

河南省土地生态安全警情时空演变及障碍因子

韦宇婵¹, 张丽琴^{1,2,3}

(1.中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074; 2.加拿大渥太华大学 地理系, 渥太华; 3.中国土地勘测规划院, 国土资源部 土地利用重点实验室, 北京 100035)

摘 要:中原经济区城镇化、工业化进程的快速推进导致区域土地生态环境压力不断增大,对河南省土地生态进行安全预警评估十分有必要。基于 2005—2016 年河南省土地生态安全数据,构建了基于 PSR-EES 模型的土地生态安全指标体系,运用熵权法与综合指数法和障碍度模型,分析了 2005—2016 年河南省 18 个地市土地生态安全警情时空演变和限制性因子。结果表明:(1)从时间序列看,2005—2016 年河南省土地生态安全综合预警指数由 0.725 下降到 0.388,警度从“中警”下降到“预警”,压力预警指数呈上升趋势,警度由“安全”上升为“较安全”,状态和响应预警指数呈下降趋势,警度均处于“安全”。(2)从空间格局看,2005—2016 年河南省土地生态安全综合警情南北差异显著,压力系统和状态系统空间格局呈中部高、周围低的格局,响应系统呈中部低、西部高的空间分布格局。(3)东部和北部区域的主要障碍因子集中在与人口增长和环境保护相关的指标上;南部和西部区域主要障碍因子集中在与生态环保和经济发展有关的指标上;中部平原区域主要障碍因子则与农业发展、生态环境治理和经济发展状况密切指标。

关键词:土地生态安全预警; 时空演变; 熵权法; 障碍因子; 河南省

中图分类号:F301; X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0238-09

Spatiotemporal Pattern and Obstacle Factors of Land Eco-Security Early Warning in Henan Province

WEI Yuchan¹, ZHANG Liqin^{1,2,3}

(1.School of Public Administration, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2.Department of Geography, University of Ottawa, Ottawa, Canada; 3.Key Laboratory of ministry of Land and Land Use, China Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035, China)

Abstract: The rapid progress of the urbanization and industrialization of the Central Plains Economic Zone has led to increasing pressure on the regional ecological environment, and it is necessary to carry out early warning and assessment of the security of land ecology in Henan Province. Based on the land ecological security data of Henan Province from 2005 to 2016, we constructed a land ecological security index system by using PSR-EES model, and used entropy weight method and comprehensive index method and obstacle degree model to analyze the spatial-temporal pattern of land ecological security and the obstacle factors in 18 cities and towns in Henan Province from 2005 to 2016. The results show that: (1) from the time series, the comprehensive warning index of land ecological security in Henan Province decreased from 0.725 in 2005 to 0.388 in 2016, the warning degree dropped from ‘medium alarm’ to ‘slight alarm’; the pressure warning index showed an upward trend, arising from ‘relative security’ to ‘security’; the state and response warning index showed a downward trend, at the level of ‘security’; (2) from the perspective of spatial pattern, the differences between the south and north of the comprehensive early warning of land ecological security in Henan Province from 2005 to 2016 were obvious; the space pattern of the land ecological pressure and state system was higher in the middle areas and lower in the surrounding area, as for the response system, the results of the middle areas were better than western areas; (3) the main obstacle factors in the eastern and northern regions concentrated on the indicators related to population growth and environmental protection; those in the southern and western regions were characterized by indicators related to ecological environmental

收稿日期:2019-05-23

修回日期:2019-06-15

资助项目:国土资源部土地利用重点实验室开放基金(KLLU201704)

第一作者:韦宇婵(1993—),女,广西河池人,硕士研究生,主要研究方向为土地利用规划。E-mail:wyc_gx@sina.cn

通信作者:张丽琴(1973—),女,山西曲沃人,副教授,硕士生导师,主要从事土地利用规划研究。E-mail:lqzhangt@gmail.com

protection and economic development; and those in the central plain region were closely related to agriculture development, ecological environment governance and economic development.

Keywords: land ecological security early warning; entropy weight method; space-time evolution; obstacle factor; Henan Province

土地作为一种特殊的资源,既有经济功能,也融合了生态、环境等具有战略意义的功能,因此土地资源安全关系区域的和谐发展^[1]。生态安全预警是生态安全研究的重要内容,是运用定性和定量相结合的预警模型对生态环境和区域资源进行评价、预测和警报,其目的在于预防和控制影响区域生态系统正常运行的不安全因素,对维护区域生态安全具有重要的意义^[2-4]。

在生态环境破坏的背景下,引起了国内外学者对区域生态安全保护的广泛关注。国外生态安全预警主要围绕土壤肥力和土壤质量^[5]、土地利用变化动态监测预测^[6-8]、土地生态环境预警预测^[9]、农业土壤环境等^[10-11]内容研究,其系统的研究方法应用于生态安全和土地利用变化领域^[7-8]。指标体系方面较为完整,Krotscheck 等于 1996 年提出可持续过程指数成为生态评价的新维度^[12],在此基础上,Costanza 等注重评价指标的建设应考虑可持续利用^[13],Herrick 认为指标选取应反映土地生态系统状态特征^[14]。国内生态安全预警研究起于 20 世纪九十年代末,理论研究方面,傅伯杰等首次对区域生态环境预警进行了较深入的研究,提出了区域生态安全预警综合指标体系^[15];马克明等提出区域生态安全格局概念以适应生态恢复发展需求^[16]。在理论与概念建立的基础上,随之展开了具体的实证研究,研究内容包括土地生态安全时空格局^[17]、湖泊湿地生态环境评价^[18]、群岛生态安全预警^[19]、耕地生态安全评价^[20]。研究方法方面,BP 神经网络算法^[21]、改进 TOPSIS 法^[22]、GM(1,1) 预测模型^[23]、有序加权平均算子(OWA)^[24]、模糊物元法^[25]、情景分析法^[26]等方法均应用于生态安全预测预警。指标体系方面,一是陈美婷、徐美、张智光等基于“压力—状态—响应”(PSR)模型构建生态安全预警指标体系^[27-30],二是吴冠岑、赵旭等基于“环境—社会—经济”(EES)模型构建土地生态安全预警指标^[31-32],对不同区域的生态安全演变趋势进行预测预警。

国内外区域生态安全预警研究成果丰富,但研究内容多侧重时间和空间总体预警层面,障碍因子从省域尺度进行诊断分析,以时空双维度全面分析土地生态安全总体预警、压力系统、状态系统和响应系统,并动态分析地级市尺度的障碍因子成果较少。中原区域地处中国中心地带,中原经济区是三大国家战略规划之一,河南省作为中原经济区的主体,随着城镇化、工业化进程的快速推进,区域内土地生态环境压力不断增大,威胁到

区域土地资源生态安全,对河南省土地生态进行安全警情评估十分有必要。鉴于此,本文以河南省 18 个地市作为研究对象,基于 PSR-EES 模型构建耕地生态安全评价指标体系,运用熵值法确定权重,采用综合指数进行评价,并通过 GIS 空间分析方法,在分析 2005—2016 年河南省各城市土地生态安全总体警情、压力系统、状态系统和响应系统时空格局的基础上,动态分析其限制型因子,旨在为解决河南省生态安全保护与政策制定提供更具有针对性的指导。

1 研究区域、指标体系的建立及数据来源

1.1 研究区概况

河南省地处我国中东部、黄河中下游,黄淮海平原西南部,位于北纬 29°01′53″—33°6′47″,东经 108°21′42″—116°07′50″,东接安徽、山东,北界河北、山西,西连陕西,南临湖北,呈望北向南、承东启西之势,土地总面积为 16.7 万 km²。2016 年底,全省区域生产总值 40 160 亿元,总人口 9 532 万人,地均 GDP 为 2 438 万元/km²。地势呈西高东低,其中北面太行山、西面伏牛山以及南面桐柏山、大别山等山脉环绕三面,中部和东部为黄淮海冲积平原,平原面积占总面积 55.7%,丰富的土地资源是河南省经济社会发展的重要物质基础,但随着城镇化进程不断加快,建设占用导致土地非农化、人口增长、农业面源污染以及土地污水负荷等问题越来越严重,对其生态实施有效的安全保护,具有重要的现实意义。

1.2 预警指标体系的构建

土地生态安全预警作为土地生态安全研究的重要内容之一^[28],对其进行研究要全面考虑土地作为自然环境系统内的资源要素与人类经济活动、社会发展之间的相互关系。土地生态安全指标选取必须与当地的土地生态安全特点结合在一起,除了要对土地生态环境现状进行考虑外,对于影响土地生态安全的潜在因素,以及人类的相关活动都应该纳入其考虑范畴^[33]。河南省是全国重要的农业和人口地区,土地利用的自然及社会经济条件优越,人口及经济增长速度较快,土地资源特别是耕地资源紧缺,人地矛盾较为突出。选取土地生态安全指标时结合河南省人口与耕地资源的实际情况,从经济、社会、人口、资源和环境五大方面遴选 27 项指标。因此,本文以 PSR 模型为基础,遵循可

操作性、实用性、动态性、完整性、科学性等相关原则,参(PSR)模型和“环境—经济—社会”(EES)模型,构建河考相关研究成果^[20-22,27-29],结合“压力—状态—响应”南省土地生态安全指标体系(表 1)。

表 1 河南省土地生态安全评价指标体系

目标层	准则层	因素层	指标层	计算方法	指标解析	指标性质	权重
土地生态安全预警指标体系	环境	C ₁ 建设占用耕地面积(%)	C ₁ 建设占用耕地面积(%)	建设用地面积/耕地面积×100%	表示建设用地扩张压力	—	0.0251
			C ₂ 单位耕地化肥施用量(kg/hm ²)	化肥施用量/耕地面积	表示耕地生态维护压力	—	0.0196
			C ₃ 单位土地废水负荷(kt/km ²)	废水排放量/区域面积	表示土地污染压力	—	0.0360
	压力	经济	C ₄ 经济密度(亿元/km ²)	GDP/区域面积	表示区域单位面积上经济活动的效率和土地利用压力	—	0.0286
			C ₅ GDP 增长率(%)	增长量/基期水平×100%	表示区域经济增长快慢压力	—	0.0333
			C ₆ 农业经济比重(%)	第一产业增加值/GDP×100%	表示经济产业结构压力	—	0.0257
	社会	C ₇ 城市化水平(%)	C ₇ 城市化水平(%)	城镇人口/总人口×100%	表示城市化扩张压力	—	0.0241
			C ₈ 人口自然增长率(‰)	人口出生率-人口死亡率	表示人口增长压力	—	0.0511
			C ₉ 人口密度(人/km ²)	人口总数/区域面积	表示土地承载人口压力	—	0.0346
	环境	C ₁₀ 森林覆盖率(%)	C ₁₀ 森林覆盖率(%)	森林面积/区域面积×100%	表示水土保持状况	+	0.0386
			C ₁₁ 水土协调度(%)	有效灌溉面积/耕地面积×100%	表示灌溉水资源与耕地资源协调状况	—	0.0365
			C ₁₂ 城市人均公园绿地面积(m ² /人)	城市公园绿地面积/城镇人口	表示土地环境状况	+	0.0249
	状态	经济	C ₁₃ 水土流失治理面积比重(%)	水土流失面积/耕地面积×100%	表示水土保持状况	+	0.0374
			C ₁₄ 农电集约度(kW·h/hm ²)	农村用电量/区域面积	表示土地农电投入水平	+	0.0427
			C ₁₅ 农业机械化水平(kW/hm ²)	机械总动力/耕地面积	表示土地生态安全的科技投入水平	+	0.0230
	社会	C ₁₆ 人均建设用地面积(km ² /人)	C ₁₆ 人均建设用地面积(km ² /人)	建设用地面积/人口数	表示建设用地分配状况	—	0.0222
			C ₁₇ 耕地面积比重(%)	耕地面积/区域面积×100%	表示土地结构状况	—	0.0429
			C ₁₈ 粮食单产(kg/hm ²)	粮食总产量/粮食播种面积(复种面积)×100%	表示耕地资源利用状况	+	0.0220
	环境	C ₁₉ 人均耕地面积(hm ²)	C ₁₉ 人均耕地面积(hm ²)	耕地面积/人口数	表示耕地资源安全状况	+	0.0138
			C ₂₀ 自然保护区面积比重(%)	自然保护区面积/区域面积×100%	表示土地生态系统维护力度	+	0.1540
			C ₂₁ 生活污水排放处理率(%)	生活污水处理量/生活污水排放总量×100%	表示土地生态环境维护水平	+	0.0504
	响应	经济	C ₂₂ 工业固体废物综合利用率(%)	工业固体废物综合利用量/工业固体废物产生量×100%	表示土地生态环境维护水平	+	0.0401
			C ₂₃ 人均 GDP(元)	GDP/总人口	表示维护土地生态安全的经济发展水平	+	0.0258
			C ₂₄ 第三产业比重(%)	第三产业增加值/GDP×100%	表示维护土地生态安全的产业发展水平	+	0.0167
	社会	C ₂₅ 农民人均纯收入(元)	C ₂₅ 农民人均纯收入(元)	农民人均纯收入×农村人口比重	表示维护土地生态安全的农民经济发展水平	+	0.0239
			C ₂₆ 环保治理投资占 GDP 比重(%)	环保治理投资额/GDP×100%	表示对土地生态安全维护的重视程度	+	0.0188
			C ₂₇ 机耕程度(%)	机播面积/农作物播种面积×100%	表示维护土地生态安全的农业技术水平	+	0.0442

1.3 数据来源

本文研究数据主要来自 2005—2016 年的河南省土地利用结构现状数据,2006—2017 年的《中国农村统计年鉴》^[34-36]、《中国城市统计年鉴》^[37]、《河南统计年鉴》^[38]、《河南省环境状况公报》^[39],空间矢量数据来源于国家 1:400 万基础地形图。

2 研究方法

2.1 土地生态安全预警模型

(1) 指标标准化。利用极差标准化方法对参评指标进行量化统一,公式为:

正向指标:

$$y_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j) \quad (1)$$

逆向指标:

$$y_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为*i*区域第*j*个指标具体数值; y_{ij} 为指标标准化后的标准值; $\max x_j$, $\min x_j$ 分别为所在区域中第*j*项指标的最大值,最小值。

(2) 权重计算。在计算指标权重时,为避免主观

因素造成的误差,采用客观性较强的熵权法,公式为:

$$\omega_j = (1 - H_j) / (n - \sum_{j=1}^n H_j) \quad (3)$$

式中: $H_j = -K \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}$; $f_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij}$; $K = 1 / \ln n$ (假设在 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$;常数 K 与系统的区域属 n 有关); ω_j 为第*j*项指标的权重值; H_j 为第*j*项指标的熵值^[28,34]。计算结果见表 1。

(3) 预警指数计算其公式为:

$$F_P = \omega_j \times y_{ij} \quad (4)$$

$$F = \sum_{j=1}^n F_P \quad (5)$$

式中: F_P ($P=1,2,3$) 为 y_{ij} 的生态评价价值; ω_p 为 P 系统对应的权重值; F 为第*i*个区域的预警指数。

2.2 障碍度模型

在对区域土地生态安全预警进行计算的基础上,对各区域的障碍因子进行诊断,以期因地制宜地制定相应措施,解决土地生态安全问题。本文引进因子贡献度(I_j)、指标偏离度(J_{ij})和障碍度(O_{ij} , U_{ij})3个指标进行障碍因子诊断^[1,20,33],公式为:

$$O_{ij} = \frac{I_j \times J_{ij}}{\sum_{j=1}^n (I_j \times J_{ij})} \times 100\%$$
$$U_{ij} = \sum O_{ij}$$

(6)

(7)

式中： $I_j = w_j$ ； $J_{ij} = 1 - y_{ij}$ ； J_{ij} 表示第 i 年第 j 个指标与土地生态预警值的差距； O_{ij} 为第 i 年各单项指标对该年土地生态安全的障碍度； U_{ij} 是准则层指标的障碍度。

2.3 土地生态安全警度确定

采用等分的原理,根据预警指数大小,参考相关文献^[4,17,19,28],本文将河南省土地生态安全警度评判标准划分为安全、较安全、轻警、中警、重警 5 个安全档次(表 2),不同的预警指数对应不同等级的生态安全预警级别。综合预警指数越高,说明区域的土地生态安全警度越严重;反之,说明区域的土地生态安全预警状况越好^[21-22,28]。

表 2 河南省土地生态安全警度标准

预警指数	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1)
等级	I	II	III	IV	V
警度	安全	较安全	轻警	中警	重警

3 结果与分析

3.1 土地生态安全警情时间变化特征

3.1.1 土地生态安全综合警情分析 总体来看,2005—2016 年河南省的土地生态安全综合预警指数由 2005 年的 0.725 下降到 2016 年的 0.388(图 1 与表 3),呈现下降趋势,生态安全等级变化趋同,土地生态安全状态也由“中警”逐渐下降到“轻警”,土地生态环境得到一定改善。2005—2010 年土地生态安全综合预警指数上升的有洛阳、濮阳和三门峡 3 个城市,其中洛阳和三门峡综合预警指数虽有所上升,但安全等级变化不大,而濮阳上升了 0.161,其他 15 个城市土地生态安全综合预警指数存在不同程度的下降,其中最明显的驻马店下降了 0.322,安全等级下降了 2 个等级,从第Ⅲ级下降到第Ⅰ级。2010—2016 年土地生态安全综合预警指数上升的城市增加到 10 个,仅洛阳、平顶山、安阳、鹤壁、焦作、濮阳、漯河和南阳 8 个城市土地生态环境得到改善,改善最明显的濮阳下降了 0.193,安全等级改善到第Ⅰ级,安全等级下降了 1 个等级,焦作土地生态环境改善较缓,安全等级无变化。

3.1.2 土地生态安全子系统警情分析 2005—2016 年,河南省土地生态安全压力系统预警指数变化趋势是整体波动上升,警度从最初的“安全”上升到“较安全”(图 1 与表 4),表明河南省土地生态面临的压力不断加大。河南省从 2005 年开始,随着工业化与城市化进程不断加

快,农业面源、地下水与化肥等污染问题日益显现,土地污染问题已逐渐影响到了整个土地的生态安全,河南省人口密度从 2005 年的 585 人/km² 增长到 2016 年的 646 人/km²,人口不断增加逐渐加剧了人地矛盾,同时生态负荷逐渐增大,从 2005 年的 8.77×10⁶ t/km² 上升到 2016 年的 1.11×10⁷ t/km²。不同阶段压力指数变化幅度不同,2010—2016 年土地生态安全压力指数上升 0.114,2005—2010 年上升幅度相对较小为 0.032。2005—2016 年河南省各城市土地生态安全压力指数变化显著,开封、洛阳、平顶山、安阳、鹤壁、焦作、濮阳、漯河、三门峡和南阳土地生态安全压力指数下降幅度较大,变化幅度处于 0.03~0.07。土地生态安全压力指数下降幅度较小的城市包括新乡、濮阳、许昌、商丘、周口、驻马店和济源,变化幅度在 0.01~0.03。郑州土地生态安全压力指数呈上升趋势,郑州作为省会城市其城市化水平最高,人口密度与建设用地占用耕地面积比重最大,这 12 a 间土地生态安全压力指数不断上升,土地生态环境压力较大。

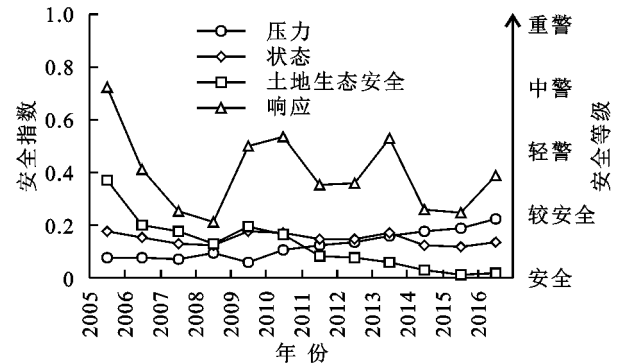


图 1 2005—2016 年河南省土地生态安全预警指数及警度的变化

表 3 2005—2016 年河南省区域土地生态安全综合预警指数

城市	2005 年		2010 年		2016 年	
	预警指数	等级	预警指数	等级	预警指数	等级
郑州	0.811	V	0.716	IV	0.731	IV
开封	0.520	III	0.263	II	0.264	II
洛阳	0.591	III	0.596	III	0.470	III
平顶山	0.553	III	0.391	II	0.295	II
安阳	0.555	III	0.292	II	0.233	II
鹤壁	0.526	III	0.326	II	0.175	I
新乡	0.365	II	0.244	II	0.361	II
焦作	0.446	III	0.372	II	0.364	II
濮阳	0.204	II	0.366	II	0.172	I
许昌	0.378	II	0.229	II	0.295	II
漯河	0.545	III	0.370	II	0.282	II
三门峡	0.456	III	0.457	III	0.505	III
南阳	0.443	III	0.284	II	0.229	II
商丘	0.349	II	0.141	I	0.277	II
信阳	0.202	II	0.113	I	0.195	I
周口	0.369	II	0.193	I	0.280	II
驻马店	0.437	III	0.115	I	0.147	I
济源	0.451	III	0.358	II	0.394	II

2005—2016 年,河南省土地生态安全状态系统预警指数呈现波动下降的态势,该指数整体处于 0.08~0.19 之间,警度处于“安全”状况(图 1 与表 4),表明土地生态环境状态得到改善。河南省森林覆盖率和城市人均公园绿地面积不断增加,环境状态改善成效显著,经济状态中农电集约度指标增长较快,社会状态主要受耕地粮食单产和人均耕地面积两个指标影响改善明显。分阶段看,2005—2010 年土地生态安全状态指数下降较快,下降明显的驻马店为 0.048,焦作状态指数则上升了 0.012;2010—2016 年土地生态安全状态指数下降速度放缓,指数值下降最快的洛阳为

0.038,状态指数上升较快的周口为 0.020。2005—2016 年河南省各区域土地生态安全状态指数变化差异较小,河南全省 18 个地市状态指数都呈下降的变化趋势。三门峡由于城市人均公园绿地面积指标从 2005 年的 13.90 m²下降到 2016 年的 5.08 m²,影响了土地生态环境状态的改善。郑州状态指数有所下降,土地生态环境状态得到改善,但由于城市人均公园绿地面积和人均耕地面积指标改善较小,其状态指数一直处于全省最大值。安阳、鹤壁、漯河、信阳和驻马店由于环境状态和经济状态指标改善较大,其状态指数下降幅度相对较大。

表 4 2005—2016 年河南省区域土地生态安全子系统预警指数

城市	压力指数			状态指数			响应指数		
	2005 年	2010 年	2016 年	2005 年	2010 年	2016 年	2005 年	2010 年	2016 年
郑州	0.320	0.337	0.356	0.190	0.180	0.155	0.106	0.067	0.064
开封	0.178	0.135	0.125	0.166	0.146	0.128	0.130	0.070	0.074
洛阳	0.162	0.126	0.126	0.174	0.173	0.136	0.160	0.192	0.174
平顶山	0.197	0.163	0.141	0.166	0.144	0.132	0.127	0.107	0.066
安阳	0.192	0.155	0.129	0.157	0.124	0.117	0.140	0.094	0.079
鹤壁	0.189	0.148	0.128	0.142	0.130	0.101	0.147	0.108	0.085
新乡	0.174	0.158	0.144	0.140	0.117	0.105	0.101	0.078	0.169
焦作	0.262	0.197	0.195	0.102	0.114	0.101	0.100	0.108	0.132
濮阳	0.159	0.136	0.112	0.107	0.103	0.101	0.085	0.167	0.099
许昌	0.141	0.140	0.131	0.135	0.128	0.125	0.136	0.074	0.093
漯河	0.223	0.172	0.165	0.163	0.123	0.116	0.107	0.116	0.075
三门峡	0.107	0.108	0.069	0.150	0.137	0.146	0.175	0.190	0.223
南阳	0.120	0.073	0.063	0.150	0.129	0.120	0.162	0.151	0.130
商丘	0.142	0.124	0.129	0.139	0.106	0.104	0.120	0.075	0.136
信阳	0.073	0.079	0.061	0.146	0.099	0.106	0.112	0.107	0.147
周口	0.101	0.085	0.086	0.158	0.114	0.134	0.141	0.119	0.104
驻马店	0.095	0.072	0.067	0.174	0.126	0.123	0.154	0.080	0.071
济源	0.185	0.157	0.181	0.185	0.173	0.149	0.081	0.062	0.045

2005—2016 年,河南省土地生态安全响应系统预警指数从 0.370 下降至 0.015,警度由“较安全”下降至“安全”(图 1 与表 4),可见其发展态势良好,表明在土地生态压力加大的趋势下,土地生态响应得到较程度的优化。为应对破坏土地生态等一系列问题,河南全省积极响应,先后出台了《河南省耕地质量管理条例》、《河南省农业环境保护条例》等一系列的政策法规。响应指数阶段变化特征明显,2005—2010 年土地生态安全响应指数下降显著,该阶段数值与压力指数和状态指数相比变化幅度大,由于河南省积极推进生态建省的理念,土地生态环境治理效果显著;2010—2016 年土地生态安全响应指数下降速度放

缓,其中全省自然保护区面积、工业废水排放达标率和工业固体废弃物综合利用率指标不断上升。2005—2016 年河南省各区域土地生态安全响应指数变化差异明显,其中洛阳、新乡、焦作、濮阳、三门峡、商丘和信阳响应指数上升,驻马店环境、经济和社会各方面指标改善明显,其响应指数下降幅度最大,其余区域响应指数下降幅度较小。

3.2 土地生态安全预警空间格局分析

运用 ArcGIS 10.2 制图技术,将河南省各区域 2005 年、2010 年、2016 年的土地生态安全警情绘制成空间分异图(图 2)。

从土地生态安全预警指数空间变化看(图 2),

2005 年高值出现在中部郑州, 低值出现在东部和南部, 中部大部分城市和西南部城市警度处于“中警”, 土地生态安全等级分 3 个级别; 2010 年呈中西北部高、东南部低的格局, 商丘、信阳、周口和驻马店警度处于“安全”, 中西部大部分城市警度处于“较安全”, 总体预警指数有下降趋势, 且幅度较大, 土地生态安全等级分 4 个级别; 2016 年则呈中西部高、东北部和南部低的格局, 中北部大部分区域警度处于“较安全”, 东北部和南部区域警度处于“安全”, 东西差异明显。2005—2016 年 17 个城市土地生态安

全预警值呈现下降趋势, 土地生态安全状况优化趋势明显。郑州面临人口压力过大、土壤质量下降、河流湖泊水质恶化等问题严重, 促使其城市土地生态安全预警值一直处于最高值, 可见其面临严峻的土地生态安全环境问题。三门峡土地生态安全综合预警值呈增加态势, 压力指数虽小幅下降, 但三门峡作为矿产资源型城市, 同时受限于其所处的地形区位, 其生态环境状态指数和响应指数上升幅度较大, 导致土地生态安全状况逐年下降, 2016 年警度达到了“轻警”水平。

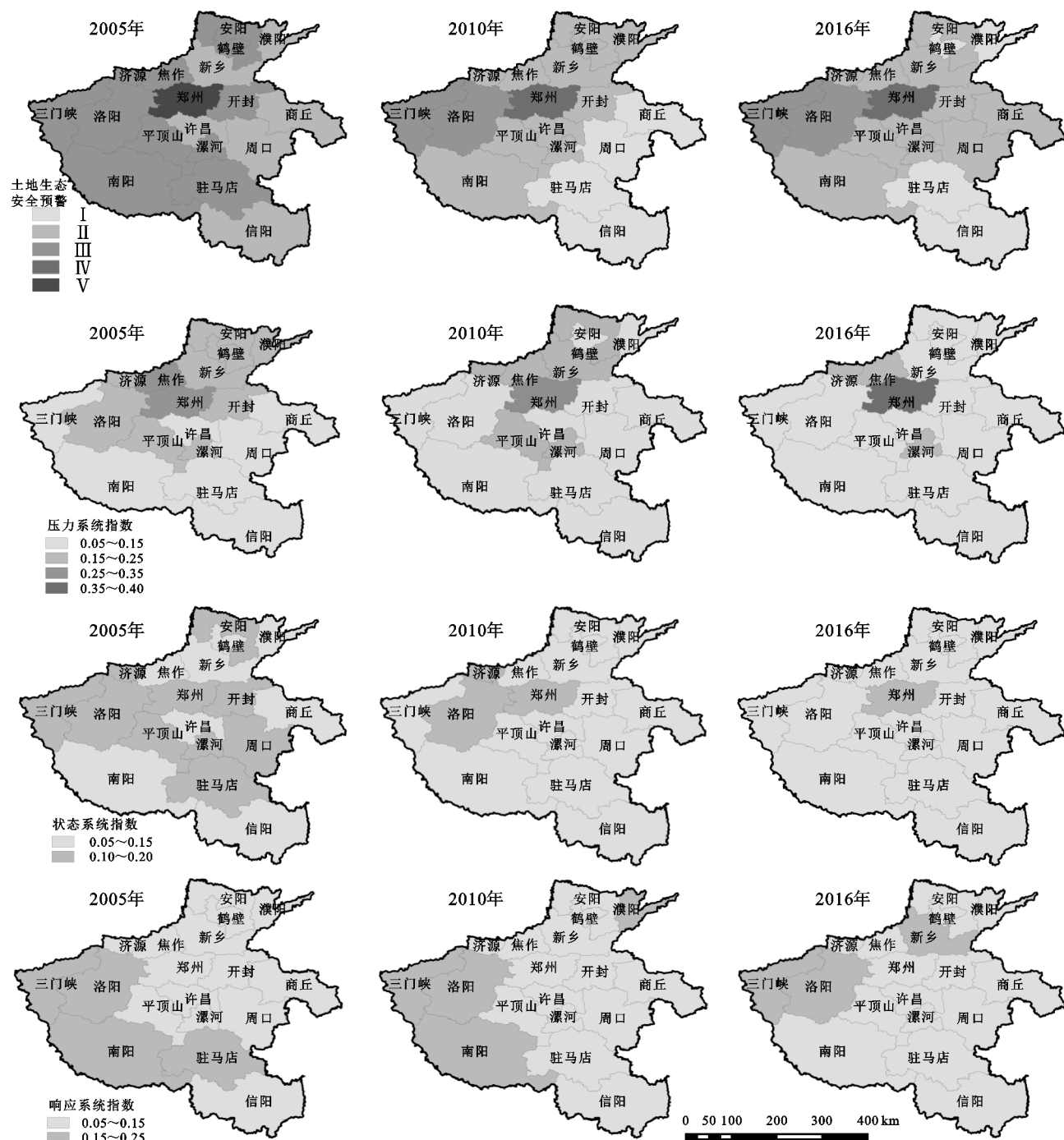


图 2 2005—2016 年河南省土地生态安全预警空间分异

从生态安全预警压力指数空间变化看(图 2), 2005 年中北部生态压力高于其他区域, 压力指数在 0.07~0.32, 全省生态安全压力差异显著。2005—2010 年压力指数高值区出现在中北部区域, 其他区域为低值区。焦作和漯河生态安全压力明显改善, 压力指数下降幅度大。郑州、三门峡和信阳压力有逐渐增大的趋势, 压力指数空间格局逐渐形成中部与周围的差异, 且高值区范围逐渐扩大, 压力指数在 0.07~0.33。2010—2016 年压力指数空间分布发生变化, 呈中部区域较高于周围其他区域的格局, 生态压力格局差异减小, 平顶山、安阳、鹤壁、濮阳和三门峡压力环境改善较好。2005—2016 年河南省压力指数空间格局由南北差异向中部与周围差异演变。

从生态安全预警状态指数空间变化看(图 2), 2005 年状态指数北部(除安阳外)、东部和南部较低, 中西部(除许昌外)区域状态指数较高。2005—2010 年状态指数空间分布成中间高、周围低的格局, 生态安全状态格局在保持上一阶段的基础上, 7 个城市生态安全状态得到改善。2010—2016 年生态安全状态洛阳和济源生态安全状态优化明显, 三门峡、信阳和周口状态指数呈现上升的趋势。2005—2016 年河南省状态指数呈中部高、周围低的格局, 状态指数数值在 0~0.20 之间, 郑州生态安全状态一直处于最高值。

从生态安全预警响应指数空间变化看(图 2), 2005 年响应指数空间分布仅西部(洛阳和三门峡)和南部(南阳和驻马店)4 个城市较高, 其他区域响应指数较低。2005—2010 年由于积极响应土地生态环境治理, 驻马店响应指数下降幅度最大, 5 个城市响应指数呈上升的变化趋势, 响应指数数值范围在 0~0.20, 响应指数分布在东北部和西部较高, 中部区域响应指数较低。2010—2016 年响应指数空间差异整体有缩小的趋势, 虽有 15 个城市响应指数较低, 但响应指数上升的城市增加到 7 个, 数值范围逐渐增大, 在 0~0.30, 响应指数空间分布呈西部较高、其余区域(除新乡外)较低的格局。2005—2016 年河南省响应指数总体呈中部低、西部高的空间分布格局, 响应指数数值呈增大趋势。

3.3 障碍因子诊断

据公式(6)和(7)可计算得到 2005—2016 年河南省 18 个地市土地生态安全的指标障碍度。由于指标因子较多, 本文仅选取障碍度排序前 6 的指标为主要障碍因子(表 5), 以此对河南省各城市土地生态安全的主要障碍因素进行诊断^[40]。

不同区域间主要障碍因子差异显著。中部平原区域的郑州、开封、洛阳、平顶山、焦作、许昌、漯河和

济源, 各城市间限制性因子变化差异较大。郑州、开封和洛阳作为中原区域的重要中心, 3 个城市社会经济稳步发展, 2005—2016 年主要障碍因子变化集中在第三产业比重、单位耕地化肥施用量、环保治理投资占 GDP 比重、人均生产总值等指标上, 且限制因子排序变化差异较小。焦作和济源主要障碍因子集中在由农业发展和环境保护相关指标向经济投入发展指标转变。平顶山、许昌和漯河 2005—2016 年土地生态安全状况逐渐提高, 其主要障碍因子变化较大, 限制因子变化集中在环境保护和农业经济有关的指标。东部区域的商丘和周口, 2005—2016 年主要障碍因子变化集中在与人口增长和环境保护有关的指标上, 且变化趋同。商丘、周口是豫东平原传统农业区, 两城市经济发展平缓, 限制因子在城市化水平、人均建设用地面积、水土协调度、单位土地废水负荷、工业固体废物综合利用率等指标波动变化。南部区域的南阳、信阳和驻马店, 2005 年主要障碍因子集中在 GDP 增长、人均建设用地面积这几个与社会经济相关的指标上, 2016 年人均耕地面积、环保治理投资占 GDP 比重、人口密度等指标取而代之。北部区域的安阳、鹤壁、新乡和濮阳, 主要障碍因子集中在与环保治理和社会经济发展相关的指标。西部地处山区的三门峡 12 a 来土地生态安全预警值逐渐增大, 生态安全状况不断下降, 其主要障碍因子 2005 年第 1 位的耕地面积比重为 17.26%, 全省最低, 而 GDP 增长率 2005 年为 30.08%, 增长幅度较大, 2016 年该指标为 5.98%, 仅次于耕地面积比重成为第二大障碍因子。期间三门峡不断加强对生态环境投入建设, 由于自然条件较差, 绿化建设、环境保护仍成为城市发展的限制性因子。

4 结论

本文运用主客观赋权法和综合指数法对河南省 2005—2016 年土地生态安全及各子系统进行综合评价并分析其时空演变规律, 其结果与河南省实际情况相符^[41-43], 得出以下主要结论:

(1) 从时间尺度看, 2005—2016 年河南省土地生态环境压力虽呈上升趋势, 但状态和响应预警指数均呈下降趋势, 且全省积极响应采取有效治理措施, 土地生态安全综合预警指数逐渐下降, 安全等级由第Ⅳ级提高到第Ⅲ级。但安全等级靠近“预警”临界值波动变化, 因此目前土地生态安全仍未从根本上提高且不稳定。采取有效措施解决土地生态的压力, 促进人地协调的可持续发展, 这将成为河南省未来几年发展的重要环节。

表 5 2005—2016 年河南省区域土地生态安全主要障碍因子

城市		2005 年障碍因子						城市		2016 年障碍因子					
		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
中部地区	郑州	C ₁₃	C ₁₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₂₃	C ₉	郑州	C ₁₃	C ₂₃	C ₂₅	C ₁₄	C ₂₄	C ₆	
	开封	C ₂₆	C ₁₁	C ₂	C ₁₅	C ₂₂	C ₂₄	开封	C ₂₆	C ₂₄	C ₁₁	C ₂	C ₂₂	C ₁₉	
	洛阳	C ₂₀	C ₁₀	C ₁₇	C ₂₃	C ₂	C ₆	洛阳	C ₂₀	C ₁₇	C ₁₀	C ₂₄	C ₂	C ₁₂	
	平顶山	C ₆	C ₂₁	C ₂₇	C ₁₀	C ₁₆	C ₁₇	平顶山	C ₂₆	C ₂₄	C ₂₁	C ₅	C ₂₂	C ₁₆	
	焦作	C ₁₄	C ₂₆	C ₁₈	C ₂₅	C ₁₁	C ₁₅	焦作	C ₂₅	C ₁₁	C ₂₃	C ₁₈	C ₁₄	C ₆	
	许昌	C ₂₁	C ₂₅	C ₁₈	C ₁₁	C ₈	C ₂	许昌	C ₂₅	C ₂₃	C ₆	C ₁₈	C ₂₂	C ₂₇	
	漯河	C ₁₂	C ₉	C ₂₂	C ₂₅	C ₂₇	C ₁₈	漯河	C ₁₂	C ₂₆	C ₁₈	C ₂₂	C ₁₁	C ₂₁	
东部地区	济源	C ₂₀	C ₁₇	C ₂₃	C ₁₅	C ₂₅	C ₁₀	济源	C ₂₀	C ₂₃	C ₁₇	C ₁₂	C ₂₅	C ₂	
	商丘	C ₈	C ₂₂	C ₁₁	C ₁₆	C ₇	C ₃	商丘	C ₁₁	C ₇	C ₁₈	C ₁₆	C ₃	C ₁	
	周口	C ₉	C ₅	C ₇	C ₁₆	C ₁₁	C ₂₂	周口	C ₇	C ₁₆	C ₃	C ₅	C ₁	C ₂₂	
南部地区	南阳	C ₁₂	C ₁₇	C ₅	C ₃	C ₁₆	C ₁₀	南阳	C ₈	C ₁₇	C ₁₉	C ₁₀	C ₉	C ₇	
	信阳	C ₁₉	C ₈	C ₂₀	C ₅	C ₂	C ₂₄	信阳	C ₂₀	C ₁₉	C ₂	C ₂₆	C ₁₈	C ₁₇	
北部地区	驻马店	C ₅	C ₂₁	C ₇	C ₁₆	C ₉	C ₃	驻马店	C ₂₆	C ₁₉	C ₇	C ₉	C ₃	C ₂₂	
	安阳	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₁	C ₆	C ₁₈	C ₂₅	安阳	C ₁₃	C ₁₄	C ₈	C ₂₄	C ₅	C ₂₂	
	鹤壁	C ₁₁	C ₁₅	C ₈	C ₉	C ₁₈	C ₂₅	鹤壁	C ₁₂	C ₁₅	C ₂	C ₁₈	C ₅	C ₂₅	
	新乡	C ₁₄	C ₂₆	C ₂₂	C ₂₄	C ₁₁	C ₅	新乡	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₁	C ₁₈	C ₂₄	C ₁₉	
	濮阳	C ₁₂	C ₂₁	C ₁₁	C ₂₂	C ₈	C ₂₆	濮阳	C ₁₁	C ₁₈	C ₇	C ₁₅	C ₂₂	C ₁₂	
西部地区	三门峡	C ₁₇	C ₁₂	C ₂	C ₂₀	C ₈	C ₂₁	三门峡	C ₁₇	C ₅	C ₂	C ₂₀	C ₈	C ₁₀	

(2) 从空间格局看,2005—2016 年,豫东和豫南区域的土地生态综合环境明显优于河南省其他区域,且区域间土地生态安全警度差距逐渐减小。土地生态压力系统空间分布由南北差异向中部与周围差异演变,生态环境压力得到明显改善;生态环境状态系统呈中部高、周围低的格局,生态环境状态保持较好;积极响应状况呈中部低、西部高的空间分布格局,西部山区受地理区位限制,区域生产总值增长幅度较小,对城市生态环境治理的经济投入造成影响。

(3) 从障碍因子看,2005—2016 年,河南省中部平原区域各城市间限制性因子变化差异较大,郑州、开封和洛阳主要障碍因子与产业经济发展和生态环境治理等指标,焦作和济源主要障碍因子集中在由农业发展和环境保护相关指标向经济投入发展指标转变,平顶山、许昌和漯河主要障碍因子变化集中在与环境保护和社会经济有关指标;东部区域主要障碍因子集中在与人口增长和环境保护有关的指标;南部区域主要障碍因子集中在与生态环保和经济发展有关的指标上;北部区域主要障碍因子集中在与环保治理和社会经济发展相关的指标;西部山区主要障碍因子与绿化环保、人口和经济发展有关。

参考文献:

[1] 李春燕,南灵.陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J].中国土地科学,2015,29(4):72-81.

[2] 马世五,谢德体,张孝成,等.三峡库区生态敏感区土地生态安全预警测度与时空演变:以重庆市万州区为例[J].生态学报,2017,37(24):8227-8240.

[3] 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[J].生态学报,2014,34(16):4720-4733.

[4] 徐成龙,程钰,任建兰.黄河三角洲地区生态安全预警测度及时空格局[J].经济地理,2014,34(3):149-155.

[5] Turner M D. Rethinking land endowment and inequality in rural africa:The importance of soil fertility[J]. World Development, 2016,87:258-273.

[6] Riebsame W E, Meyer W B, Turner B L. Modeling land use and cover as part of global environmental change[J]. Climatic Change, 1994,28(1/2):45-64.

[7] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use:the CLUE-S model[J]. Environmental Management, 2002,30(3):391-405.

[8] Holman I P, Brown C, Janes V, et al. Can we be certain about future land use change in Europe? A multi-scenario, integrated-assessment analysis[J]. Agricultural Systems, 2017,151:126-135.

[9] Capparelli G, Tiranti D. Application of the MoniFLaIR early warning system for rainfall-induced landslides in Piedmont region(Italy)[J]. Landslides, 2010,7(4):401-410.

[10] Hansen V, Müller-Stöver D, Imparato V, et al. The effects of straw or straw-derived gasification biochar

- applications on soil quality and crop productivity: A farm case study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 186: 88-95.
- [11] Rahman M M, Howladar M F, Faruque M O. Assessment of soil quality for agricultural purposes around the Barapukuria coal mining industrial area, Bangladesh: insights from chemical and multivariate statistical analysis[J]. *Environmental Systems Research*, 2017, 6(1): 1-13.
- [12] Krotscheck C, Narodoslawsky M. The Sustainable Process Index a new dimension in ecological evaluation[J]. *Ecological Engineering*, 1996, 6(4): 241-258.
- [13] Costanza R, De Groot R, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [14] Herrick J E. Soil quality: an indicator of sustainable land management[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 75-83.
- [15] 傅伯杰. 区域生态环境预警的理论及其应用[J]. *应用生态学报*, 1993, 4(4): 436-439.
- [16] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- [17] 张玉泽, 任建兰, 刘凯. 山东省生态安全预警测度及时空格局[J]. *经济地理*, 2015, 35(11): 166-171, 189.
- [18] 高家骥, 李雪铭, 张峰, 等. 南四湖湖泊湿地生态环境预警研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(8): 1219-1226.
- [19] 周彬, 钟林生, 陈田, 等. 基于变权模型的舟山群岛生态安全预警[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1854-1862.
- [20] 赵宏波, 马延吉. 东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子: 以吉林省为例[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 515-524.
- [21] 李明月, 赖笑娟. 基于 BP 神经网络方法的城市土地生态安全评价: 以广州市为例[J]. *经济地理*, 2011, 31(2): 289-293.
- [22] 徐美, 朱翔, 李静芝. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的湖南省土地生态安全评价[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1265-1272.
- [23] 周健, 刘占才. 基于 GM(1,1) 预测模型的兰州市生态安全预警与调控研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(1): 15-19.
- [24] 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.
- [25] 符娟林, 乔标. 基于模糊物元的城市化生态预警模型及应用[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 990-995.
- [26] 熊建华, 唐将伟. 基于情景分析法的城市土地生态安全预警研究: 以深圳为例[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(3): 1215-1219.
- [27] 陈美婷, 匡耀求, 黄宁生. 基于 RBF 模型的广东省土地生态安全时空演变预警研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 217-224.
- [28] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警[J]. *地理学报*, 2012, 67(10): 1411-1422.
- [29] 刘海龙, 谢亚林, 贾文毓, 等. 山西省生态安全综合评价及时空演化[J]. *经济地理*, 2018, 38(5): 161-169.
- [30] 张智光. 基于生态—产业共生关系的林业生态安全测度方法构想[J]. *生态学报*, 2013, 33(4): 1326-1336.
- [31] 马世五, 谢德体, 张孝成, 等. 三峡库区生态敏感区土地生态安全预警测度与时空演变: 以重庆市万州区为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8227-8240.
- [32] 吴冠岑, 牛星. 土地生态安全预警的惩罚型变权评价模型及应用: 以淮安市为例[J]. *资源科学*, 2010, 32(5): 992-999.
- [33] 赵旭, 叶剑平, 薛姝. 基于改进灰色关联分析法的湖南省城市土地可持续利用评价[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 265-269, 324.
- [34] 鲁春阳, 文枫, 杨庆媛, 等. 基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断: 以重庆市为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(3): 535-541.
- [35] 李秀芝. 北戴河新区耕地景观生态安全时空变化研究[J]. *中国农业资源与区别*, 2017, 38(3): 59-64.
- [36] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2006—2017.
- [37] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2006—2017.
- [38] 河南省统计局. 河南年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2006—2017.
- [39] 2006—2017 河南省环境状况公报[DB/OL]. <http://www.hnep.gov.cn>.
- [40] 樊鹏飞, 梁流涛, 陈常优, 等. 城市土地集约利用评价及障碍因子诊断: 基于生态健康与低碳发展视角[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 273-279.
- [41] 张小虎, 牛海鹏, 郭增长. 基于三角模型的城市土地生态安全区域差异分析: 以河南省为例[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(2): 21-30.
- [42] 郑敬刚, 许淑娜, 喻铮铮, 等. 中原经济区核心区土地资源生态安全评价[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 273-277, 282.
- [43] 李玲, 侯淑涛, 赵悦, 等. 基于 P-S-R 模型的河南省土地生态安全评价及预测[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 188-192.