

2006—2018 年汾河流域土地生态安全 预警测度及时空格局演变

苏迎庆¹, 刘庚¹, 赵景波², 郭利刚³, 林菲¹, 牛俊杰¹

(1. 太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心, 山西 晋中 030619;

2. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119; 3. 太原师范学院 管理系, 山西 晋中 030619)

摘要: [目的] 开展汾河流域土地生态安全预警研究, 为流域土地资源科学合理利用及可持续发展提供参考。[方法] 采用乘算模型、空间自相关及地理探测器方法分析 2006—2018 年流域土地生态安全警度的时空格局演化特征及主导因子。[结果] ① 2006—2018 年汾河流域土地生态安全警度演变趋势为向上开口抛物线的曲线特征, 且由“较不安全”向“临界安全”状态转变。② 空间上土地生态安全警度呈现“大集聚, 小分散”的特征, 并经历“下降—提高”的过程。③ 警度空间自相关由“正相关—负相关—正相关”转变, 与流域土地生态安全警度时空格局分布基本一致。④ 影响流域土地生态安全的主导因子为经济发展水平、环境保护投入与治理力度、土地利用效率。[结论] 未来应优化汾河流域生产、生活、生态空间布局, 建立流域生态补偿机制, 加大环境保护与科研投入力度促进流域的生态安全水平的提高。

关键词: 土地生态安全预警; 空间自相关; 地理探测器; 时空格局; 汾河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0144-08

中图分类号: X171

文献参数: 苏迎庆, 刘庚, 赵景波, 等. 2006—2018 年汾河流域土地生态安全预警测度及时空格局演变 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(1):144-151. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.021; Su Yingqing, Liu Geng, Zhao Jingbo, et al. Land ecological security early warning measure and spatial-temporal pattern evolution in Fenhe River basin during 2006—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1):144-151.

Land Ecological Security Early Warning Measure and Spatial-Temporal Pattern Evolution in Fenhe River Basin During 2006—2018

Su Yingqing¹, Liu Geng¹, Zhao Jingbo², Guo Ligang³, Lin Fei¹, Niu Junjie¹

(1. *Research Center for Scientific Development of Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University,*

Jinzhong, Shanxi 030619, China; 2. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an,

Shaanxi 710119, China; 3. Department of Management, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi 030619, China)

Abstract: [Objective] The early warning on the ecological security of watershed land in Fenhe River was studied to provide references for the scientific and rational utilization and sustainable development of watershed land resources. [Methods] The spatial and temporal pattern evolution characteristics and leading factors of land ecological security alertness in the basin from 2006 to 2018 were analyzed using a multiplier model, spatial autocorrelation, and a geographic detector. [Results] ① From 2006 to 2018, the evolution trend of the land ecological security alarm degree in the Fenhe River basin was a parabolic curve with upward opening, and it changed from the “less safe” to the “critically safe” state. ② Spatially, the ecological security alert degree of land was characterized by “large agglomeration and small dispersion” and underwent the process of “decline to increase.” ③ The change in spatial autocorrelation of alertness experienced the process of “positive-correlation—negative-correlation—positive correlation,” which was basically consistent with the spatial and temporal

收稿日期: 2020-09-15

修回日期: 2020-11-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“晋西北生态重建优势种林地土壤水分研究: 以沙棘和柠条为例”(41171423); 山西省软科学项目(2018041004-6); 山西省自然科学基金资助项目(201901D111294); 山西省人文社科重点基地项目(20190123); 太原师范学院校级 1331 创新团队项目(院办字[2017]34 号)

第一作者: 苏迎庆(1994—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 主要从事资源环境评价与开发、生态承载力与生态安全研究。Email: 18234090836@163.com。

通讯作者: 牛俊杰(1968—), 男(汉族), 山西省岚县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事区域环境与历史变迁研究。Email: junjieniu@foxmail.com。

distribution of the ecological security alertness of the watershed land. ④ The leading factors affecting the land ecological security of the river basin for many years were the level of economic development, investment and governance of environmental protection, and land use efficiency. [Conclusion] In the future, the layout of production, living, and ecological space in the Fenhe River basin should be optimized. The ecological compensation mechanism of the basin should be established. Investment in environmental protection and scientific research should be increased to promote the ecological security level of the basin.

Keywords: early warning of land ecological security; spatial autocorrelation; geodetector; spatial-temporal pattern; Fenhe River basin

土地是人类赖以生存的基础,土地生态安全与人类的生存生产紧密相关^[1]。土地生态安全是指在一定时空范围内,土地生态系统能维持其结构性与功能性健康的前提下,满足人类生存和发展所必需的资源供给和生态需要的能力^[2-3]。土地生态安全预警作为土地生态安全研究的重要分支,是对土地生态环境变化以及土地生态环境与社会经济协调变化的警告,提前揭示潜在的风险或危害,对维护区域土地生态安全具有重要意义^[4]。一直以来的高强度土地开发与利用,极大的破坏了土地生态平衡,土地生态安全形势愈发严峻。现有研究从系统分解综合考量生态系统与社会经济系统间相互关系为起点,构建适宜土地生态安全预警指标体系,对研究单元逐项评价后经空间叠加、模型计算等实现对区域土地生态安全的相对测度^[5-6]。建立科学合理的预警指标体系是土地生态安全定量测度的基础,也是土地生态安全预警的关键^[7]。目前,构建土地生态安全预警框架体系主要有 3 种:PSR(压力—状态—响应)概念模型、EES(经济—环境—社会)概念模型以及基于生态系统本底特征指标体系^[8]。PSR 概念模型的衍生模型(如 PISR, DPSIR, DSR 和 DPSEI 等)、暴露—响应概念性框架模型、基于土地子系统—耕地的生态安全指标体系等^[6]。研究尺度主要包括行政区、城市(圈/群)^[9-10]、重点流域^[11-12]、特殊的生态敏感区等^[13-14]。综合来看,现有成果为后期研究提供了科学范式,但土地生态安全存在明显的空间相关性及异质性特征,仅仅利用传统计量模型进行影响因素分析,无法揭示其地理空间时空规律,而运用空间自相关模型及地理探测器可以弥补该问题的不足,充分揭示土地生态安全问题的驱动机制及发生原理。

汾河是黄河流域第二大流域单元,也是山西省重要的生产生活生态空间集聚区,其占有全省约 25% 土地面积、26% 的水资源,却承载约 40.1% 的人口 and 42.6% 的 GDP^[15]。长期以来高强度的人类扰动造成流域形成高达 $2.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ 水土流失区,同时还存在土壤污染、植被破坏等一系列的土地生态安全问

题^[16]。然而,目前形成该问题的驱动机制、发生原理尚不明确,所以,本文从土地生态安全时空格局演变角度,以 DPSIR 理论框架构建研究区预警指标体系,采用乘算模型定量测算 2006,2013,2018 年基准期的安全预警指数的基础上,运用空间自相关模型及地理探测器揭示空间相关性及异质性机理,探明研究区土地生态安全警度时空演变的驱动机制及发生原理,为流域土地资源科学合理利用及可持续发展提供参考与依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

汾河源于宁武县管涔山,在万荣县注入黄河,全长约 713 km。汾河流域地处山西省中部($35^{\circ}22'6''$ — $38^{\circ}49'24''\text{N}$, $110^{\circ}30'3''$ — $112^{\circ}50'24''\text{E}$),黄土高原东缘,地势由北向南倾斜,海拔高度 240~2 786 m,地貌以盆地、平川、丘陵为主,并由地堑型纵谷串联太原、临汾等盆地构成。属温带大陆性季风气候,年均气温 11°C ,年均降水量 392.8 mm。土壤类型含潮土、褐土、棕壤、粗骨土、红黏土等 8 类,褐土为主要土壤之一。流域总面积约 3.95 万 km^2 ,涉及忻州、太原、晋中、吕梁、运城、临汾 6 市 40 县/区,目前,流域集中全省约 40.1% 的人口,42.6% 的 GDP,城镇化水平达 60.3%,为全省重要的生产、生活和生态空间聚集地。

1.2 数据来源

本文社会经济统计等数据来源于 2006,2013,2018 年《山西省统计年鉴》^[17]《山西省水资源公报》(<http://slt.shanxi.gov.cn>)《山西省生态环境公报》(<https://sthjt.shanxi.gov.cn>)《中国县(市)社会经济统计年鉴》^[18]及各市统计年鉴、省市县官网公报等,遥感影像及矢量数据来源于国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn)及中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

1.3 研究方法

1.3.1 预警指标体系构建 本研究遵循指标体系构建的科学性、可获取性及可操作性等原则的基础上,

借鉴已有研究成果^[19-20],从汾河流域本底特征出发,参考《山西省“十三五”环境保护规划》等指标要求,选取 26 项指标,通过 DPSIR(驱动力—压力—状态—影响—响应)框架构建汾河流域土地生态安全预警指标体系(表 1),其中,参评指标采用非零变换标准化统一处理^[21],权重确定采用熵权法^[22]。

表 1 汾河流域土地生态安全预警指标体系

准则层	指标层	相关性	权重/%
驱动力(D)	D ₁ 人口自然增长率/%	-	1.30
	D ₂ GDP 增长率(比上年)/%	-	0.93
	D ₃ 人均 GDP/(元·人 ⁻¹)	+	6.03
	D ₄ 城镇居民可支配收入/(元·人 ⁻¹)	+	3.35
	D ₅ 城镇化率/%	-	1.12
压力(P)	P ₁ 人口密度/(人·km ⁻²)	-	0.62
	P ₂ 化肥施用强度/(t·hm ⁻²)	-	1.46
	P ₃ 土地垦殖系数/%	-	2.45
	P ₄ 单位面积 GDP 产值/(万元·km ⁻²)	-	0.53
	P ₅ 人均建设用地面积/(hm ² ·人 ⁻¹)	-	1.48
状态(S)	S ₁ 地形坡度/(°)	-	3.01
	S ₂ 人均粮食产量/(t·人 ⁻¹)	+	4.66
	S ₃ 人均耕地面积/(hm ² ·人 ⁻¹)	+	3.76
	S ₄ 人均水资源量/(人·m ⁻³)	+	6.02
	S ₅ 水土协调度/%	+	5.32
	S ₆ 城市人均公园绿地面积/(人·km ⁻²)	+	8.80
	S ₇ 第一产业比重/%	-	2.09
	S ₈ 第二产业比重/%	-	2.85
影响(I)	I ₁ 单位播种面积粮食产量/(t·hm ⁻²)	+	3.48
	I ₂ 农业机械化水平/(kW·km ⁻²)	+	3.09
	I ₃ 农民人均纯收入/(元·人 ⁻¹)	+	2.54
	I ₄ 第三产业比重/%	+	1.92
响应(R)	R ₁ 污水处理率/%	+	16.24
	R ₂ 生活垃圾处理率/%	+	8.74
	R ₃ 建成区绿化率/%	+	2.84
	R ₄ 环保投资占 GDP 比例/%	+	5.37

注:“+”表示正相关;“-”表示负相关。

1.3.2 预警指数测算 参照相关研究^[11],采用乘算模型对评价单元进行土地生态安全预警指数计算,公式如下:

$$I_{ESW} = \sum_{i=1}^n A_i \times W_i \quad (1)$$

式中: I_{ESW} 为某类指标的土地生态安全预警指数; A_i 为评价指标标准化值; W_i 为土地生态安全预警指标 A_i 的权重; n 为指标总项数。

1.3.3 警情判别标准 结合汾河流域本底特征,参考已有研究设置本研究区的生态安全警情判别标准(表 2),划定 5 级流域土地生态安全预警值^[20]。其中,土地生态安全预警值与研究区土地生态安全状况呈正相关关系。

表 2 汾河流域土地生态安全警情判别标准

预警指数	安全等级	生态安全状态	警度
$0.0 \leq I_{ESW} < 0.2$	I	不安全	巨警
$0.2 \leq I_{ESW} < 0.4$	II	较不安全	重警
$0.4 \leq I_{ESW} < 0.6$	III	临界安全	中警
$0.6 \leq I_{ESW} < 0.8$	IV	较安全	轻警
$0.8 \leq I_{ESW} < 1.0$	V	安全	无警

1.3.4 空间自相关分析 空间自相关是用来分析研究区域范围内,各空间位置与各自周围邻近位置的同一属性值是否具有关联性,可以分为全局自相关和局部自相关^[23]。全局自相关用于揭示研究区整体某要素的空间相关性;局部空间自相关用于揭示研究区各子单元某要素空间相关性^[24],为此,本研究采用 LISA(local indicators of spatial association)聚类图分析土地生态安全警度在空间上的集聚特征^[25]。

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}} \quad (2)$$

式中: $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; x_i 表示第 i 地区的观测值; n 为栅格数; W_{ij} 为二进制的邻接空间权重矩阵,表示空间对象的邻接关系。 $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$; 当区域 i 和区域 j 相邻时; $W_{ij}=1$; 当区域 i 和区域 j 不相邻时; $W_{ij}=0$, Moran's I 介于 $[-1,1]$ 。

局部空间自相关 Local Moran's I (LISA) 是将 Moran's I 分解到各个空间单元,其公式为:

$$\text{Moran's } I_i = \left(\frac{x_i - \bar{x}}{m} \right) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

式中: $m = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n x_j^2}{(n-1)} - \bar{x}^2$; I_i 值为“+”表示该空间单元周围相似值(高值/低值)的空间集聚; I_i 值为“-”表示非相似值的空间集聚。

1.3.5 地理探测器 地理探测器是用来探测空间分异性及识别主导因子的空间统计学方法^[26]。由于汾河流域土地生态安全警度在空间分布上存在显著的异质性与分层性,且影响因子较多,因此,采用地理探测器识别主导影响因子,引入土地生态安全警度解释力 q 值来探测某因子 X 在多大程度解释属性 Y (土地生态安全警度),具体模型如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中: L 代表因子 X 的分层(分类); N_i 和 N 分别为层 i 和县区个数; σ_i^2 和 σ^2 分别为层 i 和全局 Y 值的

方差。解释力 q 介于 $[0, 1]$; q 值越大, 表明因子 X 对 Y 的解释力越强。

2 结果与分析

2.1 流域土地生态安全预警指数变化特征分析

2006—2018 年汾河流域土地生态安全预警指数总体表现为先下降后增长的演变趋势(图 1), 2006—2012 年, 流域土地生态安全指数由 0.383 4 下降到 0.337 0, 平均下降幅度达 12.10%; 2013—2018 年, 流域土地生态安全指数下降趋势得到扭转, 并以增长率 3.18% 逐渐提高, 多年流域土地生态安全均处于较不安全状态, 但 2006—2018 年拟合趋势表明流域土地生态安全由“较不安全”向“临界安全”状态转变。

从土地生态安全子系统层面对汾河流域土地生态安全预警指数变化特征来看, 2006—2018 年, 驱动力与压力指数呈现平稳增长; 2006—2012 年状态指数增长了 10.81%, 2013—2018 年下降了 18.69%; 影响指数多年基本维持在同一水平值, 且出现小幅度阶段性波动; 响应指数则呈现波动增长。分析发现, 基于流域多年经济发展, 特别是逐步提高的人均 GDP 及城镇居民可支配收入水平影响下, 导致驱动力指数平稳增长。而经济发展有赖于土地系统高强度的开发与利用所提供的资源与环境, 其中, 化肥施用

强度、土地垦殖系数及人均建设用地面积增长加剧了土地压力指数的提高。状态指数多年维持同一水平值限于城市人均公园绿地面积与第一、第二产业比重的正负效应驱动因子博弈的结果, 也造成了影响指数与响应指数的关联性变化。

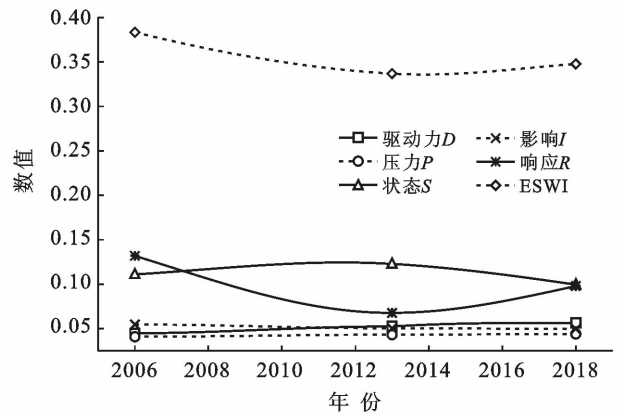


图 1 2006—2018 年汾河流域土地生态安全预警拟合趋势

2.2 流域土地生态安全警度时空格局分析

由 2006, 2013, 2018 年预警指数时空分布发现(图 2), 基准期水平值介于 $[0.2, 0.6)$, 土地生态安全状态处于较不安全与临界安全, 呈现中警和重警响应, 土地生态安全整体水平偏低。

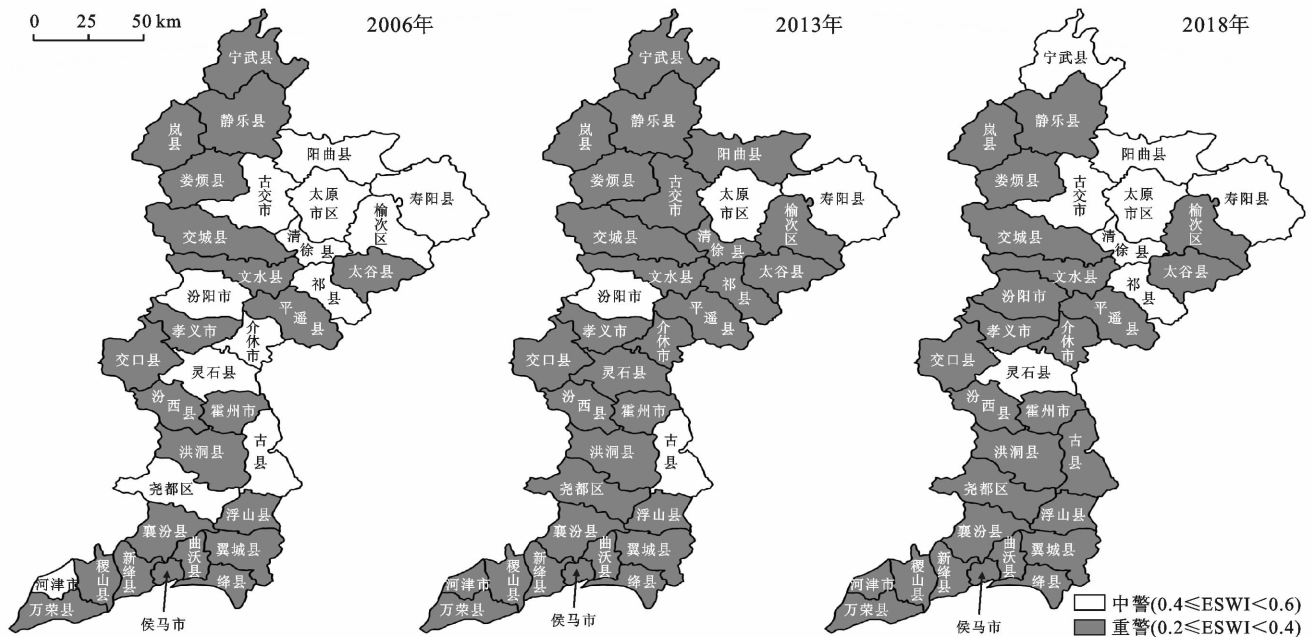


图 2 2006, 2013, 2018 年汾河流域土地生态安全预警状态分布特征

(1) 时间维度。2006—2018 年流域土地生态安全水平经历“下降—提高”的过程, 对比发现, 除太原市区、汾阳市等 19 个评价单元土地生态安全水平呈向下开口“抛物线”的演变, 其余县区土地生态安全水平平均经历不同程度的提高, 演变趋势表现为向上开口

“抛物线”增长。2006 年, 流域土地生态临界安全面积达 16 043 km², 占流域总面积的 39.47%, 集中分布在流域中上游的太原、晋中盆地等县区, 其中土地生态安全水平最高值 0.53, 最低值 0.24, 分别为太原市区与静乐县。2013 年, 流域“临界安全”同比下降

至 11.42%，处于临界安全范围的区县仅包括太原市、寿阳县、汾阳县与古县，其他县区土地生态安全水平均为较不安全状态，最低值 0.21 出现在文水县。临界安全由 2006 年的 11 个县区下降至仅 4 个行政单元，到 2018 年，流域土地生态安全水平同比增长率为 21.86%，达到临界安全水平的县区占研究区的 23.80%，处于较不安全水平县区范围缩小 11.42%，其中宁武县作为汾河源山区县增长率为 33.55%，由较不安全水平提高到临界安全水平。综合来看，造成流域 2006—2018 年土地生态安全阈值的时间变化的是经济发展驱动下土地资源开发利用的反馈结果。流域社会经济的发展一方面为土地子系统提供了正向驱动力，如人均 GDP 与城镇居民人均可支配收入较 2006 年分别增长 4.33%，43.01%，响应指标污水处理率等正向指标整体增长 97.09%，为流域土地生态系统的良性循环提供了充足的经济技术等支撑。同时，高强度的土地开发与利用也加剧了流域土地生态安全水平的下降、警度的提高，另外，诱发土地生态安全水平下降的负向因子如化肥施用强度、土地垦殖系数、经济密度等对土地生态系统的施压存在滞后性，短期内表现的生态系统问题不显著，也由此带来治理响应的滞后，综合造成土地生态水平下降的累积结果。

(2) 空间格局。土地生态安全高值区集中分布于流域中上游东北部，零散分布于流域下游，整体呈现“大集聚、小分散”的格局特征。分析发现，经济发展程度、地形环境等是形成该格局的主要因子。经济

较发达的太原辖区等，以省会城市政策倾斜、新型优势产业及环保投入等多项优势，使得土地生态水平均处于相对安全水平；而汾河中上游非完全山区县，自然环境较好，经济相对薄弱，人为对土地系统干扰力度较小，土地生态安全状态也能维持“临界安全”。土地生态安全的低值区主要位于汾河中下游盆地地区，人口经济高度集聚、产业结构不合理是形成该结果的主要原因。具体来看，第一类如尧都区等区县限于经济人口密度压力影响，产业以重化工业为主，土地生态安全状态“较不安全”；第二类如万荣县、稷山县等属于典型农业县，长期以来的高土地垦殖率及化肥使用强度等因素，使土地系统较长时间维持在“较不安全”状态。

2.3 流域土地生态安全警度空间关联特征分析

2.3.1 流域土地生态安全警度全局自相关 选用 Moran's I 指数对汾河流域土地生态安全预警指数 (ESWI) 进行空间相关性分析 (图 3)，2006, 2013, 2018 年流域土地生态安全预警指数 Moran's I 值分别为 0.400, -0.070, 0.373，总体经历“高一低一高”的下降—增长过程，表明流域土地生态安全警度经历“正相关—负相关—正相关”的转变过程。由此分析，汾河流域作为山西省人口经济高度集聚区，长期以来的高强度土地利用效率，远远超出其环境承载能力，累积的历史生态“欠债”多，土地生态安全形势严峻，环境问题多、治理难度大，周期长且波动显著，各评价单元差异性较大，造成流域土地生态安全警度全局空间相关性的变化。

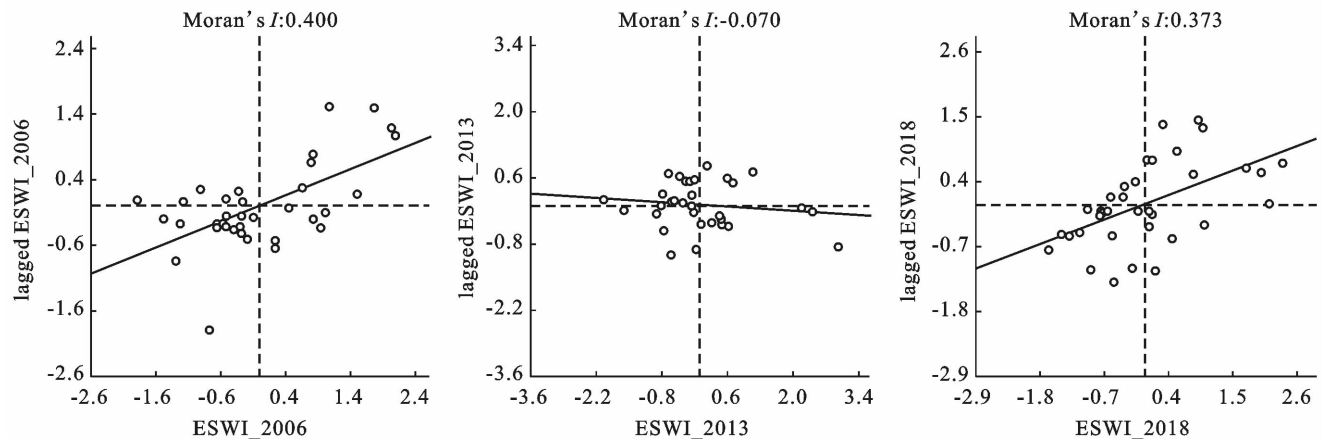


图 3 2006, 2013, 2018 年土地生态安全预警值 Moran's I 散点图

2.3.2 流域土地生态安全警度局部自相关 局部 Moran's I 指数与 LISA 聚类图可以分析局部单元与周边空间的关联性特征 (图 4)，2006, 2013, 2018 年汾河流域土地生态安全警度的局部自相关水平较低，主要显示为高一高 (H-H)、高一低 (H-L)、低—低 (L-L)

3 类，2006 年，H-H 集中分布在流域中上游东北部太原市辖区、清徐县、晋中市辖区榆次区、寿阳县、太谷县 5 县，L-L 分布在汾河源宁武县。H-H 主要集聚在上述地区，是因为同处于太原都市圈影响范围，受经济发展程度影响，所提供的环保投资、三废处理率、绿

化程度较高,另外,该年山西省实施《“十一五”环境保护规划》,全力推进蓝天碧水工程及“区域限批”,太原及晋中所辖区县取得较好的环境治理成果。而宁武县为 L-L 限于煤炭非法开采影响及汾河源早期旅游开发对环境保护评估不足,导致的环境破坏、土地生态的失衡。2013 年,流域总体局部相关性水平出现下滑,H-H 区域消失,流域多数评价单元相关性“不显著”,即评价单元与周围单元不存在相关。仅出现 L-L 在交城县、祁县,H-L 在汾阳县,2006—2013 年汾河流域总体社会经济发展加快,原有历史生态欠债并未还清且通过经济、人口密度加大等土地压力因子加重,使历史生态欠债进一步积欠,环境治理周期长,难度大。L-L 分布的交城县、祁县是为地理条件及土地生产效率等制约形成局部低值单元;而 H-L 所在

汾阳市为当年“绿色生态工程”实施的试点县之一,有效提高三废处理效率及绿化面积,也提高了土地生态安全水平。2018 年,流域整体局部相关性提高显著,H-H 区域扩大到汾河流域中上游 8 个区县,包括静乐县、阳曲县、古交市、太原辖区、清徐县、榆次区、太谷县及交城县。L-L 分布在汾河流域下游襄汾县、翼城县、河津市,H-L 分布在侯马市。2013—2018 年汾河流域生态环境治理修复与保护工程取得阶段性成果,为汾河中上游流域(H-H 集聚区域)土地生态安全系统改善起到了推动作用;而 L-L 区分布在汾河流域下游主要与长期以来基于地理条件的优越以此建立的高负荷土地利用模式所形成;H-L 所在侯马市的产业结构转型升级以及环境阶段性治理成果对土地生态改善具有促进作用。

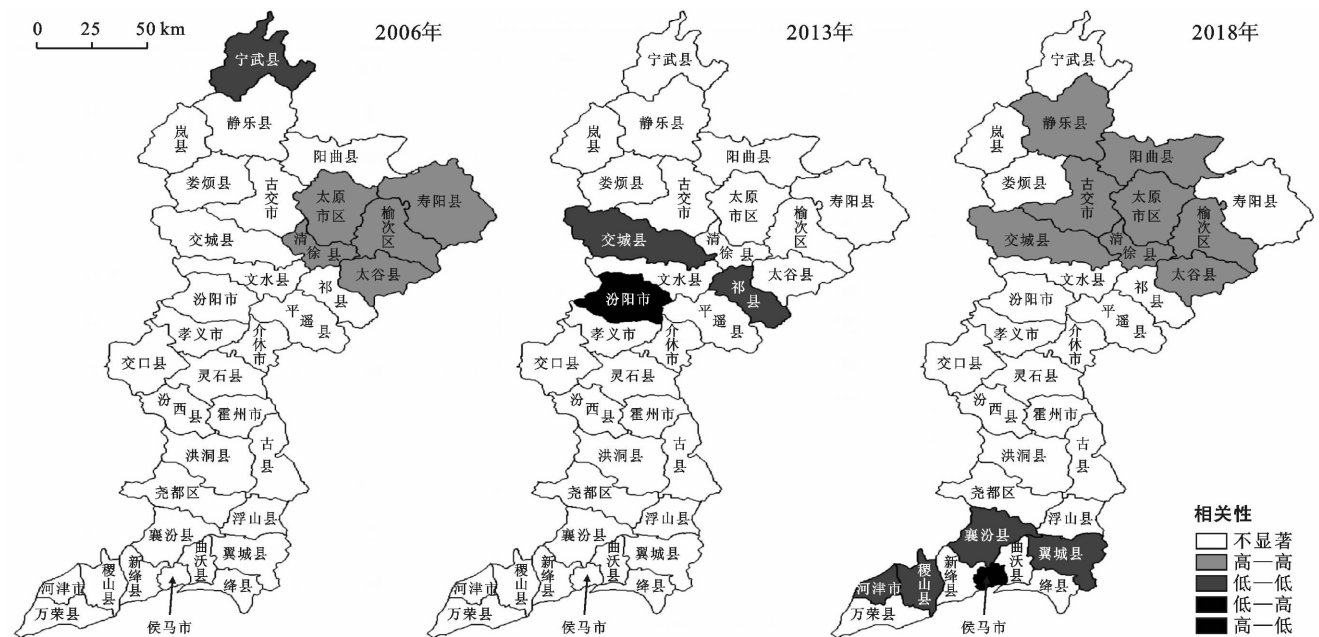


图 4 2006、2013、2018 年汾河流域土地生态安全警度局部空间自相关 LISA 集群特征

2.4 流域土地生态安全警度的影响因素分析

采用地理探测器识别流域土地生态安全警度主导影响因素(表 3),使用 GeoDetector 前需对研究区进行格点化处理,划分 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的 1 626 个格点,然后将所有格点所在位置的自变量及因变量提取作为输入数据^[27];其次对输入数据进行重分类处理,将连续变量转化为类别变量^[28]。本文对 26 项影响因素 X 进行预处理,如地形坡度等依据生态环境状况评价技术规范(HJ192-2015)进行划分,其他影响因素均采用 Jenks 自然断点法分类,将影响因素 X 分为 6 类(层)。其中, q 值为影响因素 X 对土地生态安全预警状况的解释力, q 值介于 $[0, 1]$, q 值越接近于 1,表示影响因素 X 对土地生态安全预警状况的解释力越

强。由此得出,影响汾河流域土地生态安全的主导因子依次为 X_3 (人均 GDP)、 X_{23} (污水处理率)、 X_{25} (建成区绿化率)、 X_{26} (环保投资占 GDP 比例)、 X_4 (城镇居民可支配收入)、 X_{12} (人均粮食产量)。

根据上述主导因子分析可知,汾河流域土地生态安全警度水平主要限于经济发展水平(X_3, X_4)、环境保护投入与治理力度(X_{23}, X_{25}, X_{26})以及土地利用效率(X_{12})等因素的影响。2006—2018 年汾河流域经济发展水平稳步提高,人均 GDP 的增长、城镇居民可支配收入的提高,为流域土地科学利用提供了充足的资金支持,同时也为土地生态安全状况的改善提供了正驱动力。环境保护投入与治理力度直接关系到土地生态安全子系统的循环与修复,2006—2018 年,

随着 GDP 的总体增长,流域内各县区也加大了对环境保护的投入与治理,对流域土地安全等级的优化作用显著。另外,土地的利用效率包括各土地利用类型单

元内的增减更替,单位土地面积的 GDP 产值、粮食产量、能耗等。通过优化三生空间布局,产业结构转型升级以及科研技术投入等均可以提高土地利用效率。

表 3 地理探测器因子探测结果

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
q 值	0.325	0.085	0.538	0.485	0.404	0.192	0.113	0.139	0.169	0.199	0.118	0.444	0.336
p 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
因子	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}
q 值	0.219	0.190	0.157	0.110	0.101	0.057	0.131	0.345	0.058	0.521	0.339	0.572	0.491
p 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:① $0.01 < p < 0.1$ 表示 10% 水平下显著; $p < 0.01$ 表示在 1% 水平下显著; ②本文对收集因子经格点化、离散化处理,使其 p 值显著性水平达到统计分析需要,均为 1% 下显著。

3 结论

(1) 2006—2018 年汾河流域土地生态安全预警指数随时间变化总体表现为向上开口的抛物线演变趋势,多年流域土地生态安全均处于较不安全状态,拟合趋势表明流域土地生态安全未来将由“较不安全”向“临界安全”状态转变。

(2) 流域土地生态安全警度时空格局,时间维度上,多年土地生态安全水平经历“下降—提高”的过程;空间格局上,土地生态安全高值区集中分布于流域中上游东北部,零散分布于流域下游,整体呈现“大集聚、小分散”的格局特征。

(3) 2006, 2013, 2018 年流域土地生态安全警度的全局相关性经历“正相关—负相关—正相关”的转变过程。局部自相关主要显示为高一高(H-H)、高一低(H-L)、低—低(L-L) 3 类,高一高(H-H)主要分布在流域上中游,高一低(H-L)、低—低(L-L)主要分布在流域下游,与流域土地生态安全警度时空格局分布基本一致。

(4) 影响流域土地生态安全的主导因子为经济发展水平(X_3, X_4)、环境保护投入与治理力度(X_{23}, X_{25}, X_{26})、土地利用效率(X_{12}),所以,本文建议通过优化汾河流域生产、生活、生态空间布局,统筹全流域资源调配,注重流域上游源头保育、限制开发,中下游综合整治,建立流域生态补偿机制,加大环境保护与科研投入力度促进流域的生态安全水平的提高。

[参 考 文 献]

[1] Su Shiliang, Chen Xia, Degloria S D, et al. Integrative fuzzy set pair model for land ecological security assessment: A case study of Xiaolangdi Reservoir Region, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(05): 639-647.

[2] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.

[3] Li Jiayou, Chen Yaning, Xu Changchun, et al. Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of Central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 664-677.

[4] 韦宇婵,张丽琴. 河南省土地生态安全警情时空演变及障碍因子[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 238-246.

[5] Li Sucui, Wu Xiao, Zhao Yanling, et al. Incorporating ecological risk index in the multi-process MCRE model to optimize the ecological security pattern in a semi-arid area with intensive coal mining: A case study in Northern China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247: 119143.

[6] 李昊,李世平,银敏华. 中国土地生态安全研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 50-56.

[7] 张成,黄芳芳,尚国菲. 土地生态安全预警系统设计与实现[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 931-944.

[8] 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.

[9] Zhang Li, Chen Ying, Wang Shutao, et al. Assessment and early warning of land ecological security in rapidly urbanizing coastal area: A case study of Caofeidian new district, Hebei, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2445-2454.

[10] 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.

[11] 马世五,谢德体,张孝成,等. 三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8512-8525.

[12] Xie Hualin, He Yafen, Choi Yongrok, et al. Warning of negative effects of land-use changes on ecological se-

- curity based on GIS [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135427.
- [13] 刘秀丽, 郭丕斌, 张勃, 等. 采煤与脆弱生态复合区生态安全评价: 以山西为例[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(3): 677-685.
- [14] 何珍珍, 王宏卫, 杨胜天, 等. 塔里木盆地中北部绿洲生态安全评价[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 963-970.
- [15] 李京京, 吕哲敏, 石小平, 等. 基于地形梯度的汾河流域土地利用时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 230-236.
- [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]. *生态学报*, 2020, 39(6): 2061-2069.
- [17] 山西省统计局. 山西省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2018.
- [18] 中华人民共和国统计局. 中国县(市)社会经济统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2018.
- [19] 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[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 3126-3134.
- [20] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪, 等. 基于 PSR-EEES 模型的叶尔羌平原绿洲生态安全预警测度[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(2): 130-141.
- [21] 魏小芳, 赵宇鸾, 李秀彬, 等. 基于“三生功能”的长江上游城市群国土空间特征及其优化[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1070-1079.
- [22] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. *地理科学*, 2013, 33(11): 1323-1329.
- [23] 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.
- [24] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 7815-7828.
- [25] 邓楚雄, 钟小龙, 谢炳庚, 等. 洞庭湖区土地生态系统的服务价值时空变化[J]. *地理研究*, 2019, 38(4): 844-855.
- [26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [27] 孙泽乾, 杨晓霞, 曾于珈. 基于地理探测器的重庆市旅游发展水平空间分异影响因子研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(4): 57-63.
- [28] 马勇, 童响, 任洁, 等. 公众参与型环境规制的时空格局及驱动因子研究: 以长江经济带为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(11): 1799-1808.

(上接第 131 页)

- [13] 张学艺, 李剑萍, 秦其明, 等. 几种干旱监测模型在宁夏的对比应用[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 18-23.
- [14] 姚云军, 秦其明, 赵少华, 等. 基于 MODIS 短波红外光谱特征的土壤含水量反演[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(1): 9-14.
- [15] 孙灏, 陈浩浩, 孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 147-154.
- [16] 葛少青, 张剑, 孙文, 等. 3 种干旱指数在干旱区沼泽湿地土壤水分遥感反演中的应用[J]. *生态学报*, 2018, 38(7): 2299-2307.
- [17] Du Lingtong, Tian Qingjiu, Yu Tao, et al. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23(1): 245-253.
- [18] 彭杰. 荒漠土壤盐渍化遥感监测与开垦方案分析[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2019.
- [19] 刘新路, 彭杰, 冯春晖, 等. 基于电磁感应仪数据的南疆棉田土壤电导率反演模型研究[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 646-655.
- [20] 蔡亮红, 丁建丽, 魏阳. 基于多源数据的土壤水分反演及空间分异格局研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1057-1067.
- [21] 刘宁. 不同土地利用方式下黄河三角洲土壤特性空间变异研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2007.
- [22] 董雪, 田静, 吴骅, 等. 考虑土壤水分影响的比辐射率方法在地表温度反演中的应用[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1592-1604.
- [23] 蔡国印. 基于 MODIS 数据的地表温度、热惯量反演研究及其在土壤水分、地气间热交换方面的应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
- [24] 姜红, 玉素甫江·如素力, 拜合提尼沙·阿不都克日木, 等. 基于支持向量机回归算法的土壤水分光学与微波遥感协同反演[J]. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(6): 30-36.
- [25] Peng Jie, Biswas A, Jiang Qingsong, et al. Estimating soil salinity from remote sensing and terrain data in southern Xinjiang Province, China [J]. *Geoderma*, 2019, 337: 1309-1319.
- [26] 王思楠, 李瑞平, 李夏子. 基于综合干旱指数的毛乌素沙地腹部土壤水分反演及分布[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 113-121.