基于 DPSIR-灰色关联模型的重庆市土地生态安全评价

孙德亮[1], 张凤太[2]

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 2. 贵州师范学院 资源环境与灾害研究所 贵州 贵阳 550018)

摘　要: [目的] 对重庆市土地生态安全定量化评价做出初步探索,为重庆土地生态安全研究和生态环境建设提供方法借鉴和理论参考。[方法] 构建基于驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)概念框架的土地生态安全评价指标体系,借助灰色关联模型进行赋权,构建土地生态安全指数对重庆市 1997—2012 年土地生态安全指数进行评价。[结果] 1997—1998 年重庆土地生态安全处于敏感状态,1999—2002 年处于较安全状态,2003—2009 年处于敏感状态,2010,2011 年为不安全状态,2012 年为敏感状态。重庆市土地生态安全整体呈现缓慢的下降趋势,形势不容更乐观;重庆市土地生态安全的驱动力生态安全指数和压力生态安全指数呈现出轻微波动的整体下降趋势;状态指数和响应指数呈现整体增长趋势;影响安全指数呈现波动变化状态。[结论] 通过产业结构的调整、环境保护力度及资金投入的加大以及技术的提高,农业生产技术改进,提高森林覆盖率,加强对土地生态安全的响应力度,是重庆市土地生态安全的根本保障。该评价模型和指标体系适用性较强,评价结果较为客观,是土地生态安全评价的可用方法。

关键词: 土地; DPSIR; 灰色关联; 生态安全; 重庆市

文献标识码: B　　**文章编号:** 1000-288X(2016)05-0191-07　　**中图分类号:** X826

文献参数: 孙德亮, 张凤太. 基于 DPSIR-灰色关联模型的重庆市土地生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 191-197. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.038

Dynamic Evolution of Land Ecological Security Based on DPSIR-Grey Correlation Model in Chongqing City

SUN Deliang[1], ZHANG Fengtai[2]

(1. *School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing* 400047, *China*;
2. *Institute of Environment, Resources and Disaster, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou* 550018, *China*)

Abstract: [Objective] A preliminary exploration on the quantitative evaluation of land ecological security was made in Chongqing City in order to provide support and theoretical reference for land ecological security research and the ecological environment construction. [Methods] Based on the conceptual framework of driving force-pressure-state-impact-response(DPSIR), land ecological security evaluation index system was established. Grey correlation model was used to give weights for the land ecological security index to evaluate land ecological security of Chongqing City from 1997 to 2012. [Results] The land ecological security showed a gradual downward trend, as it was a sensitive situation during 1997—1998, 2003—2009 and 2012, a safe situation during 1999—2002, and a insecurity situation during 2010—2011. The land ecological security index of driving force and pressure fluctuated slightly and showed a downward trend. The state index and response index showed an overall growth trend, while the impact safety index showed a fluctuated change. [Conclusion] The adjustment of industrial structure, environmental protection, and increase of capital investment and the improvement of technology, the improvement of agricultural production, increase of the

收稿日期: 2016-03-20　　**修回日期:** 2016-04-09

资助项目: 国家自然科学基金项目"喀斯特城市边缘带土地利用/覆盖变化及其环境效应"(41261038); 国家自然科学基金项目"基于复杂网络聚类的应急救援中心动态选址优化研究"(41271411); 重庆市自然科学基金"基于复杂网络的最优减灾理论与方法研究"(cstc2013jcyjA40047)

第一作者: 孙德亮(1976—),男(汉族),山东省莒南县人,在读博士,讲师,研究方向为生态环境与区域可持续发展。E-mail: 67130612@qq.com。

forest coverage and enhancement of the response of land ecological security, is the fundamental guarantee of land ecological security in Chongqing City. The evaluation model and index system in the present study is reliable and can be used in land ecological security evaluation.

Keywords: land; DPSIR framework; grey correlation; ecological security; Chongqing City

随着人类经济发展与人口的激增,由人类活动引起的各类生态安全问题日益显现。土地作为人类生存发展最基本的生产资源,其生态安全关系着人类未来的可持续发展,对土地生态安全的研究具有重要的现实意义[1]。

土地生态安全是指陆地表层由各种有机物和无机物构成的土地生态系统的结构不受破坏,并且该系统提供服务的质量和数量能够持续满足人类生存和发展的需要[1-2]。近年来学术界对土地安全的研究较多,取得了丰富的研究成果,研究内容主要集中在土地生态安全的定义[3]、土地生态的评价指标体系构建[1]、评价模型的设计与选择[4]、土地生态安全的预警[5]等方面,研究对象主要集中在城市土地生态安全[6]、流域(区域)土地生态安全以及特殊地带(农牧交错带[7]、海岸带[8]、西南山地生态敏感区[9])土地生态安全。土地安全评价研究方法主要体现在评价指标体系的构建、指标权重的确定和评价模型的设计与选择方面,研究方法对土地生态安全评价结果的影响重大。目前较常用到的研究方法有综合指标法、模糊物元法、主成分法、集对分析法等方法。这些研究无疑对当前土地生态安全的研究起到了巨大的推动作用,但也存在不足,如指标选取片面性,权重的确定主观性较强,忽略了指标之间的客观信息等。

重庆市位于中国内地西南部、长江上游地区,青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,属于生态环境脆弱区,生态地位重要。重庆市直辖后经济飞速发展,人口活动加强,土地资源开发力度较大,土地生态安全面临威胁,重庆市土地资源生态安全不仅影响三峡水利枢纽工程的安全运行,而且对整个长江流域生态安全有着举足轻重的作用。灰色关联法,基于灰色理论,其原理是若干统计数列所构成的各条曲线几何形状越接近,即越相平行,则它们的变化趋势越接近,其关联度就越大,具有数学模型的客观性,同时分辨系数体现一定的主观性,主客观结合,权重确定更趋合理。驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型综合考虑影响土地生态安全的经济、社会、生态、环境等因素,完全刻画了土地生态安全的演化内在机理,突出了自然环境、资源与人类的耦合关系。鉴于此,本文拟构建基于 DPSIR 概念模型的土地资源生态安全评价指标体系,利用灰色关联方法确定权重,对重庆市土地生态安全定量化评价做出初步探索,为重庆土地生态安全研究和生态环境建设提供方法借鉴和理论参考。

1 研究方法

1.1 数据标准化

为消除由评价指标物理量量纲不同带来的影响,在评价之前需将样本中各指标无纲量化处理。本文采用线性插值法的标准化方法对原始数据进行无量纲处理。评价某地区 m 年的包括 n 个评价指标的土地生态安全状况,则其原始指标数据矩阵为[10]:

$$\boldsymbol{X}=\begin{vmatrix} x_{11} & x_{11} & \cdots & x_{11} \\ x_{11} & x_{11} & \cdots & x_{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{11} & x_{11} & \cdots & x_{11} \end{vmatrix} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{X}$——原始数据矩阵;x ——原始数据。

一般情况下,安全评价的所有指标可划分为逆向指标和正向指标等。正向指标(效益型指标)是指数值越大越好的指标,其标准化方法[10]:

$$y=\frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{2}$$

负向指标(成本型指标)是指数值越小越好的指标,其标准化方法:

$$y=1-\frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{3}$$

式中:$x_{\max}$ ——指标最大值;$x_{\min}$ ——指标最小值。

1.2 灰色关联方法确定权重

灰色关联方法是灰色系统理论中新的分析方法,它根据因素间的相似或相异程度,来衡量因素之间的关联度[10],克服了传统主观赋权法,如层次分析法(AHP)等的局限性,具有数学模型的客观性,同时分辨系数体现一定的主观性,主客观结合,权重确定更趋合理。但目前灰色关联法确定权重在土地生态安全研究领域涉及还较少。

(1) 确定数列的最优向量,由于进行对原始数据进行了标准化处理且都转化为正向指标,所以最优向量为[10-11]:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{G}&=(g_1,g_2,\cdots,g_n)\\&=(y_{11}\nu y_{12}\cdots\nu y_{1m},y_{21}\nu y_{22}\cdots\nu y_{2m},y_{11}\nu y_{12}\cdots\nu y_{nm})\end{aligned} \tag{4}$$

式中:ν 取最大运算符。

(2) 利用灰色关联系数公式计算第 j 个评价指标 y_j 与最优向量 G 的关联系数 $\delta_i=(y_i,G)$:

$$\delta_i=(y_i,G)=\frac{\min_i\min_j|y_{ij}-g_i|+\rho\max_i\max_j|y_{ij}-g_i|}{|y_{ij}-g_i|+\rho\max_i\max_j|y_{ij}-g_i|} \quad (5)$$

式中:$\min_i\min_j|y_{ij}-g_i|$——两级极小差;$\max_i\max_j|y_{ij}-g_i|$——两级极大差;ρ——分辨系数,$0<\rho<1$,一般取 $\rho=0.5$[10-11]。

(3) 计算第 j 个评价指标 y_j 的权重 w_j[11]

$$w_i=\delta_i/\sum_{i=1}^{n}\delta_i \quad (6)$$

1.3　土地生态安全综合指数及安全等级

土地生态安全综合指数(L_{ES})的计算公式如下[12]:

$$L_{ES}=\sum_{i=1}^{m}w_i R_{ij}\times 100\% \quad (7)$$

式中:L_{ES}——土地生态安全综合指数;w——权重;R——指标的标准化后的数值。

表 1　土地生态安全等级[1,12]

土地生态安全综合指数(LES)	等级	安全程度	特 征
80～100	Ⅰ	安 全	土地生态系统基本保持其自然属性,基本无农业污染,生态系统结构完整,服务功能稳定
60～80	Ⅱ	较安全	土地生态系统结构发生微弱程度变化,农业污染程度较低、土地利用强度较低,生态系统主要服务功能良好,未超出生态系统自身的承载能力
40～60	Ⅲ	敏 感	土地生态系统结构发生较大变化,服务功能急剧下降,个别生态压力已超出生态系统的承载能力
0～40	Ⅳ	不安全	土地生态系统结构受到破坏,结构不完整,服务功能已大量退化或丧失,已超出其承载能力、恢复和重建已十分困难

2　重庆市土地生态安全评价

2.1　研究区概况

重庆市位于中国内地西南部、长江上游地区,青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,气候温和,属亚热带季风性湿润气候。截至 2014 年末,重庆市常住人口 2 991.40 万人。城镇化率 59.6%。全市城镇常住居民人均可支配收入 25 147 元,农村常住居民人均可支配收入 9 490 元。但由于由于历史、文化、人口、开发模式等多重因素的影响,重庆市的生态环境较脆弱,土壤侵蚀和土地退化情况较严重[1]。据 2012 年重庆市水土保持公报,全市现有水土流失面积 3.14×10^4 km^2,占全市土地面积的 38.02%,全市平均侵蚀模数 3 392.59 t/(km^2.a),年均土壤侵蚀量为 1.06×10^8t。重庆市土地资源生态安全不仅影响三峡水利枢纽工程的安全运行,而且对整个长江流域生态安全有着举足轻重的作用。

2.2　数据来源

研究数据主要来源于《重庆市统计年鉴》(1997—2012),《重庆市水土保持公报》,部分数据通过年鉴数据换算得出,部分数据采用趋势预测获取。

2.3　土地生态安全 DPSIR 指标体系构建

1993 年,在综合 PSR 模型和 DSR 模型的优点基础上,联合国(IJN)提出并发展了 DPSIR,即驱动力—压力—状态—影响—响应模型,用于表征资源或环境系统的概念与复杂因果关系结构[11]。

目前 PSR 框架模型在土地生态安全评价中应用较广泛,DPSIR 概念模型在区域生态安全评价、水资源安全评价、生态系统健康评价中应用较广,在土地资源可持续利用、土地利用规划环境影响评价中有所应用,但是在土地生态安全评价中的应用却较少且没形成统一的认识。本文采用此概念模型,根据重庆市土地资源的特点和利用状况,参照已有的研究[11-12],遵循指标的全面性,代表性、可操作性等原则,建了基于 DPSIR 概念模型的重庆市土地生态安全评价指标体系如表 2 所示。

2.4　重庆市土地生态安全评价

依据公式(1)—(6)将评价指标的原始数据进行标准化处理,进而换算每个指标的综合权重和分项权重,见表 2。借助公式 7 进行计算重庆市 1997—2012 年的土地生态安全的综合安全指数和驱动安全指数、压力安全指数、状态安全指数、影响安全指数以及响应安全指数如表 3 所示,依据计算获得安全指数,对照表 1 的土地生态安全等级,确定重庆市 1997—2012 年的土地生态安全等级如表 4 所示。

表 2 土地生态安全指标及含义

目标层	因子层	指标层	权重	分项权重	意 义
土地生态安全	驱动力	人口自然增长率/%	0.056	0.275	表示人口增长对土地生态安全的驱动
		人均 GDP(元/人)	0.058	0.280	表示经济发展状况对土地生态安全的驱动
		城市化水平/%	0.045	0.221	表示区域发展状况对土地生态安全的驱动
		GDP 增长率(比上年)/%	0.046	0.224	表示经济发展强度对土地生态安全的驱动
	压力	人口密度/(人·km^{-2})	0.048	0.198	表示人口数量对土地生态数量安全的压力
		单位耕地面积化肥施用量/(kg·hm^{-2})	0.048	0.197	表示农业生产对土地质量安全的压力
		单位耕地面积农药施用量/(kg·hm^{-2})	0.042	0.175	表示农业生产对土地质量安全的压力
		单位耕地面积地膜使用量/(kg·hm^{-2})	0.046	0.190	表示农业生产对土地质量安全的压力
		单位面积 GDP 产出率/(万元·km^{-2})	0.058	0.240	表示工业生产对土地质量安全的压力
	状态	人均耕地面积(hm^2/人)	0.048	0.196	表示土地资源人均状态
		森林覆盖率/%	0.041	0.167	表示土地覆被变化状态
		城市人均公园绿地面积/(m^2)	0.039	0.160	表示城市土地覆被状态
		有效灌溉面积占耕地面积比/%	0.051	0.210	表示土地有效生产状态
		保护区面积占土地总面积比重/%	0.065	0.267	表示土地扰动的状态
	影响	单位耕地粮食产量物/(t·hm^{-2})	0.038	0.224	表示对土地生产效率的影响
		第三产业比重/%	0.048	0.288	对产业结构的影响
		农村居民家庭人均纯收入/元	0.037	0.219	对农民收入的影响
		农业机械化水平/(kW·h^{-1}·hm^{-2})	0.045	0.269	对农业产业现代化的影响
	响应	工业废水达标污排放率/%	0.057	0.410	表示土地质量安全的响应
		工业固体废物排放率/%	0.043	0.311	表示土地质量安全的响应
		环保投资/亿元	0.039	0.279	表示管理政策的响应

表 3 土地生态安全综合指数(L_{ES},1997—2012 年)

年份	综合生态安全指数	驱动力生态安全指数	压力生态安全指数	状态生态安全指数	影响生态安全指数	响应生态安全指数
1997	56.34	79.30	100.00	19.60	35.69	36.72
1998	57.51	87.16	93.20	23.61	47.29	24.36
1999	61.97	93.03	90.62	27.37	53.25	38.59
2000	65.07	88.58	87.45	44.66	57.11	38.05
2001	67.81	89.77	83.80	46.39	64.67	50.17
2002	62.91	79.45	73.88	49.55	59.58	48.03
2003	59.88	72.00	68.01	54.59	51.69	48.19
2004	56.77	69.94	64.86	49.39	43.68	53.04
2005	56.06	59.99	60.58	54.12	46.11	58.76
2006	52.90	49.22	40.87	60.03	61.79	56.78
2007	41.42	28.82	32.77	61.92	29.68	53.90
2008	43.41	40.48	27.25	68.96	21.02	58.80
2009	44.15	41.63	20.59	69.19	27.08	66.26
2010	39.99	19.26	18.37	75.92	20.02	69.70
2011	39.99	16.60	11.09	82.25	25.10	69.03
2012	45.35	29.57	10.04	84.64	43.19	64.55

2.4.1 *驱动力生态安全* 从表 3—4 以及图 1 来看，趋势拟合 $R^2=0.870\ 6$，重庆市土地生态安全的驱动力生态安全指数呈现出轻微波动的下降趋势，1997 年为 79.30，1999 年出现最大值为 93.03，最小值出现在 2011 年为 16.60，分别对应着为较安全、生态安全和不安全等级，最大值到最小指降幅达到 82.16%。表明重庆直辖后，经济飞速发展，GDP 增长率年均达到 12.29%，城市化水平由 1997 年的 31%飞速发展到 2012 年的 57%，对土地生态系统的驱动影响超出了土地生态系统本身的承受力。

表 4　土地生态安全等级(1997—2012 年)

年份	综合生态安全	驱动力生态安全	压力生态安全	状态生态安全	影响生态安全	响应生态安全
1997	敏 感	较安全	安 全	不安全	不安全	不安全
1998	敏 感	安 全	安 全	不安全	敏 感	不安全
1999	较安全	安 全	安 全	不安全	敏 感	不安全
2000	较安全	安 全	安 全	敏 感	敏 感	不安全
2001	较安全	安 全	安 全	敏 感	较安全	敏 感
2002	较安全	较安全	较安全	敏 感	敏 感	敏 感
2003	敏 感	较安全	较安全	敏 感	敏 感	敏 感
2004	敏 感	较安全	较安全	敏 感	敏 感	敏 感
2005	敏 感	敏 感	较安全	敏 感	敏 感	敏 感
2006	敏 感	敏 感	敏 感	较安全	较安全	敏 感
2007	敏 感	不安全	不安全	较安全	不安全	敏 感
2008	敏 感	敏 感	不安全	较安全	不安全	敏 感
2009	敏 感	敏 感	不安全	较安全	不安全	较安全
2010	不安全	不安全	不安全	较安全	不安全	较安全
2011	不安全	不安全	不安全	安 全	不安全	较安全
2012	敏 感	不安全	不安全	安 全	敏 感	较安全

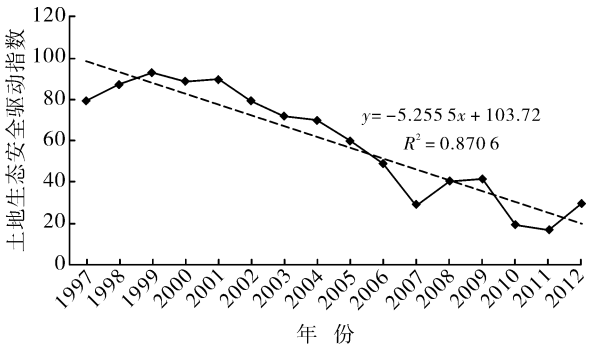


图 1　驱动力生态安全指数

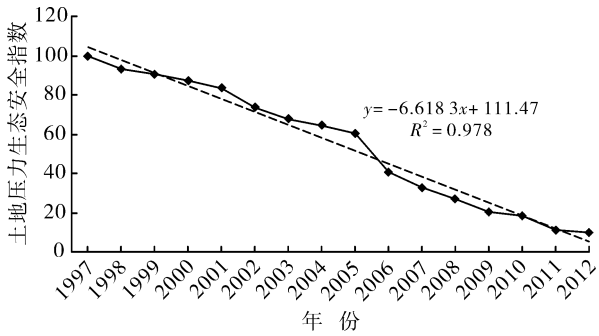


图 2　压力生态安全指数

2.4.2　*压力生态安全*　从表 3—4 以及图 2 来看,趋势拟合 $R^2=0.978$,重庆市土地生态安全的压力生态安全指数呈现急剧下降的趋势。压力安全指数由 1997 年的 100 急剧下降到 2012 年的 10.04,下降幅度达到 89.96%,压力生态安全整体由安全状态转变到不安全状态。表明重庆市经济社会以及农业的发展对土地生态系统产生了巨大压力,已经超出了土地生态系统本身的承载能力。人口密度由 1997 年的 369.27 人/km^2增加到 2012 年的 405.74 人/km^2,人口的增加,导致粮食的短缺,在人均耕地面积减少的情况下,单位耕地面积的农药、化肥等的使用势必增加来提高单位面积的粮食产量。因此,单位耕地面积化肥施用量由 1997 年的 193.15 kg/hm^2增加到 2012 年的 276.10 kg/hm^2,16 a 间增加了 42.94%。给土地生态安全产生了巨大的压力。

2.4.3　*状态生态安全*　从表 3－4 以及图 3 来看,趋势拟合 $R^2=0.952\ 4$,土地生态安全的影响指数呈现整体增长趋势,安全状态也由不安全转变为安全。影响指数由 1997 年的 19.60 增长到 2012 年的 84.64,16 a 增长了 3 倍多。影响指数和驱动力、压力指数呈现相反的变化趋势,主要得益于有效灌溉面积占耕地面积率、森林覆盖率和城市人均公园绿地面积的增加,有效灌溉面积占耕地面积率由 1997 年的 16.96%增加到 2012 年的 20.21%,森林覆盖率由 1997 年的 22.3%增加到 2012 年的 41.0%,城市人均公园绿地而积由 1997 年的 0.82 m^2增加到 2012 年的 18.13 m^2。随着三峡库区移民搬迁和外出务工人员的增加,加上直辖后政府对土地资源和环境保护的加强,单纯从状态结构上来看,在很大程度上改善了重庆市土地资源的生态安全现状。

2.4.4　*影响生态安全*　从表 3—4 以及图 4 看出,影响安全指数呈现波动变化状态,正说明了土地生态系统本身存在的自我恢复和调控机制在发挥作用。2001 年之前,重庆经济社会发展才刚刚起步,驱动力

和压力在土地生态系统可承受范围之内，所以影响安全指数呈现增长趋势，2001 年之后，前期对土地资源的影响经过积累负作用开始显现，开始呈现下降趋势。2006 年重庆地区发生的百年不遇的高温干旱，这时自然因素的影响占主导地位，人为的干扰反而减少，例如，粮食减产或者无法耕种，因本文主要是从人为影响角度分析土地生态安全，因此，2006 年土地资源的生态安全处于较安全状态（图 4）。2007 年重庆被确定为全国统筹城乡综合改革配套试验区，政府在户籍制度、土地管理和使用制度进行了改革，减少了对土地的影响，因此 2007 年之后影响生态安全指数止住了下跌的趋势，经过调整，2011 年开始呈现增长的趋势，2012 年恢复到了 43.19（敏感）。

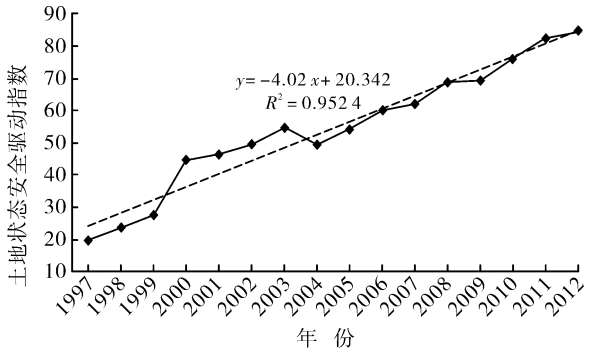


图 3 状态生态安全指数

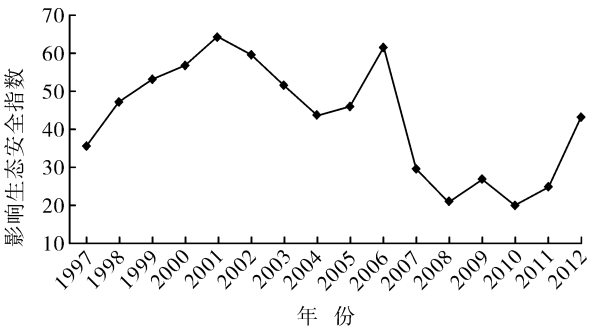


图 4 影响生态安全指数

2.4.5 *响应生态安全* 从表 3—4 以及图 5 来看，趋势拟合 $R^2=0.869\ 5$，重庆土地生态安全的响应生态安全指数一直处于缓慢增长的阶段，由 1997 年的 36.72 增长到 2012 年的 64.55，年均增长 1.74%。通过分析可以得出产业结构的调整、环境保护力度的加大以及技术的提高，农业生产技术改进对土地资源生态环境改善的贡献较大。此外，重庆直辖后经济社会得到飞速发展，加大了对环保的投入力度，1997 年环保投资仅为 0.989 2 亿元。

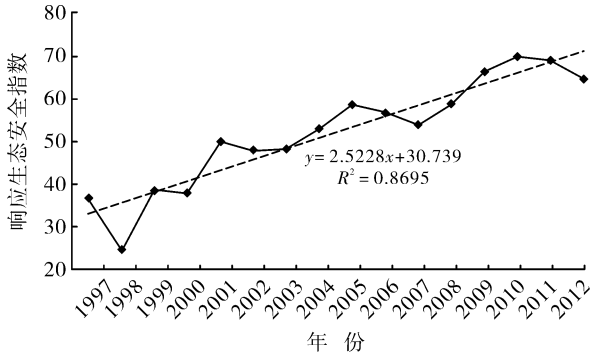


图 5 响应生态安全指数

2.4.6 *土地综合生态安全* 对重庆市 1997—2012 年的土地生态安全指数进行趋势拟合，如图 6 所示，拟合方程走势可以看出，重庆市土地生态安全整体呈现缓慢的下降趋势。依据表 1 生态安全等级来看，长期处于较安全和敏感的边缘，形式不容乐观。下一步重庆市应该减少对土地驱动力和压力，注重加强对土地资源生态安全的响应力度，现有水土流失、土地污染等环境问题的治理及森林覆盖率的提高。

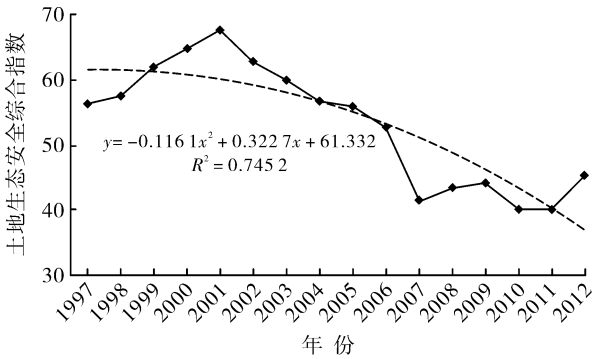


图 6 土地生态安全综合指数

3 讨论与结论

（1）本研究基于 DPSIR 概念框架，应用灰色关联方法赋予权重，构建土地生态安全指数模型对重庆市 1997—2012 年土地生态安全进行动态研究，计算得出的结果与土地生态安全客观情况相吻合，反映了其动态变化特征，证明了该评价方法具有一定的应用价值。为土地生态安全评价提供了有益的方法参考。

（2）研究表明，1997—1998 年重庆土地生态安全处于敏感状态，1999—2002 年处于较安全状态，2003—2009 年处于敏感状态，2010，2011 年为不安全状态，2012 年为敏感状态，重庆市土地生态安全整体呈现缓慢的下降趋势，形式不容更乐观。重庆市土地生态安全的驱动力生态安全指数和压力生态安全指

数呈现出轻微波动的整体下降趋势,影响指数呈现整体增长趋势,安全状态也由不安全转变为安全;影响安全指数呈现波动变化状态,证明了土地生态系统本身存在的自我恢复和调控机制在发挥作用;重庆土地生态安全的响应生态安全指数一直处于缓慢增长的阶段。因此,减少对土地驱动力和压力,通过产业结构的调整、环境保护力度及资金投入的加大以及技术的提高,农业生产技术改进,对现有水土流失、土地污染等环境问题的治理及森林覆盖率的提高,加强对土地生态安全的响应力度,进而提升重庆市土地生态安全的状态,从根本上保障重庆市土地生态安全。

(3) 本文仅仅在此讨论了重庆市土地生态安全的时间变化,重庆作为全国唯一的大城市带大农村的直辖市,区域发展不均衡,土地生态安全的地区差异也很明显,但限于数据采集的困难,本文没有涉及,下一步应该进一步完善。以上不足也是今后该研究继续努力的方向。

[参 考 文 献]

[1] 张军以,苏维词,张凤太. 基于 PSR 模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J]. 中国环境科学,2011,31(6):1039-1044.

[2] 李玉平,蔡云龙. 河北省土地生态安全评价[J]. 北京大学学报:自然科学版,2007,43(6):784-789.

[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):5-14.

[4] 荣慧芳,张乐勤,严超. 基于熵权物元模型的皖江城市带土地生态安全评价[J]. 水土保持研究,2015,22(3):230-236.

[5] 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):217-225.

[6] 孙奇奇,宋戈,齐美玲. 基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究,2012,19(1):234-239.

[7] 马瑛. 北方农牧交错带土地利用生态安全评价[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(7):53-59.

[8] 刘炎,康慕谊,吕乐婷. 海南岛海岸带土地生态安全评价[J]. 中国土地科学,2013,27(8):75-83.

[9] 韩蕾,孔祥斌,郭洪峰,等. 西南山区生态敏感区土地生态安全评价[J]. 水土保持研究,2015,22(1):230-237.

[10] 张凤太,苏维词,周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志,2008,27(7):1249-1254.

[11] 张凤太,王腊春,苏维词. 基于 DPSIRM 概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J]. 中国环境科学,2015,35(11):3511-3520.

[12] 马子惠,梁成华,孟庆欢,等. 基于 PSR 模型的大港油田土地生态安全评价研究[J]. 环境污染与防治,2015,37(1):41-47.

(上接第 190 页)

[7] 于大炮,唐立娜,王绍先,等. 长白山北坡植被垂直带群落交错区的定量判定[J]. 应用生态学报,2004,15(10):1760-1764.

[8] 李景刚,何春阳,李晓兵. 快速城市化地区自然/半自然景观空间生态风险评价研究:以北京为例[J]. 自然资源学报,2008,23(1):33-47.

[9] Li Yangfan, Zhu Xiaodong, Sun Xiang, et al. Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: A case study of Lianyungang, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2010,94(3/4):218-227.

[10] 许妍,高俊峰,高永年. 基于土地利用动态变化的太湖地区景观生态风险评价[J]. 湖泊科学,2011,23(4):642-648.

[11] 彭建,刘焱序,潘雅婧,等. 基于景观格局—过程的城市自然灾害生态风险研究:回顾与展望[J]. 地球科学进展,2014,29(10):1186-1196.

[12] 毛小苓,倪晋仁. 生态风险评价研究述评[J]. 北京大学学报:自然科学版,2005,41(4):646-654.

[13] 陈春丽,吕永龙,王铁宇,等. 区域生态风险评价的关键问题与展望[J]. 生态学报,2010,30(3):808-816.

[14] 曾勇. 区域生态风险评价:以呼和浩特市区为例[J]. 生态学报,2010,30(3):668-673.

[15] 徐丽芬,许学工,卢亚灵等. 基于自然灾害的北京幅综合生态风险评价[J]. 生态环境学报,2010,19(11):2607-2612.

[16] 肖杨,毛显强. 区域景观生态风险空间分析[J]. 中国环境科学,2006,26(5):623-626.

[17] 石浩朋,于开芹,冯永军. 基于景观结构的城乡结合部生态风险分析:以泰安市岱岳区为例[J]. 应用生态学报,2013,24(3):705-712.

[18] 阮俊杰,王卿,黄沈发,等. 海峡西岸经济区景观格局特征研究[J]. 水土保持通报,2013,33(4):31-34.

[19] 王若凡. 南忠仁基于景观生态学的黑河流域生态风险评价[J]. 安全与环境学报,2013,13(6):133-137.

[20] 王永丽,于君宝,董洪芳,等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学,2012,32(6):717-724.

[21] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报,2008,23(5):911-919.

[22] 陈鹏. 厦门湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 湿地科学,2006,4(2):101-107.

[23] 金妍,车越,杨凯. 基于最小累积阻力模型的江南水乡河网分区保护研究[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(1):8-4.

[24] 高宾,李小玉,李志刚,等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报,2011,31(12):3441-3450.

[25] 宣国富,徐建刚,赵静. 基于 ESDA 的城市社会空间研究:以上海市中心城区为例[J]. 地理科学,2010,30(1):22-29.

[26] Anselin L. Local indicators of spatial association:LISA [J]. Geographical Analysis, 1995,27(2):93-115.