免主观赋权影响最终评价结果,较为客观。由于熵权法较为常见,计算公式不在此单列^[21]。

2.2.2 TOPSIS 法评价模型 TOPSIS 是一种多属性决策分析方法,通过计算各指标与正、负理想解之间的加权欧式距离并进行排序,由此可以得出黄河流域土地生态安全指数,具体计算步骤依次为:

(1) 构建决策加权矩阵。

$$Z = |Z_{ij}| = W_j \times R_{ij}^* \quad (1)$$

(2) 确定正、负理想解。

$$V^+ = (V'_{ij})_{\max} \quad (2)$$

$$V^- = (V'_{ij})_{\min}$$

(3) 计算正、负理想解距离。

$$D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - V^+)^2} \quad (3)$$

$$D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - V^-)^2} \quad (4)$$

(4) 计算指标贴近度。

$$C_i = \frac{D^-}{D^- + D^+} \quad (5)$$

式中: W_j 为各项指标权重, R_{ij}^* 为标准化矩阵。指标贴近度的值越高,则表明土地生态安全状态越佳;反之,则越差。

2.2.3 空间自相关 区域与地理单元间的空间相互作用是探索区域土地生态安全演化的重要维度,分析多尺度的区域演化问题不能忽略空间影响,特别是空间依赖性^[22]。空间自相关作为空间依赖性的重要表达,特指属性值与其区域位置的相关性。根据地理空间是否同质的判定尺度,分为全局与局部空间自相关。

(1) 全局空间自相关。全局空间自相关假定空间是同质的,关注属性值在总体区域上的空间关联特征,

可用于判断整个流域土地生态安全属性的聚集特性与强度,常用 Global Moran's I 计算方法,Moran 指数 I 的取值区间为 $[-1,1]$,如果 I 的取值大于零且趋向于 1,则表示存在空间正相关性;若 I 的取值小于 0 且趋向于 -1,则表示存在空间负相关性;若 I 的取值接近 0,则表示无明显空间自相关特征。公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中: n 为研究单位数量,这里 $n=58$; w_{ij} 为构建的空间权重矩阵; y_i 和 y_j 为区域 i 和 j 的土地生态安全指数。

(2) 局部空间自相关。鉴于全局空间自相关(Global Moran's I 指数)无法确切解释流域内部的聚集情况,因此引入局部空间自相关(Local Moran's I 指数),实质上是将全局 Moran's I 指数分解到各地级单元,对各单元与其相邻单元的空间自相关程度进行聚集或离散效应检验,其公式为:

$$I_i = \frac{(y_i - \bar{y})}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_j - \bar{y}) \quad (7)$$

式中: $S^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}$,若 $I_i > 0$,表明该地级单

元土地生态安全水平与邻近地市差别较小,呈现“高高”或“低低”聚类特征,如若 $I_i < 0$,表明该地级单元生态安全水平与邻近地市差别较大,呈现“高低”或者“低高”异质特征。

2.2.4 灰色预测模型 GM(1,1) 趋势预测作为土地生态安全发展感知的高级阶段,有助于提前预测未来土地生态安全格局。灰色系统理论是一种建模和预测方法,通过对系统的特征和规律进行定量分析,揭示系统内部的本质关系和趋势演化。灰色预测是灰色系统做出预测,主要用于处理时间序列数据中的变化规律,通过对已知数据建模和分析,推测未知数据的趋势和规律。参考周瑞平^[23]的研究,采用最常用的灰色预测 GM(1,1)模型对黄河流域的土地生态安全水平进行预测。

2.2.5 土地生态安全评判标准 为排除人为因素影响并确保等级内部方差之和最小,基于统计学 Jenks 最优化法原理,运用 Arcgis 软件中的自然断点法,将时间序列中期 2016 年黄河流域土地生态安全指数划分为 5 个等级,进而设计土地生态安全等级判别标准(表 2),并推广至其余 9 a。

3 结果与分析

3.1 土地生态安全时空演化分析

3.1.1 时间序列演化分析 2012—2021 年黄河流域

58 市州土地生态安全指数在 $[0.163,0.644]$ 区间内,整体均值位于 $[0.311,0.381]$ 区间内,仅郑州市、淄博市和济南市 3 个城市在部分年份的土地生态安全指数高于 0.5,大部分市州多数年份都处于“敏感级”,这也表明黄河流域整体土地生态安全水平不高,生态发展受限。但值得注意的是,黄河流域土地生态安全指数在 2012—2021 年间呈明显的上升趋势(图 2),土地生态安全指数从 2012 年的 0.311 提升至 2021 年的 0.381,10 年间累计增长率为 22.6%,安全等级也由原来的“敏感级”升为“良好级”。黄河流域上、中、下游土地生态安全演变态势与流域整体保持步调一致,但区域土地生态安全提升水平不一。上游土地生态安全水平最低,但增长率达 30.7%,增势强劲于中游和下游。下游土地生态安全水平最高,增长率为 16.5%,增速最慢,这也进一步表明上、中、下游之间的土地生态安全差距逐渐缩小的趋势。黄河流域土地生态环境向好主要有以下几个原因:(1) 自 2012 年党的十八大召开以来,环境规制进入全面提升阶段,2015 年最严新环保法实施大大增强环境违法惩治力度,2016 年土十条、排污权改革、环保税等政策呈井喷式爆发,政策治理效果立竿见影,化肥与农药施用以及废水排放的增长趋势迅速遏制,流域土地污染取得初步改善。此外,黄河水利委员会于 2012 年编制《黄河流域综合规划》,对流域生态安全保护与经济社会可持续发展做出总体布局,对水土流失综合治理、生态环境与修复等做了全面部署,这使黄河流域土地生态安全水平的提升有了关键抓手和重要保障。(2) 研究期内,黄河流域 58 市州的人口自然增长率急速下降,到 2021 年武威、咸阳、渭南等市已低为负值,人口造成的压力相对有所减缓。此外,单位 GDP 废水排放、化肥的使用、万元 GDP 能耗在绝大部分市州都表现为逐年下降,土地生态环境压力得到减缓。(3) 在土地生态环境治理方面,上、中、下游共同发力,协同建设黄河流域土地生态屏障,上游主要以涵养水源和生态修复为主,筑牢土地生态保护的第一道防线;中游重点做好防风固沙、水土保持工作,构筑第二道防线;下游的河南、山东聚焦生物多样性维护、推进沿黄生态廊道建设,以及高强度的环境规制驱动产业结构升级与污染产业迁出,守住最后一道入海防线。

表 2 土地生态安全评判标准

Table 2 Evaluation criteria of land ecological security		
安全等级	安全值区间	安全程度
I	[0.45,0.65)	安全级
II	[0.38,0.45)	良好级
III	[0.33,0.38)	临界级
IV	[0.29,0.33)	敏感级
V	[0,0.29)	危险级

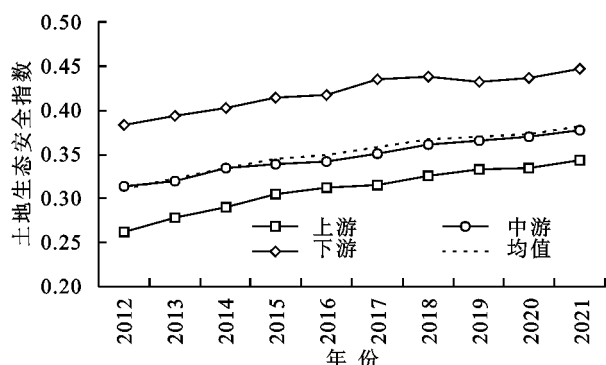


图2 各地区土地生态安全水平变化

Fig. 2 Changes of land ecological security level in different regions

3.1.2 空间格局演化分析 依据土地生态安全评判标准,运用 Arcgis 软件绘制黄河流域 2012 年、2016 年、2018 年、2021 年土地生态安全的时空格局分布图(图 3)。

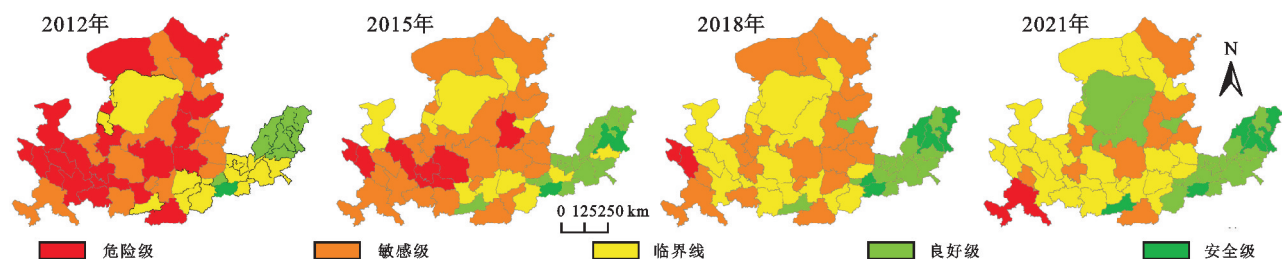


图3 土地生态安全时空格局变化

Fig. 3 Changes of spatial-temporal pattern of land ecological security

2012 年,土地生态安全等级为“安全级”的城市仅有 1 个,8 个城市达到“良好级”,14 个城市为“敏感级”,20 个城市为“危险级”。“危险级”主要分布于上游的西宁市、海东市、白银市、兰州市、定西市、平凉市等以及中游的延安市、忻州市、吕梁市等,形成片状与带状的分布特征;“敏感级”的城市也主要集中在流域中上游,如庆阳市、甘南藏族自治州、榆林市、渭南市、朔州市等,“危险级”与“敏感级”约占研究区面积的 70%,“临界级”与“良好级”主要集中在下游地区,形成一条明显的分界线。究其原因,青海固有水土资源分布不均、农业用水效率低下与森林资源匮乏等问题,能源消耗强度高,人口增长驱动土地承载力与环境容量刚性约束收紧,而青海政府仅对重点功能区的响应修复并不能从全局上扭转恶化趋势;甘肃水、耕地及森林资源匮乏,土地产出低效,水土流失率为全域最高,自然保护区与造林面积缩减,土地恶化积重难返;内蒙古的土地荒漠化、沙化和泥沙入黄一直困扰该地区的土地生态安全,此外,土地盐碱化与土壤污染并存,河套灌区盐碱化耕地面积达 32.3 万 hm^2 ,约占引黄灌区的 45%,化工工业、制造业等产业区高度集中于内蒙古黄河流域范围,工业“三废”对土壤的污染隐患较为深远;陕西长期以资源消耗驱动经济增长,化肥施用强度居全域首位,农业面源污染突出;山西生态本底差,水土流失严重,结构性

纵观全域,黄河流域土地生态安全水平不高且空间分异程度较大,呈现“大杂居、小聚集”的空间分布特征,并始终表现出“下游最优、中游次之、上游最差”的态势,主要还是受区位特征、资源禀赋差异、经济发展水平等因素的影响,中上游是我国生态脆弱区的集中分布区,土地生态和环境问题交织,特别是上游水土流失问题尤为严重;下游地区沿海的地理优势、领先的产业转型升级与良好的国家政策,使其有更多的生态资源发展社会经济,而社会经济发展又反哺土地生态安全,由此产生良性循环。随着时间的推移,2012—2021 年土地生态安全整体格局呈现由低水平向高水平提升的演化轨迹,黄河流域土地生态安全水平有了明显的改善。

与产业性污染突出,特别是基数大、增长快的煤矿高耗能行业加剧水土与大气污染,山西资源型经济转型紧迫。2015 年,“敏感级”市域向周围大面积扩散,“危险级”城市仅剩 8 个。2018 年,仅剩西宁与海东停留在“危险级”“敏感级”“临界级”“良好级”城市分布数量趋同。到 2021 年,土地生态安全处于“危险级”的城市仅剩 1 个(甘南藏族自治州),17 个城市为“良好级”,6 个城市达到“安全级”且主要分布在下游地区。究其原因,10 年来,黄河流域生态治理与保护全面加强,上游的青海省坚决扛起“源头责任”,在水源涵养、水土保持方面加大投资力度,生态系统功能稳步提升;内蒙古长期重视耕地、草地生态系统的农机投入,农业现代化水平和生产力深厚,三北防护林等林业工程推动造林面积持续攀升,治沙防沙卓有成效,鄂尔多斯市已升为中上游为数不多的“良好级”城市;甘肃在流域生态治理和修复方面实现重大突破,草原植被覆盖率超过 52%,湿地面积稳定在 169.39 万 hm^2 ;陕西在全国范围内率先建立起煤炭石油天然气水土保持补偿机制,在黄河流域建成国家级水土保持示范园区 21 个;下游的河南与山东两省,作为人口与农业大省,土地环境超载、资源约束趋紧、城乡与产业结构不合理长期掣肘当地发展,2016 年河南政府出台系列政策强化工业减排与土壤污染防治,城市人口与产业实现高度聚集,推进河南

摆脱“临界级”步入“良好级”发展阶段,山东政府则以环评倒逼结构优化,不断夯实环境检测体系,推进生态环境领域科技创新,新旧动能转换成效显著,土地产出率稳步增长,生态环境损害赔偿与生态文明建设财政奖补政策完善,土地生态安全向好发展。

3.2 土地生态安全空间相关性分析

基于 2012—2021 年土地生态安全水平评价结果,借助 Geoda 平台中的全局 Moran's *I* 指数与局部 Moran's *I* 指数和 LISA 聚类图进行全局自相关与局部自相关分析,探究黄河流域土地生态安全是否存在空间集聚效应,以及空间集聚效应具体存在于哪些区域。

3.2.1 全局空间自相关分析 在 GeoDa 平台基于 Queen 原则构建行标准化的空间权重矩阵,选择 2012 年、2015 年、2018 年、2021 年为研究断面,计算获得 Moran's *I* 指数散点图。2012 年、2015 年、2018 年、2021 年土地生态安全的 Moran's *I* 指数分别为 0.556,0.661,0.587,0.461,对应的 *p* 值均小于 0.01,通过显著性检验,表明黄河流域土地生态安全在空间上存在明显的正相关性,2012—2015 年 Moran's *I* 指数上升,土地生态安全水平在空间上的集聚性不断加强,2015—2021 年 Moran's *I* 指数下滑,表明流域整体的空间集聚程度有所降低。

3.2.2 局部空间自相关分析 利用局部 Moran's *I* 指数进行局域聚类分析,生成显著性较强的 LISA 聚类图(图 4),从图 4 可以发现,2012—2021 年黄河流域土地生态安全主要分布于 H-H 值区与 L-L 值区,局部空间自相关不显著区域主要集中于北部的巴彦淖尔市、包头市、乌兰察布市等以及南部的商洛市、宝鸡市、咸阳市、西安市等。2012 年,黄河流域土地生态安全 H-H 值区主要分布在下游山东半岛城市群,涵盖济南、东营、淄博、济宁等地级市以及周边的河南部分区域,该片区经济联系密切,在陆海统筹、农业发展、实体经济等领域综合实力显著,在黄河流域土地生态保护过程中发挥着龙头作用,形成较高水平的集聚;L-L 值区主要集聚在上游青海和甘肃省的绝大部分地市,还有位于中游榆林市。2021 年,H-H 值区的数量有所下降,其中泰安市、聊城市、德州市、济南市、淄博市与滨州市的集聚效应最为稳定,说明这 5 个地市的土地生态系统处于强强联合状态。L-L 集聚区逐渐瓦解,仅剩临夏回族自治州、定西市、海东市、西宁市、庆阳市、中卫市最为稳定,究其原因,这些区域经济发展水平相对落后,受地形地势影响,水土流失问题严重,造成耕地保障不足等问题,生态文明建设的体制机制还不够完善,形成土地生态安全洼地。

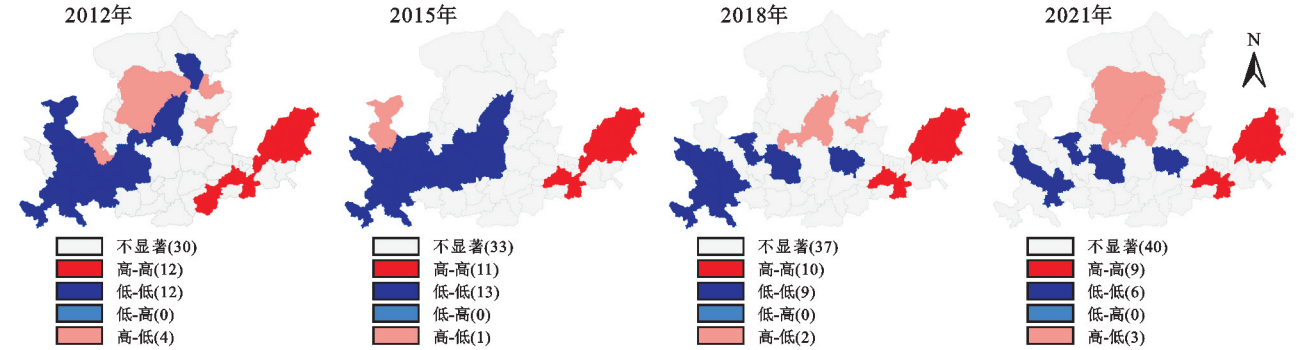


图 4 土地生态安全 LISA 聚类图

Fig. 4 LISA cluster diagram of land ecological security

3.3 土地生态安全预测分析

以 2012—2021 年黄河流域土地生态安全值为原始时间序列数据进行处理,构建得出灰色预测模型 GM(1,1),得到后验差比值 $C=0.02$,表明模型精度高,平均相对误差为 0.682%,意味着模型拟合效果良好。可用来预测 2022—2025 年黄河流域土地生态安全水平和未来发展趋势(表 3),根据预测结果发现,2022—2025 年呈现稳步上升趋势,增长率为 6.14%。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 黄河流域土地生态安全时空演化规律:时间序列演化上,黄河流域土地生态安全水平整体不高但

不断提升,2012—2021 年土地生态安全等级由“敏感级”升至“良好级”,土地生态状况呈现持续向好的态势;空间格局演化上,土地生态安全等级呈现“大杂居,小聚集”的空间特征,始终表现出“下游最优、中游次之、上游最差”的阶梯状分布格局,上游改善速度快于中下游,“安全级”与“良好级”主要集中在下游的山东、河南,“危险级”主要集中在上游青海、甘肃。

(2) 黄河流域土地生态安全存在明显空间正相关,集聚特征显著,但随着时间的推移,集聚程度有所下降。H-H 集聚区主要分布在流域下游山东、河南部分地区,该片区区域经济发展、土地生态环境状况均领先,成为下游的高值中心;L-L 集聚区主要分布在中上游的青海、甘肃、陕西部分地区,青海省受限的经济发展空

间以及仍显不足的环保基础能力等桎梏使土地生态安全面临压力较大;甘肃省由于经济水平低且中心城市辐射带动能力不强,成为上游的低值中心。

表3 基于GM(1,1)模型的土地生态安全预测结果

Table 3 Prediction results of land ecological security based on GM(1,1) model

年份	原始值	预测值	相对 误差/%	土地生态 安全等级
2012	0.311	0.311	0	敏感级
2013	0.322	0.328	1.847	敏感级
2014	0.334	0.335	0.043	临界级
2015	0.344	0.341	0.908	临界级
2016	0.349	0.348	0.274	临界级
2017	0.357	0.355	0.745	临界级
2018	0.366	0.362	1.284	临界级
2019	0.369	0.369	0.154	临界级
2020	0.373	0.376	0.948	良好级
2021	0.381	0.384	0.616	良好级
2022		0.391		良好级
2023		0.399		良好级
2024		0.407		良好级
2025		0.415		良好级

(3) 根据灰色系统GM(1,1)模型的预测结果,黄河流域的土地生态安全水平在2022—2025年间将持续稳步上升,保持在“良好级”。

4.2 建议

鉴于黄河流域土地生态安全水平较低和发展失衡,可从以下方面重点发力:(1)黄河流域生态修复重心应放在宁夏、山西、青海、甘肃与陕西,通过建立黄河流域企业环境信息共享数据库,加强企业环境会计信息披露与污染排放监测系统建设,编制黄河流域产业准入负面清单,切实避免下游淘汰的污染产业转移至中上游地区。(2)围绕产能合作、技术转移和生态保护构建绿色发展协助机制与流域综合治理体系,高安全值区应加大工业高新技术应用、第三产业潜力挖掘与环保绿化工程建设,积极帮扶低值区开展土地生态修复治理工作,低安全值区除要积极学习周边高值区或改善省区的发展治理经验外,还要大力争取国家支持,助推经济积累和产业升级,重构生产力格局,以支撑当地环境治理投资。(3)阻止中上游极化现象和维持下游领跑格局要齐头并进,中上游省地区特别是甘肃、宁夏与山西应倒逼环保政策由“末端治理”转向“源头治理”,推动产业结构升级与土地生态改善双赢,下游的河南、山东应加强创新动力,推动绿色基础设施建设与绿色技术及产品应用,引领流域现代产业合作带高质量发展。

参考文献(References):

- [1] 丁一,郭青霞,秦明星.黄河流域资源型城市土地绿色利用效率时空演变及影响因素[J].农业工程学报,2021,37(19):250-259.
Ding Y, Guo Q X, Qin M X. Temporal-spatial evolution and influencing factors of land green use efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(19):250-259.
- [2] 张鹏岩,耿文亮,杨丹,等.黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J].农业工程学报,2020,36(11):277-288.
Zhang P Y, Geng W L, Yang D, et al. Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the lower reaches of the Yellow River region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(11):277-288.
- [3] Zhao Y, Huang C M, Zhang H J. Ecological risk assessment of provincial land-use overall planning in China [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2014,20(6):1491-1506.
- [4] Li J Y, Chen H X, Zhang C, et al. Variations in ecosystem service value in response to land use/land cover changes in Central Asia from 1995—2035 [J]. PeerJ, 2019,7:e7665.
- [5] 胡东滨,谭文清,黄炜.基于SAHDT方法的湖南省土地生态安全评价[J].安全与环境学报,2021,21(2):866-873.
Hu D B, Tan W Q, Huang W. Land eco-security evaluation analysis of Hunan by SAHDT method[J]. Journal of Safety and Environment, 2021,21(2):866-873.
- [6] 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.
Wang Y S, Zhang F, Chen R, et al. Comprehensive ecological security assessment: A case study of Urumqi City [J]. Arid Land Geography, 2021,44(2):427-440.
- [7] 么泽恩,蔡海生,张学玲,等.基于CRITIC-TOPSIS模型的浮梁县土地生态安全时空分异及其障碍因素分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(10):2452-2463.
Yao Z E, Cai H S, Zhang X L, et al. Spatio-temporal differentiation and obstacle factors of land ecological security in Fuliang County based on CRITIC-TOPSIS model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(10):2452-2463.
- [8] 吴景全,吴铭婉,臧传富.西北诸河流域土地利用变化及土地生态安全评估[J].干旱区地理,2021,44(5):1471-1482.
Wu J Q, Wu M W, Zang C F. Land use change and land ecological security assessment in the river basins of northwestern China [J]. Arid Land Geography, 2021,44(5):1471-1482.
- [9] 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 Z M, Liu X P. 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.
- [10] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 叶尔羌河平原绿洲土地生态安全预警演变与时空格局分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(7):75-84.
- Amat M, Shabiti M, Zhang X Q. Analysis on the evolvement and spatio-temporal pattern of land ecological security early warning in Yarkant River Plain oasis [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(7):75-84.
- [11] 谢玲, 严士强, 高一薄. 基于 PSR 模型的广西石漠化地区土地生态安全动态评价[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(6):315-321.
- Xie L, Yan T Q, Gao Y B. Dynamic evaluation of land ecological security in rocky desertification mountainous area of Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(6):315-321.
- [12] 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.
- Zhang X Y, Yu H, Zhang X, et al. Comprehensive evaluation of land ecological security in the Sanjiangyuan National Park based on multi-source data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14):5665-5676.
- [13] 张艳, 胡征南, 周浩浩, 等. 黄河干流沿线陕西段土地生态安全时空分布特征[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6):258-267, 350.
- Zhang Y, Hu Z N, Zhou H H, et al. Spatial and temporal distribution characteristics on land ecological security along main stream of Yellow River in Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6):258-267, 350.
- [14] 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, 266.
- Lü G B, Liao T J, Yao Q S, 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, 266.
- [15] 吕添贵, 吴次芳, 李冠, 等. 基于生态足迹的港口型城镇土地生态安全研究: 以宁波市镇海区为例[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6):250-255.
- Lü T G, Wu C F, Li G, et al. Analyzing land ecological security of port town based on ecological footprint: A case study of Zhenhai District, Ningbo City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(6):250-255.
- [16] 梁睿, 黄义忠, 牟禹恒, 等. 基于物元分析的瑞丽市土地生态安全评价及障碍因素诊断[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(10):2436-2444.
- Liang R, Huang Y Z, Mu Y H, et al. Evaluation of land ecological security and diagnosis of obstacle factors in Ruili City based on matter-element analysis[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(10):2436-2444.
- [17] 王晶, 原伟鹏, 刘新平. 哈尔滨城市土地生态安全时序评价及预测分析[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(4):885-892.
- Wang J, Yuan W P, Liu X P. Time series evaluation and prediction analysis of urban land ecological security in Harbin City[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(4):885-892.
- [18] 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.
- Liu Z Y, Qu X W, Wei R, et al. Evaluation of land ecological security and diagnosis of obstacle factors for oasis land in Yili River valley from perspective of ecological civilization[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1):137-143.
- [19] 杜忠潮, 韩申山. 基于主成分分析的土地生态安全评价实证研究: 以陕西省 10 个省辖市为例[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(6):198-202, 207.
- Du Z C, Han S S. Land ecological security evaluation based on principal component analysis: Take examples of 10 provincial cities in Shaanxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(6):198-202, 207.
- [20] 郭晗. 黄河流域高质量发展中的可持续发展与生态环境保护[J]. *人文杂志*, 2020(1):17-21.
- Guo H. Sustainable development and ecological environment protection in high-quality development of the Yellow River Basin. [J] *Humanities*, 2020(1):17-21.
- [21] 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[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(8):1780-1790.
- Huang L J, Yang P. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of land ecological security in the Yangtze River economic belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(8):1780-1790.
- [22] 孟斌, 王劲峰, 张文忠等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(4):393-400.
- Meng B, Wang J F, Zhang W Z, et al. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(4):393-400.
- [23] 周瑞平. GM(1,1) 模型灰色预测法预测城市人口规模[J]. *内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版*, 2005, 34(1):81-83.
- Zhou R P. Application of the grey model to forecasting scale of urban population[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition*, 2005, 34(1):81-83.