

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

吕广斌¹, 廖铁军¹, 姚秋昇², 邓薇³

(1.西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2.重庆市国土资源和房屋勘测规划院,
重庆 400020; 3.贵州财经大学 公管学院, 贵阳 550025)

摘 要:土地生态安全是生态环境保护以及区域生态文明建设的基础。以长江经济带的重要节点重庆市为研究对象,基于 DPSIR—EES 模型构建区域土地生态安全评价体系,在运用 TOPSIS 法揭示了重庆市土地生态安全整体变化状况的基础上,通过 ESDA—GIS 法开展了区域土地生态安全时空分异研究。结果表明:(1) 2009—2016 年,重庆市土地生态安全呈现波动上升的趋势,土地生态安全由“敏感级”向“良好级”转变;土地生态安全各子系统整体趋于好转;(2) 2009—2016 年,主城区土地生态安全有所退化,而渝西片区、渝东北片区、渝东南片区得以改善;总的来说,土地生态安全“敏感级”和“危险级”集中于主城区和渝西片区,而“临界级”和“良好级”主要分布在渝东北及渝东南片区;(3) 重庆市土地生态安全存在较强的空间正相关和聚集性,其“高一高”和“低—低”值区呈现增加趋势,“高一高”和“低—低”值区的分布与自然生态状况、人类活动密切相关。研究结果能为区域的土地生态系统保护与社会经济可持续发展提供参考依据。

关键词:土地生态安全; DPSIR—EES—TOPSIS 模型; 时空分异; 重庆市

中图分类号:X826; F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0249-10

Spatiotemporal Variation and Land Ecological Security and Its Evaluation in Chongqing City Based on DPSIR—EES—TOPSIS Model

LÜ Guangbin¹, LIAO Tiejun¹, YAO Qiusheng², DENG Wei³

(1.School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2.Chongqing Land Resources and Housing Surveying and Planning Institute, Chongqing 400020, China;

3.College of Public Administration, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)

Abstract:Land ecological security is the basis of ecological environmental protection and regional ecological civilization construction. Based on DPSIR—EES model, the evaluation system of regional land ecological security of Chongqing City which is an important node of the Yangtze River Economic Zone is constructed. On the basis of the overall change of land ecological security in Chongqing City diagnosed by TOPSIS method, the spatial and temporal differentiation of regional land ecological security is studied by using ESDA—GIS method. The results show that: (1) the land ecological security of Chongqing City presents the fluctuating upward trend, and changes from ‘sensitive level’ to ‘good level’, and the subsystems of land ecological security tend to improve as a whole from 2009 to 2016; (2) from 2009 to 2016, the land ecological security of the main urban area had deteriorated, while the western, northeastern and southeastern parts of Chongqing City had improved; to be specific, the ‘sensitive level’ and ‘dangerous level’ of land ecological security concentrate in the main urban area and the western part of Chongqing, while the ‘critical level’ and ‘good level’ mainly distribute in the northeastern and southeastern parts of Chongqing City; (3) land ecological security in Chongqing the presents the strong positive spatial correlation and aggregation, and its ‘high—high’ and ‘low—low’ value areas present the increasing trend, and the distribution of the value is closely related to the natural ecological conditions and human activities. The results of this study can provide the reference for the

收稿日期:2019-01-06

修回日期:2019-02-20

资助项目:教育部人文规划基金(15XJA790002);国家自然科学基金重点项目(41530855)

第一作者:吕广斌(1994—),男,四川邻水人,硕士研究生,研究方向为土地资源利用与规划。E-mail:403884060@qq.com

通信作者:廖铁军(1961—),男,重庆合川人,教授,硕士生导师,主要从事土地资源利用与规划研究。E-mail:ltjhy-007@163.com

protection of regional land ecosystem and the sustainable development of social economy.

Keywords: land ecological security; DPSIR—EES—TOPSIS model; spatiotemporal variation; Chongqing City

土地作为人类生存与发展的物质载体,土地生态安全反映着社会安全^[1-2]。随着我国快速的城镇化和工业化,人地冲突愈加严重,人类不合理的土地开发和土地利用方式,导致区域土地生态系统失去自有平衡,土地生态问题严重威胁着区域土地生态安全及可持续利用^[3-4]。因此,运用合理的方法和评价体系研究土地生态安全,分析区域土地生态系统的空间关系对于促进区域土地生态文明建设有重要意义。

土地生态安全研究作为生态安全研究的重要内容,国内外学者对土地生态安全问题从不同角度进行了研究^[5]。国外学者研究主要集中在生态系统健康^[6-7]和生物保护^[8]等方面。目前国内的研究主要从评价框架体系、研究方法、区域尺度等方面开展。从评价框架体系方面看,主要选取“环境(自然)—经济—社会”^[9]、PSR模型^[10]、DPSIR^[11]模型等评价模型。从采用的研究方法来看,主要有正态云模型法^[12]、物元模型法^[13]、主成分分析法^[14]、突变级数法^[15]、生态足迹法^[16]等研究方法。从研究尺度来看,以省域^[17]、市域^[18]、县域^[19]等行政区范围为尺度,以城市群^[20]、河流流域^[21]等大区域为尺度,以农牧交错区^[22]、矿粮复合区^[23]等生态脆弱区为尺度。已有的研究虽从不同角度丰富和完善了土地生态安全研究体系,但现有的土地生态安全评价体系多以单一模型构建为主,其只能反映土地生态各子系统间的相互关系,不能较好地实现各子系统内部的要素状况反映;同时,土地生态安全研究主要以行政区为单元的时间序列总体研究,难以反映区域土地生态安全在空间上的关联性、聚集规律等空间分异特征。因而,有必要运用复合模型完善土地生态安全评价体系,并探讨区域土地生态安全空间分异规律,以便更好实现区域土地生态系统保护与社会经济可持续发展。

本研究以长江经济带的重要节点重庆市为研究对象,基于 DPSIR—EES 概念模型构建区域土地生态安全评价体系,运用 TOPSIS 法揭示重庆市 2009—2016 年土地生态安全变化情况,并通过 ESDA—GIS 法对重庆市 2009 年、2016 年两个时期的土地生态安全时空分异状况进行研究,以期为重庆市不同区域土地生态安全保护决策提供科学依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

重庆市地处中国西南、长江上游地区,位于 105°11′—

110°11′E, 28°10′—32°13′N, 属亚热带季风湿润性气候,气候温和,降水丰富,属于“一带一路”和长江经济带的重要联结点。截至 2016 年,全市下辖 26 个区, 8 个县, 4 个民族自治县,其区域可划分为主城区、渝西片区、渝东北片区和渝东南片区(图 1),区域实现生产总值 17 559.25 亿元,同比增长 10.7%,第一、二、三产业增加值比为 7.4 : 44.2 : 48.4,常住人口 3 048.43 万人,城镇化率 62.6%,居民人均可支配收入 22 034 元。重庆市土地总面积 $8.24 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中耕地面积 $2.38 \times 10^6 \text{ hm}^2$,建设用地面积 $6.40 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。随着长江经济带和成渝城市群发展战略的深入推进,重庆市作为长江上游的生态敏感地区,其生态安全对长江经济带和成渝城市群社会经济发展具有很强的指向性作用。

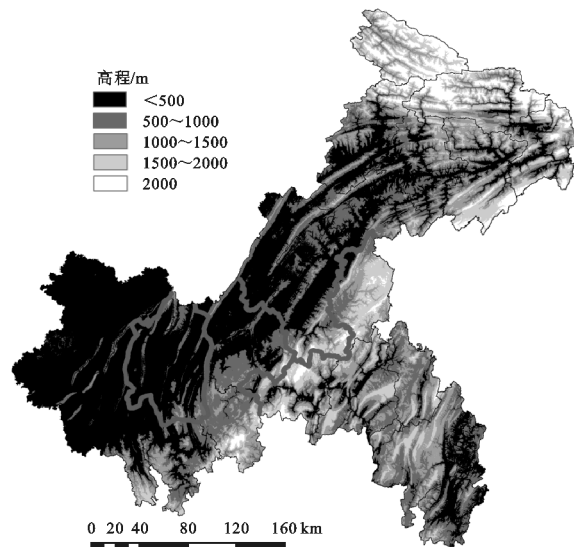


图 1 重庆市四大区域及县域分布

1.2 数据来源

研究以重庆市 38 个县域作为基础研究单元进行数据采集,数据处理时以变更后的行政区作为统计。本文涉及评价指标的社会经济与人口数据主要来源于《重庆市统计年鉴(2009—2016)》、重庆市国民经济和社会发展统计公报(2009—2016)、重庆市政府工作报告(2009—2016);环境数据主要来源于《中国林业统计年鉴(2009—2016)》、重庆市环境状况公报(2009—2016)和重庆市水资源公报(2009—2016),环境数据参照《生态环境状况评价技术规范》(HJ192—2015)相关计算;DEM 数据和遥感数据来源于中国科学院数据云(<http://www.csdb.cn/>),栅格大小为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$;土地利用现状数据来源于重庆市土地利用现状数据库,土地分类标准参照最新《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)。

2 研究方法

2.1 基于 DPSIR—EES 模型的土地生态安全评价指标体系构建

2.1.1 DPSIR—EES 概念模型 DPSIR 概念模型是对 PSR 模型改进后的新模型,其将整体系统分成驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个系统元素部分,又将系统元素分解成若干指标,其能够较好反映各土地生态系统之间的因果联系,但是无法实现土地生态安全各系统内部的分析^[24]。EES 概念模型是具有多种属性的协同模型,由于区域土地生态系统具有环境、经济和社会复合系统属性,EES 模型能够适用复合的土地生态安全评价,但其无法反映各土地生态系统之间的因果关系。本研究结合区域的生态环境特点及实际情况,利用 DPSIR 模型和 EES 模型优点实现有机结合,最终形成以 DPSIR—EES 概念模型来构建区域土地生态安全评价指标体系。

2.1.2 评价指标体系的确立 评价指标对土地生态安全评价结果有着重要影响。研究在进行指标选取时坚持科学性、可操作性、代表性、完整性等原则,结合区域的社会经济发展、生态环境和土地利用情况,借鉴国内已有的研究基础^[13,19,21],在 DPSIR—EES 概念模型上构建目标层、准则层、要素层、指标层 4 个层次的评价体系(表 1),即将土地生态安全作为目标分解成土地生态驱动力、土地生态压力、土地生态状态、土地生态影响和土地生态响应 5 个系统层面,在各土地生态子系统层中形成以环境、经济、社会 3 个要素构建要素层,并依据相应要素选取与土地生态安全相关指标形成指标层。其中,环境要素主要是反映土地生态系统安全变化的环境条件,其指标的选取主要参考生态环境状况评价和自然条件状况;经济要素主要是反映土地生态安全变化的经济条件,其指标的选取主要依据区域经济总体状况、经济结构和人民生活水平;社会要素主要是反映土地生态系统安全变化的社会条件,其指标的选取主要结合相关文献^[15,17]和区域客观情况。研究选取的土地生态安全评价指标能较好地反映区域自然环境、社会经济发展和土地利用状态等情况,特别是围绕以环境、经济和社会要素所选取的评价指标在综合作用下,能够反映土地生态安全各子系统的要素关系,从而有效反映区域的土地生态安全状况。

2.1.3 数据的标准化处理 由于评价指标量纲不同,因此采用极差标准化法消除不同指标间量纲的影响。假设指标体系包含 i 个评价对象或评价时点, j 为指标,原始指标的数据矩阵为 $X = \{X_{ij}\}$,数据矩

阵标准化后为 $Y = \{Y_{ij}\}$,则:

$$\text{正向指标标准化: } Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$\text{负向指标标准化: } Y_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: Y_{ij} 为数据矩阵标准化值; X_{ij} 为原始数据矩阵值; X_{\max} , X_{\min} 分别为原始矩阵数据最大和最小值。

2.1.4 权重的确定 熵值法与变异系数法是极具代表性的两种客观赋权法。熵值法能够客观而准确地求出各指标的权重值,但是其对于异常数据过于敏感,导致客观权重过大^[25]。变异系数法是一种多指标综合评价法,能够弥补指标权重分配均衡化的缺陷,并且能够客观确定每个指标的权重^[26]。研究将熵值法和变异系数法结合对指标进行组合权重赋值,以提高权重赋值的准确性,减少因单一权重赋值带来的误差。熵值法和变异系数法的权重方法较为常见,研究不在此单列其计算公式。

2.2 改进的 TOPSIS 模型

2.2.1 建立加权规范化矩阵与标准处理

$$V_{ij} = |V_{ij}|_{m \times n} = W_j \times Y_{ij} \quad (3)$$

$$T_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m V_{ij}}} \quad (4)$$

式中: V_{ij} 为加权规范化矩阵; W_j 为权重值; Y_{ij} 为数据矩阵标准化值; T_{ij} 为加权规范化矩阵标准化处理值。

2.2.2 确立正理想解和负理想解

$$\text{正理想解: } T_{ij}^+ = \{\max_{ij} | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

$$\text{负理想解: } T_{ij}^- = \{\min_{ij} | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (6)$$

式中: T_{ij}^+ 为正理想解集合; T_{ij}^- 为负理想解集合; \max_{ij} , \min_{ij} 分别为加权规范化矩阵中的最大值和最小值。

2.2.3 测算指标理想解的欧式距离

$$D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ij}^+)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ij}^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

式中: D^+ 为评价对象与正理想解的距离; D^- 为评价对象与负理想解的距离。

2.2.4 测算评价指标与理想解的接近度

$$LES = S_j = \frac{D^-}{D^+ + D^-} \quad (9)$$

式中: S_j 为指标与理想解的接近度,其接近度的值越大所代表的土地生态安全水平越高,LES 所代表土地生态安全值越大。

2.3 探索性空间数据分析法(ESDA)

探索性空间数据分析法是一种反映研究对象空

间分布状况,揭示空间集聚或离散现象的研究方法。属性与相邻单元上同一属性的相互关联程度^[27]。本其中,全局自相关反映研究数据在大区域中的整体关研究运用 ESDA 法分析重庆市土地生态安全状况的联程度,局部自相关则是进一步分析局部区域的某一空间相关性。

表 1 重庆市土地生态安全指标体系

目标层	准则层	要素层	指标层	指标计算方式	指标取向	权重
重庆市土地生态安全 (AC)	驱动力 (D)	环境驱动力 (D ₁)	C ₁ 生态用地比例(%)	生态用地面积/区域土地总面积	+	0.0216
			C ₂ 林草覆盖率(%)	区域林地与草地面积之和/区域土地总面积	+	0.0581
		经济驱动力 (D ₂)	C ₃ 人均 GDP(万元)	区域生产总值/区域总人口	+	0.0273
			C ₄ 人均可支配收入(万元)	居民总可支配收入/居民人数	+	0.0295
		社会驱动力 (D ₃)	C ₅ 人口密度(人/hm ²)	区域总人口/区域土地总面积	-	0.0274
			C ₆ 人口自然增长率(‰)	[(年内出生人数-年内死亡人数)/年平均人数]×1000‰	-	0.0233
	压力 (P)	环境压力 (P ₁)	C ₇ 单位耕地面积化肥施用量(kg/hm ²)	化肥施用量/区域耕地面积	-	0.0362
			C ₈ 单位耕地面积农药使用量(kg/hm ²)	农药使用量/区域耕地面积	-	0.0225
		经济压力 (P ₂)	C ₉ GDP 增长率(%)	(GDP 增长量/GDP 基期水平)×100%	+	0.0527
			C ₁₀ 单位耕地粮食产量(kg/hm ²)	粮食产量/区域耕地面积	+	0.0353
		社会压力 (P ₃)	C ₁₁ 城镇化率(%)	城镇人口/区域总人口	-	0.0288
			C ₁₂ 居民恩格尔系数(%)	(食物消费支出金额/总支出金额)×100%	-	0.0320
	状态 (S)	环境状态 (S ₁)	C ₁₃ 土地利用类型多样性指数	$H = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$ 式中:H 为土地利用类型多样性指数;p _i 为土地利用类型 i 所占比例,n 为土地利用类型数目	+	0.0263
			C ₁₄ 人均水资源量(万 m ³ /人)	水资源量/区域总人口	+	0.0441
		经济状态 (S ₂)	C ₁₅ 经济密度(万元/hm ²)	区域生产总值/区域土地总面积	+	0.0278
			C ₁₆ 地均固定资产投资(万元/hm ²)	区域固定资产投资/区域土地总面积	+	0.0317
		社会状态 (S ₃)	C ₁₇ 人均建设用地面积(hm ² /人)	区域建设用地面积/区域总人口	-	0.0267
			C ₁₈ 人均耕地面积(hm ² /人)	区域耕地面积/区域总人口	+	0.0200
	影响 (I)	环境影响 (I ₁)	C ₁₉ 产水模数(万 m ³ /km ²)	区域水资源总量/区域土地总面积	+	0.0636
			C ₂₀ 水源涵养指数	水源涵养指数=A _{con} ×(0.45×水域湿地面积+0.35×林地面积+0.20×草地面积)/区域面积 式中:A _{con} 为水源涵养指数的归一化系数	+	0.0592
		经济影响 (I ₂)	C ₂₁ 地均财政收入(万元/hm ²)	区域财政收入/区域土地总面积	+	0.0232
			C ₂₂ 地均二、三产业产值(万元/hm ²)	区域二、三产业产值/区域土地总面积	+	0.0279
		社会影响 (I ₃)	C ₂₃ 人口与经济增长弹性系数(%)	区域总人口增长幅度/区域经济增长幅度	-	0.0256
			C ₂₄ 单位 GDP 建设用地面积(hm ² /万元)	区域建设用地面积/区域生产总值	-	0.0211
	响应 (R)	环境响应 (R ₁)	C ₂₅ 造林面积占土地总面积比重(%)	区域造林面积/区域土地总面积	+	0.0187
			C ₂₆ 生物丰度指数	生物丰度指数=A _{bio} ×(0.35×林地面积+0.21×草地面积+0.28×水域湿地面积+0.11×耕地面积+0.04×建设用地面积+0.01×未利用地面积)/区域土地总面积 式中:A _{bio} 生物丰度指数的归一化系数	+	0.0838
		经济响应 (R ₂)	C ₂₇ 第三产业比重(%)	区域第三产业产值/区域生产总值	+	0.0253
			C ₂₈ 单位面积林业产值(万元/hm ²)	区域林业产值/区域土地总面积	+	0.0307
		社会响应 (R ₃)	C ₂₉ 农电集约度[(kW·h)/hm ²]	区域农村用电量/区域土地总面积	+	0.0232
			C ₃₀ 区域开发比例(%)	(区域建设用地面积/区域土地总面积)×100%	-	0.0266

注:“+”指标取向为正;“-”指标取向为负。

2.3.1 全局空间自相关 全局空间自相关是以 Moran's I 进行测度,其取值在[-1,1],I>0 表示空间正相关,I<0 表示空间负相关,I 趋近于 0 时表示空间呈随机分布,Moran's I 绝对数值越大,反映区域土地生态安全值的空间集聚性越强,并运用 Z 检验对其进行显著性检验。其计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X}) (X_j - \bar{X})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$$

(10)

式中:n 为研究区域的样本数;X_i,X_j 为区域对象 i 与 j 的取值; \bar{X} 为区域对象的平均值;W_{ij} 为研究区

域之间的邻接空间权重矩阵, 即当 $W_{ij} = 1$ 时相邻, $W_{ij} = 0$ 时不相邻。

2.3.2 局部空间自相关 LISA 实质是将全局 Moran's I 指数分解到各局域空间单元, 并揭示局域空间单元间的相关性, 可以用“冷热区域”反映局部空间相关性。局部 Moran's I 模型如下:

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})} \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (11)$$

式中: X_i, X_j 为区域空间单元 i 与 j 取值; W_{ij} 为研究区域之间的邻接空间权重矩阵; 当 $I_i > 0$ 时研究单元

相似值形成空间集聚, $I_i < 0$ 时研究单元非相似值形成空间集聚。

2.4 土地生态安全评判标准

依据 TOPSIS 模型测算的接近度为 $0 \sim 1$, 其数值越大其土地生态安全越高, 研究通过其值初步确定土地生态安全程度及区域生态特征, 再运用 ArcGIS 中的 Natural breaks 工具对其接近度进行分类, 并根据区域生态状况并借鉴已有研究成果^[4-5, 19], 采用非等间距法对自然分类结果进行调整, 最终形成重庆市土地生态安全评判等级标准(表 2)。

表 2 重庆市土地生态安全评判等级标准

生态状况	生态安全等级	生态安全区间	生态安全特征
危险级	V	[0, 0.3)	区域土地生态环境受到极其严重破坏, 土地生态环境非常危险, 土地生态系统极不稳定, 生态自我修复难度大
敏感级	IV	[0.3, 0.45)	区域土地生态环境受到较大程度破坏, 土地生态环境比较危险, 土地生态系统不稳定, 生态自我修复较困难
临界级	III	[0.45, 0.6)	区域土地生态环境受到中等程度破坏, 土地生态环境较差, 土地生态系统比较稳定, 受外界干扰后, 生态自我修复较弱
良好级	II	[0.6, 0.8)	区域土地生态环境受到小范围破坏, 土地生态环境较好, 土地生态系统稳定, 受外界干扰后, 一般能实现生态自我修复
安全级	I	[0.8, 1]	区域土地生态环境未受破坏, 土地生态环境好, 土地生态系统非常稳定, 能实现生态自我修复

3 结果与分析

3.1 土地生态安全综合分析

3.1.1 重庆市土地生态安全状况分析 通过测算得到重庆市 2009—2016 年生态安全状况结果(表 3)。重庆市土地生态安全总体呈现波动上升的趋势, 土地生态安全指数由 2009 年的 0.33 上升至 2016 年的 0.65, 根据表 2 的土地生态安全等级划分标准, 研究期内重庆市的土地生态安全状况由“敏感级”向“良好级”转变。具体来看, 2009—2011 年重庆市土地生态安全水平持续上升, 这主要受区域土地生态系统影响和响应改善所致, 2009 年以来, 重庆市以国发 3 号文件为契机, 加快改革和产业结构调整, 将经济发展与产业结构调整相结合, 加强农业基础设施建设, 积极进行造林工程建设, 这推

动了土地生态安全状况的改善, 但由于人口增长与经济发展所导致的环境消耗, 使其生态安全状况仍然处于“敏感级”。2011—2012 年重庆市土地生态安全水平有所下降, 主要是由于受国内经济增长放缓和产能相对过剩的影响, 另外区域造林面积的减少也加剧了土地生态压力, 使得土地生态安全状况有所退化。2012—2016 年重庆市土地生态安全呈现波动上升, 这一变化主要是由于土地生态各子系统的逐步改善, 重庆市通过推进土地和林权制度改革, 加快特色效益农业发展, 增强农村经济活力, 提高了农村居民收入水平, 其促进了土地压力和状态的改善。同时, 重庆市以“科学发展、富民兴渝”为总任务, 加快生态文明建设的步伐, 守住“5 个决不能”的底线, 不断加强生态建设和环境保护, 使得土地生态安全水平不断提高。

表 3 重庆市 2009—2016 年土地生态安全状况

年份	驱动力(D)	压力(P)	状态(S)	影响(I)	响应(R)	土地生态安全(LES)	生态安全等级
2009	0.42	0.42	0.43	0.18	0.23	0.33	IV
2010	0.31	0.57	0.35	0.23	0.26	0.34	IV
2011	0.31	0.54	0.39	0.33	0.27	0.37	IV
2012	0.36	0.35	0.36	0.23	0.25	0.30	IV
2013	0.35	0.42	0.38	0.24	0.28	0.32	IV
2014	0.33	0.36	0.65	0.59	0.27	0.45	III
2015	0.50	0.36	0.46	0.32	0.47	0.41	IV
2016	0.69	0.44	0.58	0.76	0.77	0.65	II

3.1.2 土地生态安全各层面要素分析

(1) 土地生态系统驱动力变化分析。重庆市土地生态系统驱动力大体呈现先下降后上升的态势。2009—2014年土地生态驱动力指数由0.42下降至0.33,而后2014—2016年呈现逐年增长。其中,2009—2014年的变化主要是受社会要素的影响,表现在人口自然增长率和人口密度的上升,造成土地生态系统驱动力的下降。2014—2016年土地生态系统驱动力指数的增长主要反映在环境要素的改善。从环境驱动力要素的影响来看,林草覆盖率由2014年的49.86%上升到2016年的50.75%,这得益于重庆市环保“五大行动”的实施,以及天然林保护、生物多样性等生态保护与建设工程的推进,丰富了土地生态系统。从经济驱动力要素的影响来看,人均GDP、居民可支配收入分别实现了21.01%,20.06%的增长,面对国内经济进入“新常态”,重庆市推进产业结构优化升级,着力稳定增长,推动社会民生的改善和人民经济水平的提高,这都为土地生态安全提供了有力支持,推动着土地生态系统驱动力的提升。总的来看,环境要素的影响为土地生态安全的驱动力上升提供了支持,推动重庆市土地生态安全朝良好方向发展。

(2) 土地生态系统压力变化分析。重庆市的土地生态系统压力呈现先上升后下降再上升的变化,其土地生态压力指数从2009年的0.42上升到2010年的0.57,再下降至2014年的0.36,而后由2014年的0.36上升到2016年的0.44。2009—2014年土地生态压力波动变化主要受环境要素的影响,其主要表现在单位耕地面积化肥施用量、GDP增长率等指标的变化。2014—2016年的土地生态系统压力指数呈现上升变化,这一变化得益于环境、经济和社会压力的改善,其主要反映在单位耕地面积农药使用量由2014年的7.50 kg/hm²下降到2016年的7.39 kg/hm²,单位耕地粮食产量由4 662.75 kg/hm²上升到4 894.02 kg/hm²,农村居民恩格尔系数由40.50%下降到38.70%,重庆市在这一时期扎实推进美丽乡村建设,加快乡村环境的连片整治,重点对农村面源污染进行了治理,使得乡村环境质量得到较大的改善。此外,还加大城乡统筹发展力度,努力推动农村基础设施和公共服务的均衡化配置,积极落实扶贫开发工作,促进农民增收。由此看来,土地生态环境、经济、社会因素的向好发展推动了土地生态压力的改善。

(3) 土地生态系统状态变化分析。重庆市的土地生态系统状态呈现波动上升的变化,土地生态系统状态指数从2009年的0.43上升到2016年的0.58,土地生态安全状况稳定在“临界级”。其中,2010年

土地生态系统状态指数比2009年下降了0.08,主要是受土地利用多样性指数和人均耕地面积降低的影响。而2010—2014年土地生态系统状态指数由0.35上升到0.65,虽然在2012年出现了小幅度下降,但土地生态状况总体特征依然向好,这一时期的变化是由于环境状态和经济状态稳步增长的结果,自2010年以来,重庆市加快推进饮用水源保护和重点区域河流整治工程,进一步加强水环境保护,使得区域水资源环境改善,人均水资源量保持稳定增长。通过实施“6+1”支柱产业发展规划和重点领域的改革,全市经济密度和地均固定资产投资分别由9.62万元/hm²,8.42万元/hm²上升到17.31万元/hm²,16.05万元/hm²。2014—2016年土地生态系统状态出现了先降低再上升的情况,状态等级处于“临界级”范围内,主要是受冬末春初中西部地区出现气象干旱和区域年降水量减少的影响,导致当年区域水资源总量减少,降低了土地生态系统状态,但随着自然因素干扰的减弱和经济的进一步发展,其土地生态系统状态在2016年又得以恢复。

(4) 土地生态系统影响变化分析。重庆市土地生态系统影响整体处于上升态势,土地生态系统影响指数由2009年的0.18上升至2016年0.76,其土地生态系统影响由“危险级”向“良好级”转变。这一阶段的土地生态系统影响明显改善,土地生态系统状态的上升推动了土地生态系统影响的好转,其环境、经济、社会要素也趋于好转。其中,环境影响要素显著增强,2009年产水模数由55.33万m³/km²上升至2016年73.43万m³/km²,水源涵养指数由96.81上升至98.09,这主要是由于重庆市在此期间大力推进水源涵养保护与生态修复、水土流失治理等生态工程建设,促进了区域生态环境进一步改善。同时,社会和经济影响都有大幅增加,这得益于重庆市主动调整经济发展思路,积极应对国内经济发展压力,大力发展循环经济,推动高新技术产业的发展,使得经济保持较快增长,重庆市地均财政收入和地均二、三产业值实现了翻一番。此外,重庆市在人口增长、社会经济发展和土地节约集约等方面采取了积极有效的措施,表现在重庆市人口与经济呈现协调增长,其建设用地面积总量增长控制在合理范围内。

(5) 土地生态系统响应变化分析。土地生态系统响应作为土地生态安全重要环节,表现出人类对土地生态意识的一种调整。研究期间,重庆市土地生态系统响应等级呈现稳步上升,其土地生态系统响应指数从2009年的0.23上升到2016年的0.77,这是由于环境、经济、社会响应增长迅速的结果。2009年以

来,重庆市加快优化生态安全格局和划定区域生态保护红线,推动区域造林和生物多样性保护等生态工程的实施,使得区域造林面积比重一直稳定在 2% 左右,生物丰富度指数上涨了 1.08,区域土地生态安全状况有明显好转。与此同时,重庆市综合经济实力有较大提升,经济结构的优化调整取得新进展,第三产业比重从 2009 年的 46% 上升至 2016 年的 48%,这为土地生态环境改善提供了有利的经济条件;并且重庆市通过推动农村集体产权和地票制度改革,加快新型农业经营体系构建,推进乡村合理开发,改善农村生产条件,区域农电集约度由 2009 年 746.39 (kW·h)/hm² 上升至 2016 年的 955.32 (kW·h)/hm²,以上表明重庆市在研究期间土地生态响应强烈,土地生态保护已作为全市生态文明建设重要任务,区域的生态环境建设逐渐增强。

3.2 区域土地生态安全时空分异分析

3.2.1 土地生态安全时间序列分析 重庆市各县域土地生态安全总体状况见表 4。2009—2016 年,重庆市各区域土地生态安全状况总体向好,但局部变化状况不一;从区域划分的情况来看,主城区土地生态安全有所退化,渝西片区、渝东北片区、渝东南片得以改善。其中,2009—2016 年主城区土地生态安全状况表现为大渡口区、江北区、巴南区有所好转,其余各区均有所退化,这主要是受环境与社会因素影响,具体表现在主城区范围内生态用地比例、林草地覆盖率下降,城镇化率、区域开发比例及人口数量增长加大了区域土地生态系统压力,另外,主城区的生态环境自我修复和调整能力与社会经济发展不相适应。渝西片区土地生态安全状况表现为长寿区有所退化,涪陵区稳定不变,其余区县都有所改善,形成以上状况的原因是区域林草覆盖率上升,单位耕地面积化肥及农药使用量降低,水源涵养指数增加,而长寿区土地生态安全状况有所退化,反映在各项指标上为水源涵养和生物丰富度指数的双下降,这主要是由于长寿区作为重庆市和国家重要的化工基地,其产业结构亟待进一步调整,此外,生态环境保护与发展经济建设的矛盾日益突出,使得区域土地生态安全压力逐渐增大。渝东北片区土地生态安全状况表现为多数区县明显好转,而万州区土地生态状况有所退化,主要原因是万州区作为重庆市第二大城市,区域开发建设体量庞大,加剧了土地生态结构的不稳定性,人均水资源量的减少以及水源涵养指数的下降,也对其土地生态安全产生了干扰。渝东南片区各区县土地生态安全均得以改善,这表明研究期内渝东南片区实施的水土保持和造林工程对生态环境起到了积极的保护作用,区

域人类活动对土地系统的干扰性降低,区域生态环境得到进一步优化,具体表现为生态用地比例和林草地覆盖率增长较快。

表 4 重庆市各县域土地生态安全状况

区域	县域名称	土地生态安全(LES)		
		2009 年	2016 年	变化信号
主城区	渝中区	0.43	0.39	↘
	大渡口区	0.30	0.33	↗
	江北区	0.38	0.39	↗
	沙坪坝区	0.36	0.34	↘
	九龙坡区	0.34	0.31	↘
	南岸区	0.37	0.33	↘
	北碚区	0.40	0.38	↘
	渝北区	0.42	0.35	↘
	巴南区	0.43	0.44	↗
	取平均值	0.38	0.36	↘
渝西片区	涪陵区	0.45	0.45	—
	长寿区	0.36	0.35	↘
	江津区	0.39	0.42	↗
	合川区	0.33	0.38	↗
	永川区	0.32	0.37	↗
	南川区	0.47	0.55	↗
	綦江区	0.40	0.47	↗
	潼南区	0.28	0.37	↗
	铜梁区	0.32	0.36	↗
	大足区	0.31	0.37	↗
渝东北片区	荣昌区	0.31	0.38	↗
	璧山区	0.32	0.39	↗
	取平均值	0.36	0.40	↗
	万州区	0.48	0.45	↘
	梁平区	0.37	0.42	↗
	城口县	0.56	0.58	↗
	丰都县	0.43	0.52	↗
	垫江县	0.31	0.35	↗
	忠县	0.36	0.38	↗
	开州区	0.46	0.49	↗
渝东南片区	云阳县	0.47	0.53	↗
	奉节县	0.50	0.56	↗
	巫山县	0.51	0.59	↗
	巫溪县	0.59	0.63	↗
	取平均值	0.46	0.50	↗
	黔江区	0.49	0.53	↗
	武隆区	0.49	0.56	↗
	石柱县	0.49	0.57	↗
	秀山县	0.51	0.53	↗
	酉阳县	0.53	0.60	↗
	彭水县	0.47	0.55	↗
	取平均值	0.50	0.56	↗

注:↗表示好转,↘表示退化,—表示不变化。

3.2.2 土地生态安全空间分析 为进一步反映区域土地生态安全状况,根据土地生态安全等级划分标准

并结合 ArcGIS 软件绘制重庆市各县域土地生态安全等级分布图(图 2)。

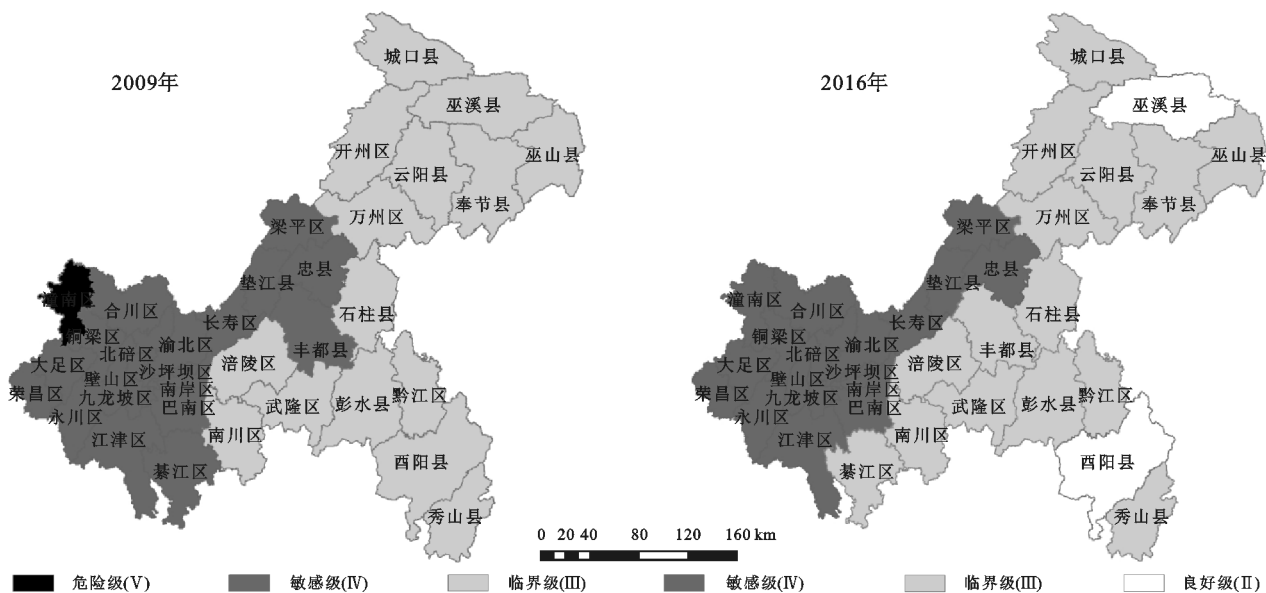


图2 重庆市各县域土地生态安全等级分布

2009年重庆市土地生态安全等级普遍不高。其中,土地生态安全“敏感级”主要集中在主城区和渝西片区,“敏感级”面积约占研究区面积的40%,生态状况等级较高的地区集中在渝东北和渝东南片区,形成渝东北—渝东南生态安全等级“临界级”分布区,“临界级”面积超过研究区面积的一半,这是由于主城区和渝西片区作为重庆市经济增长的主战场,其受环境、社会和经济要素的影响,区域土地生态安全系统的不稳定性加剧,而渝东北和渝东南片区由于经济发展水平与开发程度较低,人类活动干扰不强,区域自身生态系统状况良好;潼南区是研究区土地生态安全等级唯一处于“危险级”的区县,其主要原因是潼南区的林草地覆盖率和生物丰富度较低,区域水源涵养能力较差,导致其生态安全系统较为脆弱,对生态压力的抗干扰能力弱。2016年重庆市土地生态安全等级格局发生明显变化,“临界级”和“良好级”状态成为重庆市主要生态状况背景,并占研究区面积的近60%,土地生态安全“临界级”向渝西片区推进扩散,酉阳县和巫溪县生态环境持续改善,由“临界级”演化为“良好级”,而“危险级”彻底退出研究区,转化为“临界级”,这是因为重庆市持续推进生态屏障建设和水土流失综合治理,响应国家新一轮退耕还林还草工程,加快区域湖库和流域整治,使得区域生态涵养和保护能力不断增强。研究期间,重庆市土地生态安全等级主要由“危险级”和“敏感级”向“临界级”和“良好级”转变,土地生态安全等级格局总体较为稳定,“敏感级”和“危险级”主要集中于主城区和渝西片区,而“临界级”和“良好级”主要分布在渝东北及渝东南片区。

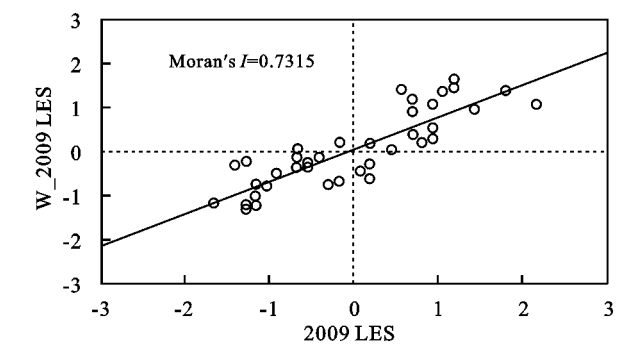
总的来说,重庆市土地生态安全状况得到有效改善,但各区域土地生态安全依然存在一定风险,在接下来的工作中,应当继续推进区域生态文明建设,落实“不搞大开发,共抓大保护”的区域生态保护理念,致力于区域生态环境的修复和改善。

3.3 土地生态安全的空间相关性分析

3.3.1 土地生态安全全局空间自相关分析 运用 GEODA 软件对重庆市区域土地生态安全作空间自相关和区域差异性分析,并选择 2009 年、2016 年作为研究断面,获得重庆市区域土地生态安全 Moran's I 散点图(图 3)。

经过测算,2009年重庆市土地生态安全的 Moran's I 值为 0.731 5,对其进行统计检验 Z 值为 6.79,通过显著性检验。2016 年土地生态安全的 Moran's I 值为 0.766 7,其 Z 值大于 0.01 置信水平的临界值 2.58,且 Moran's I 值整体呈上升趋势,表明重庆市土地生态安全在空间上具有较强的正相关,其空间相关特征明显。通常 Moran 散点图划分成的 4 个象限可以有效反映区域与其他区域相互之间的属性关系。其中,第一象限的“高一高”(HH)聚集表示区域自身和周边区域的土地生态安全水平都较高;第二象限的“低—高”(LH)聚集表示区域自身土地生态安全较低而周边区域的土地生态安全水平高;第三象限的“低—低”(LL)聚集表示区域自身和周边区域的土地生态安全都较低;第四象限的“高一低”聚集(HL)表示区域自身土地生态安全高而周边区域的土地生态安全低。由图 3 可知,2009 年区域土地生态安全主要集中在“高一高”(HH)和“低—低”(LL)两区,少量分布于

“高一低”(HL)、“低—高”(LH)两区,表明重庆市区域土地生态安全空间集聚特征显著;2016 年区域土地生态安全主要分布在“高一高”(HH)、“低—低”(LL)和“低—高”(LH)三区,表明重庆市土地生态安全空间差异在逐渐缩小,土地生态安全逐渐倾向于相似地区集群分布,这也反映出重庆市土地生态安全在空间上集聚现象逐渐增强。



3.3.2 土地生态安全局部空间自相关性分析 为了更加直观反映重庆市区域或相邻区域之间局部空间集聚和变异情况,对重庆市土地生态安全进行局部空间自相关分析,根据公式(11)和 GeoDa 软件生成区域土地生态安全 LISA 值,并结合 ArcGIS 软件绘制 2009 年和 2016 年重庆市区域土地生态安全局部空间自相关 LISA 集聚图(图 4)。

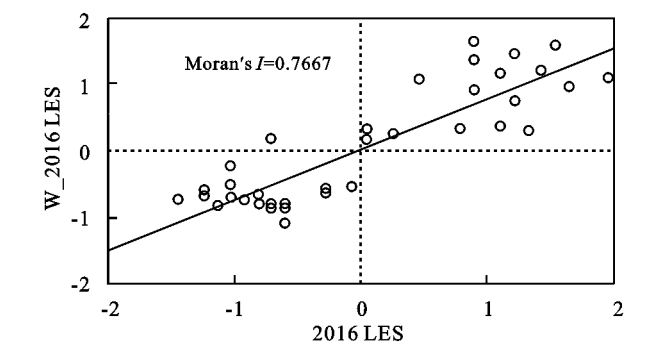


图 3 重庆市土地生态安全 Moran 散点图

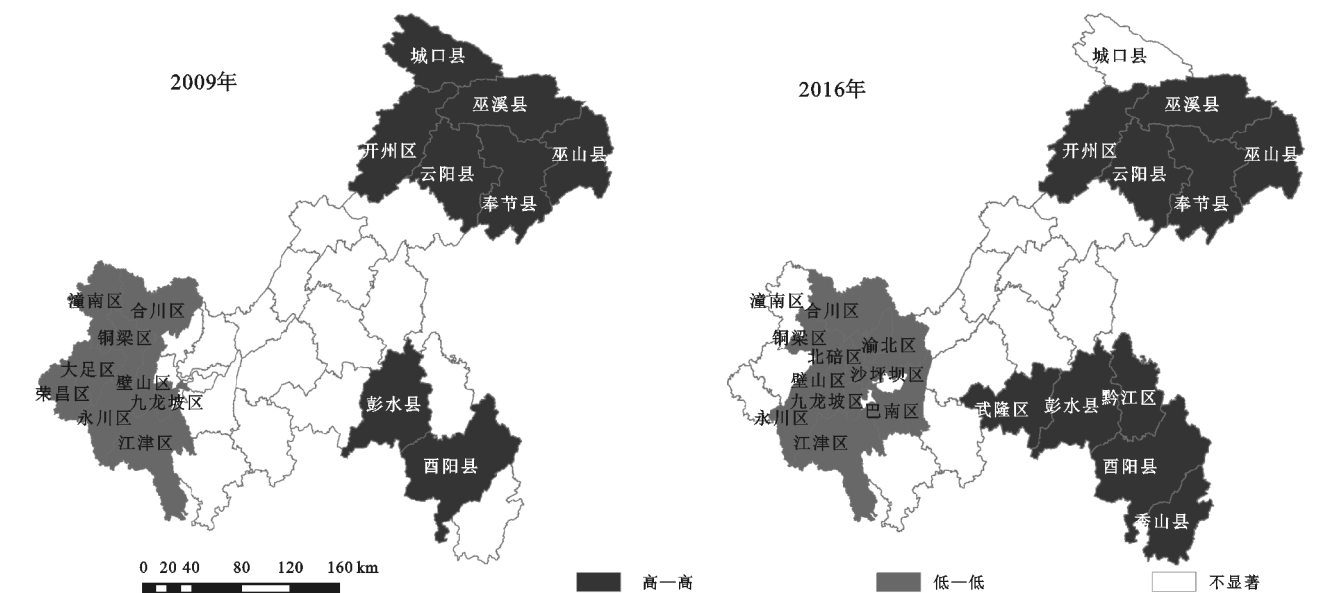


图 4 重庆市土地生态安全局部空间自相关 LISA 集聚图

由图 4 可知,2009 年和 2016 年重庆市土地生态安全呈现出较强的空间聚集现象,区域土地生态安全呈现“高一高”、“低—低”值集聚的特点。2009 年和 2016 年重庆市土地生态安全主要分布在“高一高”和“低—低”值区,而空间局部自相关不显著的区域则主要集中在主城区的大渡口区、南岸区;渝西的綦江区、南川区、涪陵区、长寿区;渝东北的梁平区、丰都县、垫江县、忠县;渝东南的石柱县。2009 年重庆市的土地生态安全“高一高”值区分布在渝东南的酉阳县、彭水县,渝东北的城口县、开州区、云阳县、奉节县、巫溪县、巫山县;同时“低—低”值区主要分布在主城区的九龙坡区,渝西的潼南区、合川区、铜梁区、大足区、荣昌区、永川区、江津区。2016 年重庆市土地生态安全状况发生了明显变化,“高一高”值区向周围扩散,渝东南的武隆区、黔江区、秀山县由不显

著变为“高一高”值区,但渝东北的城口县由“高一高”值区变为不显著;“低—低”值区也随之有所变化,其总体分布于主城区的渝北区、沙坪坝区、巴南区、九龙坡区、北碚区,渝西的合川区、铜梁区、璧山区、江津区。2009—2016 年重庆市土地生态安全“高一高”和“低—低”值区都有所增加,其中“高一高”值区主要集中在渝东南和渝东北等开发程度较低,自然生态状况相对较好的地区,“低—低”值区主要分布在主城区和渝西等区域开发程度较高,生态压力较大的地区,由此来看,“高一高”和“低—低”值区的分布与自然生态状况、人类活动密切相关。总体来说,重庆市区域土地生态安全状况有明显改善,这也说明随着重庆市生态文明建设的推进,区域生态环境保护能力不断增强,“高一高”值区对周围区域的土地生态状况有着积极的影响。

4 讨论与结论

4.1 讨论

根据研究期间重庆市土地生态安全状况及时空分异情况来看,重庆市土地生态安全水平明显提升,但土地生态安全状况依然不容乐观,且区域土地生态安全的空间差异明显。因此,重庆市需要进一步加大土地生态保护力度,加快循环经济和高新技术产业的发展,持续实施水土流失保护与水源涵养、生物多样性保护等生态保护工程,推进长江上游生态屏障建设,同时,也应当积极响应国家生态文明建设战略及长江经济带生态环境保护规划,以促进土地生态安全水平的提高。

研究综合考虑了已有的土地生态安全评价指标体系,将 DSPIR 模型与 EES 模型的优点有机结合,并选取相关指标构建评价指标体系,弥补了土地生态各子系统不能较好反映内部要素作用状况的不足,同时以熵值法和变异系数法两种客观方法确定指标权重,与单一的客观权重赋值相比,其能够有效降低因数据的敏感性而形成的误差,提高研究数据的精度。此外,运用 TOPSIS 法较为客观地揭示了重庆市土地生态安全总体状况及土地生态各子系统的变化,并以环境、经济、社会要素分析了其变化差异;通过 ESDA—GIS 法对重庆市土地生态安全空间相关性进行分析,研究结果能为重庆市因地制宜实施特色化的土地生态安全保护提供参考。本研究围绕评价模型、区域特色与前人成果进行指标体系的构建,但如何使指标得到最大优化值得进一步探讨;此外,区域土地生态安全尚未形成多尺度的空间关联性、集聚规律性的对比研究,以及在此基础上如何完善区域土地生态安全预测模型,这些值得在以后的工作中展开进一步研究。

4.2 结论

(1) 2009—2016 年,重庆市土地生态安全总体呈现波动上升的趋势,土地生态安全由“敏感级”向“良好级”转变。但在不同时段表现出不同的变化态势,2009—2011 年土地生态安全水平持续上升;2011—2012 年土地生态安全水平有所下降;2012—2016 年土地生态安全水平呈现波动上升;从各层面要素来看,重庆市土地生态安全各子系统整体趋于好转。

(2) 2009—2016 年,重庆市各区域土地生态安全状况总体向好,局部变化状况不一,表现为主城区土地生态安全有所退化,渝西片区、渝东北片区、渝东南片区得以改善;总的来说,重庆市土地生态安全状况“敏感级”和“危险级”主要集中于主城区和渝西片区,而“临界级”和“良好级”主要分布在渝东北及渝东南片区。

(3) 重庆市区域土地生态安全存在较强的空间

正相关和聚集性,其“高一高”和“低—低”值区呈现增加的趋势,“高一高”值区主要分布在渝东北和渝东南等开发程度较低和自然生态状况较好的区域,“低—低”值区主要分布在主城区和渝西等开发程度较高和生态压力较大的区域。

参考文献:

- [1] 刘庆,陈利根,舒帮荣,等.长株潭城市群土地生态安全动态评价研究[J].长江流域资源与环境,2010,19(10):1192-1197.
- [2] 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.
- [3] 李智国,杨子生.中国土地生态安全研究进展[J].中国安全科学学报,2007,17(12):5-12.
- [4] 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.
- [5] 于海洋,张飞,曹雷,等.基于乡镇尺度的土地生态安全时空格局评价研究:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2017,37(19):6355-6369.
- [6] Jeffrey E Herrick. Soil quality: an indicator of sustainable land management[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1):75-83.
- [7] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109(19):7565-7570.
- [8] Bhagabati N K, Ricketts T, Sulistyawan T B S, et al. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans [J]. Biological Conservation, 2014,169(387):147-156.
- [9] 李洁,赵锐锋,梁丹,等.兰州市城市土地生态安全评价与时空动态研究[J].地域研究与开发,2018,37(2):151-157.
- [10] 焦红,汪洋.基于 PSR 模型的佳木斯市土地生态安全综合评价[J].中国农业资源与区划,2016,37(11):29-36.
- [11] 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.
- [12] 何刚,王雯雯,夏业领,等.基于正态云模型的区域生态安全评价[J].安全与环境学报,2018,18(2):807-813.
- [13] 陈伊多,杨庆媛,杨人豪,等.基于熵权物元模型的土地生态安全评价:重庆市江津区实证[J].干旱区地理,2018,41(1):185-194.
- [14] 王鹏,况福民,邓育武,等.基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价[J].经济地理,2015,35(1):168-172.
- [15] 苏正国,李冠,陈莎,等.基于突变级数法的土地生态安全评价及其影响因素研究:以广西壮族自治区为例[J].水土保持通报,2018,38(4):142-149,161.

(下转第 266 页)

- [17] 丁明军,张懿铨,刘林山,等.青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征[J].地理科学进展,2010,29(4):507-512.
- [18] 王毅,郭跃.喀斯特地貌区植被覆盖与地形因子的空间关系分析:以贵州普定县为例[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):157-167.
- [19] 蔡宏,何政伟,安艳玲,等.基于 RS 和 GIS 的赤水河流域植被覆盖度与各地形因子的相关强度研究[J].地球与环境,2014,42(4):518-524.
- [20] 张勃,王东,王桂钢,等.西南地区近 14 a 植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J].长江流域资源与环境,2015,24(6):956-964.
- [21] 蒙古军,王钧.20 世纪 80 年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应[J].地理研究,2007,26(5):857-865.
- [22] 李卓,孙然好,张继超,等.京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J].生态学报,2017,37(22):7418-7426.
- [23] 刘可,杜灵通,侯静,等.近 30 年中国陆地生态系统 NDMI 时空变化特征[J].生态学报,2018,38(6):1885-1896.
- [24] 何云玲,李同艳,熊巧利,等.2000—2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应[J].生态学报,2018,38(24):8813-8821.
- [25] 齐威,刘爱利,张雯.中国地形三大阶梯面向对象的定量划分[J].遥感信息,2017,32(2):43-48.
- [26] 袁沫汐,邹玲,林爱文,等.湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2016,36(17):5315-5323.
- [27] 杜加强,贾尔恒·阿哈提,赵晨曦,等.三江源区近 30 年植被生长动态变化特征分析[J].草业学报,2016,25(1):1-12.
- [28] 张诗羽,张毅,王昌全,等.岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J].水土保持通报,2018,38(1):69-75.
- [29] 张远东,张笑鹤,刘世荣.西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析[J].应用生态学报,2011,22(2):323-330.
- [30] 汤巧英,戚德辉,宋立旺,等.基于 GIS 和 RS 的延河流域植被覆盖度与地形因子的相关性研究[J].2017,24(4):198-203.
- [31] 朱林富,谢世友,杨华,等.基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J].自然资源学报,2017,32(12):2023-2033.
- [32] 张立峰,闫浩文,杨树文,等.黑河流域植被覆盖变化及其对地形的响应[J].遥感信息,2018,33(2):46-52.

~~~~~

(上接第 258 页)

- [16] 黄海,刘长城,陈春.基于生态足迹的土地生态安全评价研究[J].水土保持研究,2013,20(1):193-196,201.
- [17] 李昊,南灵,李世平.基于面板数据聚类分析的土地生态安全评价研究:以陕西省为例[J].地域研究与开发,2017,36(6):136-141.
- [18] 祝培甜,赵中秋,陈勇,等.基于三角模型的土地生态安全动态评价:以西安市为例[J].水土保持研究,2016,23(1):244-248.
- [19] 王雪,杨庆媛,何春燕,等.基于 P—S—R 模型的生态涵养发展型区域土地生态安全评价:以重庆市丰都县为例[J].水土保持研究,2014,21(3):169-175.
- [20] 胡志仁,龚建周,李天翔,等.珠江三角洲城市群生态安全评价及态势分析[J].生态环境学报,2018,27(2):304-312.
- [21] 柳思,张军,田丰,等.2005—2014 年疏勒河流域土地生态安全评价[J].生态科学,2018,37(3):114-122.
- [22] 张茹,戴文婷,刘兆顺,等.我国北方农牧交错区土地生态安全评价:以白城市为例[J].水土保持研究,2017,24(2):259-266.
- [23] 丁新原,周智彬,马守臣,等.矿粮复合区土地生态安全评价:以焦作市为例[J].干旱区地理,2013,36(6):1067-1075.
- [24] 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.
- [25] 曹瑀,王燕辉,张立强,等.基于 PSR 模型的耕地生态安全时空分异特征研究:以河北省沧州市为例[J].水土保持研究,2016,23(6):290-295,302.
- [26] 李晓庆,姜博,初楠臣.城市群土地集约利用与新型城镇化耦合协调分析:以我国三大城市群为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(7):983-991.
- [27] 董捷,陈星,张安录.基于“三生”功能的长江中游城市群土地集约利用空间差异研究[J].华中农业大学学报:社会科学版,2017(6):110-117,152.