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

苏正国[1,2], 李 冠[3], 陈 莎[3], 聂 鑫[4]

(1. 广西壮族自治区国土资源厅, 广西 南宁 530028; 2. 广西壮族自治区土地储备中心, 广西 南宁 530028; 3. 浙江大学 土地科学与不动产研究所, 浙江 杭州 310058; 4. 广西大学 公共管理学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: [目的] 分析影响土地生态安全状态变化的关键因素,为优化土地利用模式,落实广西壮族自治区生态文明建设提供依据。[方法] 在 PSR 模型的基础上结合"自然—经济—社会"和"人口—资源—环境—发展"框架构建了评价体系,运用突变级数法(CPM)揭示该区土地生态安全 2005—2015 年的总体变化趋势,并通过计算灰色关联度对不同阶段的影响因素进行甄别。[结果] 2005—2009 年广西地区土地生态安全水平呈快速上升趋势,达到较安全状态,主要归功于土地生态系统状态改善带来的积极作用;2010—2015 年广西地区土地生态安全水平呈现先上升稳定后下降至临界状态,虽然生态系统压力水平的显著提升引起了土地生态安全水平的下降,但是生态系统响应状况呈逐年提高带来了正向的推动作用。灰色关联度结果显示,2005—2009 年的生态安全水平变化主要是由于广西地区造林工程的积极推进带来的生境改善;2010—2012 年的变化主要是社会经济水平提升和社会发展;2013—2015 年的变化主要是由于人口增长以及人类活动对自然环境的响应。[结论] 针对影响土地生态安全水平的主要限制因素,广西地区今后应更加注重转变经济增长方式,提升资源利用效率,控制工业污染排放和提升农业科技水平等各方面的工作。

关键词: 土地生态; 突变级数法; 灰色关联; 影响因素

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)04-0142-08 **中图分类号**: F301

文献参数: 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[J]. 水土保持通报,2018,38(4):142-149. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20180712.001. Su Zhengguo, Li Guan, Chen Sha, et al. Land ecological security evaluation and its influence factors based on catastrophe progression method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(4):142-149.

Land Ecological Security Evaluation and Its Influence Factors Based on Catastrophe Progression Method
—Taking Guangxi Zhuang Autonomous Region as an Example

SU Zhengguo[1,2], LI Guan[3], CHEN Sha[3], NIE Xin[4]

(1. *Department of Land Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi* 530028, *China*; 2. *Department of Land Reserve Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi* 530028, *China*; 3. *Research Department of Land Science and Real Estate, Zhejiang University, Hangzhou* 310029, *China*; 4. *School of Public Administration, Guangxi University, Nanning, Guangxi* 530004, *China*)

Abstract: [Objective] The key factors affecting the change of land ecological security status were further identified in order to provide the basis for optimizing land use pattern and implementing the construction of ecological civilization in Guangxi Zhuang Autonomous Region. [Methods] Based on the PSR model combined with the NES(nature-economy-society) and PRED(population-economy-environment-development) framework, a four-level evaluation system was constructed, including the target layer, criterion layer and index layer, factors

收稿日期:2018-03-25 **修回日期**:2018-04-15

资助项目:国家社会科学基金重点项目"促进区域协调发展的差别化土地调控政策研究"(13AZD012); 国家自然科学基金项目"主体功能区规划框架下国土资源空间开发差异化策略与跨区域生态补偿机制研究:以广西为例"(71363005),"海岸带生境动态变化与农户土地利用生计策略多情景模拟及政策调控研究:以广西北部湾为例"(71763001)

第一作者:苏正国(1983—),男(汉族),广西壮族自治区武宣县人,硕士,工程师,主要从事土地管理研究。E-mail:suzhengguo126@126.com。

通讯作者:陈莎(1994—),女(汉族),浙江省台州市人,博士研究生,研究方向为土地利用与评价。E-mail:chensha@zju.edu.cn。

level. The catastrophe progression method(CPM) was applied to reveal the land ecological security overall trend in Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2005 to 2015, and through calculating the grey correlation degree, we can identify the influence factors of different stages. [Results] The results show a rapid upward trend of the land ecological security level in Guangxi area from 2005 to 2009 and reached at a relatively safe state, which was mainly attributed to the positive effect of the improvement of land ecosystem situation. From 2010 to 2015, the level of the land ecological security first increased steadily and then dropped to a critical state. Although the significant increase of ecosystem pressure caused a decline of the land ecological security, the increase of ecosystem response year by year brought positive effects. The results of grey correlation analysis show that the changes from 2005 to 2009 were mainly attributed to the afforestation project and ecosystem improvement. And the changes from 2010 to 2012 were mainly due to social and economic advancement and social development. From 2013 to 2015, the changes were mainly due to population growth and the response of human activities to the natural environment. [Conclusion] In view of the main limiting factors affecting the level of land ecological security, Guangxi area should pay more attention to the transformation of economic growth mode, improving resource utilization efficiency, controlling industrial pollution emissions and enhancing the level of agricultural science and technology and so on.

Keywords: land ecology; catastrophe progression method(CPM); grey correlation; influence factors

诸多生态安全问题的根源都指向人类不合理的土地开发利用[1]。土地生态安全评价目的是识别当下土地生态系统的健康状态以及发现人类土地利用中不利于土地生态系统健康平衡的行为[2]。作为最大的发展中国家，由于自然资源禀赋优势与社会经济开发热点呈现出空间不匹配，导致我国部分地区土地开发不均衡[3]。由此不可避免地出现土地利用过度透支区域土地的生态承载能力，更为严重的是，土地利用对生态环境的负面影响具有不可逆性，因此，在新时代背景下，土地生态安全问题成为我国实现可持续发展的关键问题。区域土地生态环境安全评价和监测一直以来都是土地生态安全研究领域的一个重点课题[4]。而且，如何维持土地利用在高安全区域内运行也成为区域可持续土地利用的一大严峻挑战[5]，是现阶段中国推进生态文明建设的首要问题。科学评价区域土地生态安全状态是区域可持续发展测度的基础[6]，也是优化配置土地资源、预警土地生态安全的重要依据[7-8]。已有研究中，众多关注点都集中在探讨科学的土地生态安全评价模型以及指标体系的构建，如：在评价模型的选取上，大多采用“经济—环境(自然)—社会”模式(EES 模式)[9-11]；经济合作发展组织(OECD)与联合国环境规划署(UNEP)共同提出了环境指标的 P-S-R 概念模型也得到了广泛的应用[12-16]。此外，学者们还关注如何应用多种数理分析手段评价土地生态安全状态，如：BP 神经网络方法的应用[9,13,17]；采用物元分析法及其改进算法等构建土地生态安全评价物元模型[6,18]；应用 GIS 和 RS 相结合的手段对网格尺度下土地生态安全的空间效应进行评价[2,19]；此外，生态足迹评价法[20]、模糊数学评价法[21]、突变级数法[14]、主成分分析法[22]、TOPSIS 法[23]、正态云模型[24]以及改进灰靶模型[25]等方法和模型也不断被引入土地生态安全评价中。虽然诸多评价模型与方法是评判土地生态安全的重要基础，但是，相对于土地生态安全状态的判断与评价，识别土地生态安全格局演变的影响因素，对于土地管理实践来说具有更加重要的现实意义。由于影响土地生态安全的因素非常复杂，且各因素之间的关系往往是非线性的，难以通过特定的数学模型进行准确描述[9]。而且，土地生态系统具有开放性、非平衡性和非线性特征[25]，土地生态状态的改变是一个非连续的过程，需要考虑土地生态系统变化所导致的突变效应[14,27]。因此，基于非平稳态的视角来评价和分析土地生态安全格局的变化，通过识别影响土地安全状态的土地利用因素，将有助于在土地利用和管理过程中，制定针对性的防范措施。当前，广西壮族自治区正处在社会经济发展的爬升期，人口快速增长、城市化和工业化快速推进引起了持续的土地利用变化，土地生态安全格局也处于一个连续的非平稳状态。基于此，本文应用改进的 PSR 模型，通过突变级数法(catastrophe progression method, CPM)对该区土地生态安全进行评价，并且通过灰色关联分析从中辨析影响土地生态安全状态变化的关键因素，为优化土地利用模式，落实该区生态文明建设提供依据。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

广西壮族自治区(以下简称广西)位于中国南疆，

地理坐标 104°28′—112°04′E，20°54′—26°24′N。东连广东省，南临北部湾并与海南省隔海相望，西与云南省毗邻，东北接湖南省，西北靠贵州省。全区土地面积 2.38×10^5 km，占全国土地总面积的 1/40，在各省、自治区、直辖市中排名第 9 位。其中山地、丘陵和石山面积占全区土地总面积的 69.7%，平原和台地占 27%，水域面积占 3.3%，足见广西土地资源具有山多地少的特点。2015 年，全区耕地面积 4.43×10^6 hm^2，人均耕地约 0.09 hm^2；生产总值(GDP)达 16 803.12亿元，第一、二、三产业增加值占地区生产总值的比重分别为 15.3%，45.8% 和 38.9%。按常住人口 4 796 万人计算，人均地区生产总值 35 190 元。

1.2 数据来源

本文所使用的社会、经济和人口数据来源于《中国环境统计年鉴(2005—2015 年)》《中国城市统计年鉴(2005—2015 年)》和《中国统计年鉴(2005—2015 年)》，土地利用现状数据来自于历年的土地利用变更调查。

2 研究方法

2.1 指标体系构建

人类社会进步的需求所引致的土地开发利用活动对土地生态系统带来压力，在此压力下社会、环境和整体资源所呈现的状态，以及人类社会面对上述生态压力和状态的情况下所主动采取的响应措施，都会影响土地生态安全格局的变化。为此，可以根据 PSR 框架土地生态安全系统划分为土地生态压力系统，土地生态状态系统以及土地生态响应系统[14,23]。因而，土地生态安全格局以及演变便可以通过土地生态系统中的压力、状态和响应 3 个子系统的相互关系进行分析和推演(图 1)。

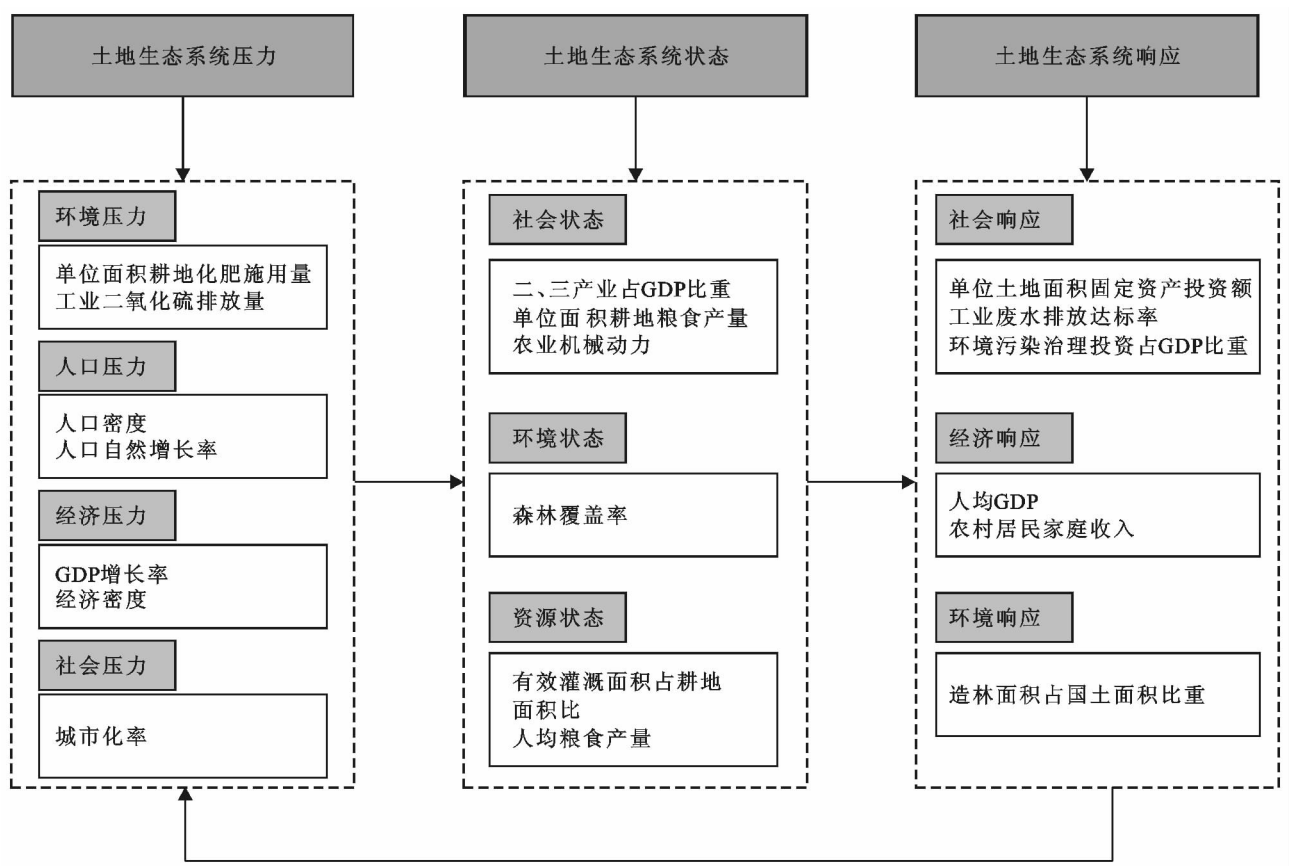


图 1 PSR 框架下土地生态安全格局演变简化模型

由于土地生态系统结构复杂且影响因素众多，因此本研究在参照前人 PSR 框架模型的基础上[14]，将土地生态安全解构为土地生态系统压力、土地生态系统状态、土地生态系统响应 3 个评价准则。在构建因素层时借鉴“自然—经济—社会”(NES)模型和“人口—经济—环境—发展”(PRED)框架，选择自然压力、经济压力、社会压力 3 个因素构成因素层，随后在系统压力准则层下增加人口压力因素，在系统状态准则层下将经济状态因素调整为资源状态因素。指标层是每个评价因素的具体指标，共计 19 个(表 1)。

2.2 突变级数模型

土地生态系统是一个复杂开发巨系统，其内部结

构尚未明确，系统的连续变化会导致不连续的突变现象。因此，研究基于突变理论构建土地生态安全评价模型。此评价模型的构建是依据落在分叉集内的控制变量的取值会使评价对象的状态发生突变[14]，常见的突变模型有 4 种（表 2），结合建立的评价指标体系，得到土地生态安全评价的突变级数模型（图 2）。为了降低权重的主观性和增强权重的合理性，研究采用熵权法确定各指标权重（表 1）。

表 1　土地生态安全评价指标体系

目标层	准则层	因素层	指标层	指标性质	权重
土地生态安全（SI）	土地生态系统压力（P）	P_1 环境压力	I_1 单位面积耕地化肥施用量/（kg·hm^{-2}）	−	0.032 928
			I_2 工业二氧化硫排放量/t	−	0.078 249
		P_2 人口压力	I_3 人口密度/（人·km^{-2}）	−	0.113 532
			I_4 人口自然增长率/‰	−	0.069 504
		P_3 经济压力	I_5 GDP 增长率/%	+	0.092 959
			I_6 经济密度/（万元·hm^{-2}）	+	0.017 571
		P_4 社会压力	I_7 城市化率/%	−	0.006 727
	土地生态系统状态（S）	S_1 社会状态	I_8 二、三产业占 GDP 比重/%	+	0.005 161
			I_9 单位面积耕地粮食产量/（t·hm^{-2}）	+	0.023 755
			I_{10} 农业机械动力/（kW·hm^{-2}）	+	0.021 953
		S_2 环境状态	I_{11} 森林覆盖率/%	+	0.054 75
		S_3 资源状态	I_{12} 有效灌溉面积占耕地面积比/%	+	0.031 411
			I_{13} 人均粮食产量（kg/人）	+	0.087 595
	土地生态系统响应（R）	R_1 社会响应	I_{14} 单位土地面积固定资产投资额/（万元·hm^{-2}）	+	0.143 697
			I_{15} 工业废水排放达标率/%	+	0.000 234
			I_{16} 环境污染治理投资占 GDP 比重/%	+	0.039 664
		R_2 经济响应	I_{17} 人均 GDP/元	+	0.028 616
			I_{18} 农村居民家庭人均纯收入/元	+	0.017 199
		R_3 环境响应	I_{19} 造林面积占国土面积比重/%	+	0.134 495

注：“+”表示指标值越大，土地生态安全性越高；“−”表示指标值越小，土地生态安全性越高。

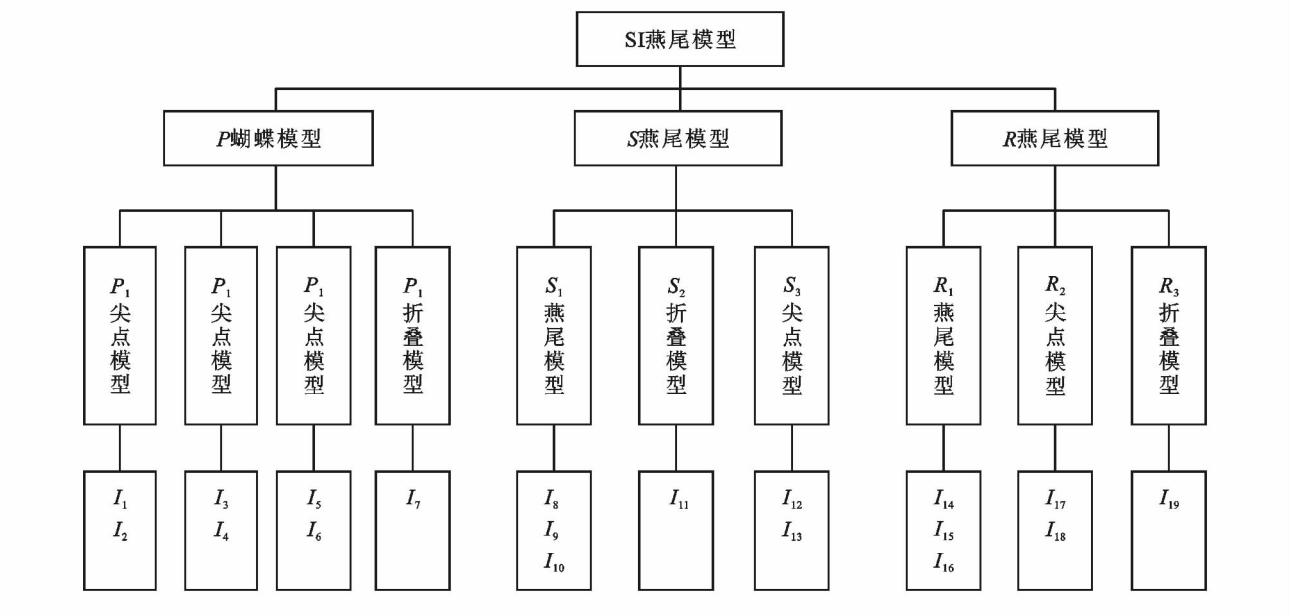


图 2　土地生态安全突变级数评价模型

2.3　数据预处理

在确定了各级指标的排列顺序后，将 2005—2015 年原始数据转换成突变模糊隶属度函数值。对于正向指标，数值越大越好，以样本中最大值为基准，将其突变模糊隶属度函数值取为 1.0；而对于逆向指标越小越好，以样本中最小值为基准，将其突变模糊隶属度函数值取为 1.0，采用上述准则变换后得到 2005—2015 年各评价指标的突变模糊隶属度函数值。

表 2 突变模型的描述

突变模型	控制变量	势函数模型	分歧点方程	归一化公式
折叠模型	1	$G(x)=x^3+ax$	$a=-3x^2$	$X_1=a^{1/2}$
尖点模型	2	$G(x)=x^4+ax^2+bx$	$a=-6x^2,b=8x^3$	$x_1=a^{1/2},X_2=b^{1/3}$
燕尾模型	3	$G(x)=x^5+ax^3+bx+cx$	$a=-6x^2,b=8x^3,c=3x^4$	$X_1=a^{1/2},X_2=b^{1/2},X_3=c^{1/4}$
蝴蝶模型	4	$G(x)=x^6+ax^4+bx^3+cx^2+dx$	$a=-10x^2,b=20x^3,c=-15x^4,d=-4x^5$	$X_1=a^{1/2},X_2=b^{1/3},X_3=c^{1/4},X_4=d^{1/5}$

2.4 评价标准的确定

设立科学客观的评价标准才能确保评价结果的正确性。一般地,评价区间的确定都是采用定量等分法,然而,由于突变级数法计算后的数值通常较高,而且各分值之间差额较小,难以通过定量等分法进行衡量。为此,研究借鉴已有研究的通用处理,将等分的等级指数带入突变级数模型,确定准则层和目标层的评价等级标准(表 3)。

2.5 灰色关联度分析

运用突变级数法进行生态安全指数计算和等级评价时,运用熵权法的目的仅在于得到各指标的重要性排序,并在运用突变模型时通过互补性原则或非互补性原则进行计算,而运用灰色关联度方法能够对系统发展变化态势提供量化的度量,非常适合动态历程分析[28]。灰色关联度计算公式为:

$$\xi_{0i}=\frac{\Delta(\min)+\rho\Delta(\max)}{\Delta_{0i}(k)+\rho\Delta(\max)} \tag{1}$$

式中:$\xi(x_i)$——灰色关联度;ρ——分辨系数,一般在 0~1 之间,通常取 0.5。$\Delta\min$——两极最小差;$\Delta\max$——两极最大差;$\Delta_{oi}(k)$——各比较数列 X_i 曲线上的每一个点与参考数列 X_0 曲线上的每一个点的绝对差值。

如有必要,可将各个时刻(即曲线中的各点)的关联系数集中为一个值,即求其平均值,作为比较数列与参考数列间关联程度的数量表示,关联度 r_i 公式为:

$$r_i=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\xi_i(k) \tag{2}$$

r_i 值越接近 1,说明相关性越好。

表 3 土地生态安全评判标准

安全等级	灾变理论求算的土地生态安全等级				常用的土地安全分级
	土地生态安全(Z)	系统压力(P)	系统状态(S)	系统响应(R)	
不安全	[0,0.817 7)	[0,0.750 4)	[0,0.668 7)	[0,0.668 7)	>0.8
较不安全	[0.817 7,0.891 8)	[0.750 4,0.848 5)	[0.668 7,0.795 2)	[0.668 7,0.795 2)	0.6—0.8
临界安全	[0.891 8,0.938 1)	[0.848 5,0.912 2)	[0.795 2,0.880 1)	[0.795 2,0.880 1)	0.4—0.6
较安全	[0.938 1,0.972 5)	[0.912 2,0.960 6)	[0.880 1,0.945 7)	[0.880 1,0.945 7)	0.2—0.4
安全	[0.972 5,1)	[0.960 6,1)	[0.945 7,1)	[0.945 7,1)	0—0.2

3 计算结果与分析

3.1 土地生态安全演变结果分析

结果表明,广西土地生态安全状态总体呈上升趋势,安全指数由 2005 年的 0.853 7 上升至 2015 年的 0.936 8(图 3)。根据表 3 中的安全等级评判标准,研究期内,广西的土地生态安全等级明显好转,安全水平由较不安全转变为临界安全。具体来看,2005—2009 年,土地安全水平呈现明显提升特征,平均每年以 2%的速率上升。土地安全等级从较不安全水平提升至较安全水平,主要得益于土地生态系统状态改善带来的积极作用。首先,广西拥有森林、湿地、海洋等多种类型自然生态系统,丰厚的自然资源本底确保了各种生态服务功能的稳定输出。城市环境空气质量达标率、江河水质达标率以及近海水域水质达标率等各项指标都优于全国平均水平。广西良好的环境质量本底是维持和提升广西生态安全水平必不可少的先决条件。其次,自《广西壮族自治区主体功能区规划》和《广西壮族自治区土地利用总体规划(2006—2020 年)》颁布实施以来,区域土地利用依据生态功能管制分区要求有针对性地调整和优化产业发展方向和生态保护与建设重点,社会、经济和生态的积极响应取得了良好的成效。2010—2012 年,土地生态安全水平呈现先上升后逐渐趋于平稳的趋势。土地生态安全水平的变化源于这一阶段土地生态系统压力及系统状态都处于较平稳的状态,而土地生态系统响应在逐步上升。然而,自 2013 年开始,生态安全总体水平出现下滑态势,这主要是由于近年来生态系统压力状态恶化明显所致,但是,由于生态系统响应状况逐年提高带来了正向的推动作用,因此有效地遏制了土地生态安全水平的大幅度下滑。

自 2005 年以来,广西严格控制森林资源开发利

用强度，并且大力推进造林工作，2005—2010 年年均造林面积达 143 453 hm^2，2010 年全区森林覆盖率达到 54%，并且依然保持着上升趋势。同时，土地生态利用日趋受到重视，不良土地利用造成的生态破坏和环境污染的趋势得到遏制，重点行业污染物排放强度明显下降，工业废水排放达标率由 2005 年的 83.69% 提升至 2015 年的 98.56%。通过发展高效优质现代农业、特色林果畜禽业等复合型农林牧业，使农民收入大幅增加，人均 GDP 增长了 2.5 倍，并且农业机械化水平的提高也促进了土地生态安全状态水平的提升。可以看出，稳定的系统状态以及积极的系统响应，是土地生态安全状态等级稳定和改善的动因。然而，土地生态安全水平自 2013 年以后较前几年相比有一定下降趋势，降低到了临界安全水平，主要由于全国经济开始进入“新常态”，从高速增长转为中高速增长，与前 3 a 相比，2013—2015 年平均 GDP 增长率下降了 5.89%，经济下行压力较大，土地生态安全压力骤然加剧；同时，近年来为保证粮食产量，农用化肥的施用量出现了大幅增加，土壤污染和破坏问题不容忽视。总体来说，广西土地生态系统依然面临严峻挑战，需要警惕和重视。

3.2　土地生态安全子系统变化情况

就土地生态系统压力来看，2005—2015 年生态系统压力等级变化趋势为先上升后下降，大体可分为两个阶段（图 3）。第一个阶段为 2005—2011 年，这个阶段属于土地生态安全压力指数的上升期，系统压力指数从 2005 年的 0.794 8 上升到 2011 年的 0.905 7，达到了临界安全的水平。2009 年的系统安全水平有小幅下降，这主要是由于受到经济危机的冲击，但明显看出土地生态系统安全水平总体上并没有持续恶化。这一阶段的压力减缓主要归功于环境压力和经济压力的改善，表现在遏制污染的能力上升和经济水平的提升，工业 SO_2 排放量由 2005 年的 9.75×10^5 t 减少至 2011 年的 3.86×10^5 t，GDP 增长率基本保持在平均每年 15% 以上的速率，经济密度增长了 116.6%，实现了翻番，城市化水平由 33% 上升为 41%，农村人均纯收入也实现了 94.1% 的增长。同时，在“十一五”期间，广西壮族自治区积极推进建设“富裕广西、文化广西、生态广西、平安广西”各方面工作，通过调整优化产业结构，特别是禁止向高污染企业供地，限制高耗能企业落地，加强资源综合利用等措施，在实现经济快速发展的同时有效控制了排污总量。第二阶段为 2011—2015 年，这一阶段土地生态安全压力指数呈下降趋势，而且降幅较大，从 2011 年的临界安全状态下降至 2015 年的较不安全状态。这一阶段压力状态的变化受到众多因素影响，人口、社会、经济压力都有大幅增加。首先，城市人口密度提高了 20.9%，人口的快速增长使土地压力日益加剧；其次，城市化进程也加大了对土地生态安全的威胁，而且，随着广西地区进入快速城市化时期，建设用地快速扩张及其不可避免的占用农用地行为，无形中加大了土地生态系统的压力。不仅如此，从 2011 年开始，GDP 增长率从11.21%降到了 2015 年的 7.21%，工业生产低位徘徊、工业投资和民间投资大幅下滑、出口仍然两位数下降等问题突出，经济下行压力给土地生态系统带来更大的压力。

2005—2015 年广西地区的土地生态系统状态总体比较理想，系统状态基本稳定在较安全和安全水平。上文已经提到了广西地区拥有优越的自然条件、良好的生态资源和独特的地缘优势，而且多年来土地生态安全状态一直维持在较高水准。同时，随着城市化、工业化的有力推进，工业机械化水平的进一步提高，以及大规模开展农村土地整治工程有助于改善和提升农村地区土地利用效率，确保了研究期内广西土地生态质量状况稳中有升。

2005—2015 年广西地区的生态系统响应呈稳步上升趋势，由 2005 年的 0.728 9 上升至 2015 年的 0.989 1，从较不安全等级转变到安全等级。事实上，近年来，生态广西建设方面取得了明显成效，最为突出的是在桂中北岩溶山地生态区全面实施石漠化综合治理，通过封山育林、退耕还林还草、小流域治理等一系列综合措施，恢复自然植被，提高水源涵养和水土保持能力，显著地提升了土地生态安全水平；其次，广西地区近年来的造林举措极大改善了土地生态安全状况，改善生态环境，同时环境污染治理投资也有所提升。

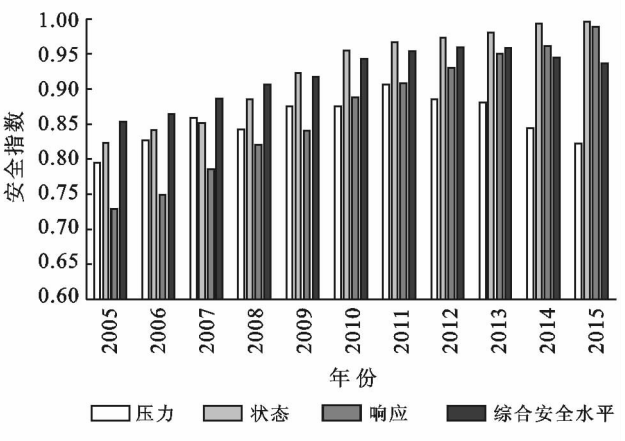


图 3　广西地区 2005－2015 年生态安全状态变化

3.3 土地生态安全水平影响因素灰色关联分析

根据灰色关联度计算结果(表 4),按照不同年份各指标因素关联度排序可将研究期大致分为 3 个阶段。第一阶段(2005—2008 年)。这一阶段,森林覆盖率、造林面积两个因素与土地生态安全总体水平的关联度最高,证明这一阶段生态安全水平的改善主要归功于造林工程的持续推进和自然生态的改善,同时农业机械动力和相关经济指标的关联度在逐渐攀升。结果表明,积极改善生态环境,提升生态安全质量的响应行为,对土地生态系统安全等级的提升起到显著的正向作用,也进一步支持了前文的分析。第二阶段(2008—2013 年)。随着社会经济水平以及城市化水平的不断提升,土地生态安全与经济密度、第三产业比重的关联度最高。灰色关联结果表明,自 2008 年全球金融危机后,经济发展方式的改变引致土地利用结构和强度的变化,区域经济发展的波动对土地生态系统压力影响加强。这一结果也表明了经济安全对土地生态安全水平影响的重要性,土地作为人类生产、生活的承载基础,经济平稳增长和社会发展对维持土地生态安全不可或缺。第三阶段(2013—2015 年)。这一阶段,与土地生态安全水平变化关联度最高的指标为人口自然增长率及代表环境治理响应的相关指标,如环境污染治理占 GDP 的比重和工业废水排放达标率,人口的增加,不仅直接带来了土地利用的改变,而且会由于人们对物质和精神产品的需求增加促使经济社会的发展,促进了非农产业和城镇的不断发展,这个时候更加需要全社会重视土地生态系统响应的灵敏性和有效性,控制污染,减少生态破坏,保障社会进入后工业时代阶段维持土地生态系统的健康运转。从整个研究期来看,与土地生态安全水平变化关联度最高的五项指标为造林面积、城市化水平、森林覆盖率、第三产业比重以及单位耕地面积化肥施用量。由此可见,经济发展特别是城市化进程必然对土地生态安全带来外在的刚性压力。同时,通过加强土地生态系统的正向回馈,提升土地生态安全系统响应能力,有助于维持和提升区域土地生态安全水平。

表 4 研究区 2005—2015 年土地生态安全水平影响因素灰色关联度

影响因素	关联度				平均关联度
	2005 年	2008 年	2013 年	2015 年	
单位耕地面积化肥施用量/(kg·hm^{-2})	0.903 3	0.780 4	0.715 6	0.640 6	0.784 0
工业二氧化硫排放量/t	0.444 1	0.542 4	0.666 4	0.650 6	0.598 3
人口密度/(人·km^{-2})	0.609 6	0.777 5	0.756 6	0.520 5	0.725 8
人口自然增长率/‰	0.708 0	0.689 2	0.847 5	0.774 5	0.781 8
GDP 增长率/%	0.408 0	0.491 1	0.754 4	0.588 0	0.595 4
经济密度/(万元·hm^{-2})	0.661 5	0.757 8	0.534 6	0.481 3	0.668 3
城市化率/%	0.936 7	0.833 0	0.685 2	0.590 9	0.794 1
二、三产业占 GDP 比重	0.629 8	0.759 6	0.860 8	0.696 4	0.788 3
单位面积耕地粮食产量/(t·hm^{-2})	0.698 3	0.772 9	0.769 4	0.698 9	0.780 0
农业机械动力/(kW·hm^{-2})	0.754 5	0.905 1	0.617 3	0.489 8	0.731 9
森林覆盖率/%	0.930 8	0.990 1	0.656 6	0.609 1	0.792 2
有效灌溉面积占耕地面积比/%	0.732 1	0.734 5	0.785 3	0.693 0	0.779 1
人均粮食产量(kg/人)	0.677 4	0.844 8	0.749 9	0.704 6	0.780 7
单位土地面积固定资产投资额/(万元·hm^{-2})	0.641 9	0.794 6	0.458 9	0.416 8	0.621 1
工业废水排放达标率/%	0.843 2	0.883 3	0.756 0	0.688 1	0.778 8
环境污染治理投资占 GDP 比重/%	0.917 0	0.806 6	0.668 6	0.602 4	0.737 4
人均 GDP(元/人)	0.575 6	0.773 5	0.457 3	0.409 2	0.603 6
农村居民家庭人均纯收入(元/人)	0.643 2	0.795 4	0.531 6	0.335 5	0.661 4
造林面积占国土面积比重/hm^2	0.880 5	0.899 8	0.751 3	0.469 2	0.802 1

4 结 论

本研究以改进的 PSR 模型为基础构建土地生态安全评价指标体系,同时综合考虑土地生态系统潜在的突变特性及其对评价结果的影响,运用突变级数法揭示了广西地区土地生态安全 2005—2015 年的总体变化趋势,并运用灰色关联度甄别不同阶段土地生态安全水平变化的影响因素。研究结果为其他地区进行土地生态安全评价提供了借鉴,也为客观评价广西近年来土地生态安全水平,识别影响土地生态安全的负面因素提供依据。总体来看,2005—2015 年广西地区土地生态系统安全有所提升,虽然 2008 年受到经济危机的冲击土地生态安全水平有所下降,但通过调整供地和加强土地生态建设,发展生态经济等组合

措施的运用，自 2010 年开始广西地区土地生态系统安全水平逐步提升，至 2012 年达到较安全的状态。但需要注意的是，2014 年进入经济新常态以来，经济增速减缓，经济下行压力依旧很大，而且，广西地区对一、二产业依赖过高（两者之和超过地区生产总值的 60%），农业和工业对生态环境造成的影响甚至是破坏不容忽视。同时，近年来广西地区的人口数量和密度在不断升高，城市化更加发达，人类活动对自然的影响将会更加明显，而人口压力的增大将会使得资源供需矛盾愈发突出。

基于研究期间广西地区土地生态系统安全格局演变特征及其影响因素，本文建议：①有效控制和减缓土地生态系统压力状态。随着广西地区工业化、城市化进程的进一步推进，土地生态系统将面临来自发展所带来的刚性压力。因此，需要通过土地宏观调控手段推进经济的高质量发展，加快产业结构转型速度，减少对矿产资源的依赖，降低企业整体的地均能耗；同时，加强土地生态建设，有序推动循环经济和生态产业的发展，根据资源环境条件、经济发展潜力、重点环境问题等因地制宜地开展各项生态建设活动。②坚持稳定和提升土地生态系统状态水平。农业和农村的发展水平将决定和影响土地生态系统状态。根据广西现阶段农业和农村发展的瓶颈，要坚定落实乡村振兴战略，积极推动兴边富民政策。积极开展土地整治和农村综合整治工程，大力发展现代农业，提高农业科技水平，降低工农业生产能耗，提高生产效率，同时延长产业链，不断提升农民生活水平。③积极夯实和拓宽土地生态系统响应路径。全民生态环境意识进一步提高，可持续发展理念深入人心是建设生态广西的必要基础。为此，需要不断提升土地生态环境基础建设的投入水平，加强喀斯特岩溶地区的综合治理，建立污染企业用地的退出机制，全面促进经济、社会、资源、人口、环境的均衡发展。

[参 考 文 献]

[1] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展[J]. 生态学报，2008，28(12)：6305-6311.

[2] 李建春，袁文华. 基于 GIS 格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J]. 自然资源学报，2017，32(6)：988-1001.

[3] Zhang Hongqi, Xu Erqi. An evaluation of the ecological and environmental security on China's terrestrial ecosystems[J]. Scientific Reports, 2017,7(1):811.

[4] Xu Linyu, Yin Hao, Li Zhaoxue, et al. Land ecological security evaluation of Guangzhou, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014,11(10):10537-10558.

[5] 李玉平，蔡运龙. 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.

[6] 黄辉玲，罗文斌，吴次芳，等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报，2010，26(3)：316-322.

[7] 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.

[8] 徐建昭，郝仕龙，王玉英. 黄土丘陵区的土地利用变化及其生态风险[J]. 水土保持通报，2017，37(5)：157-162.

[9] 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.

[10] 孙丕苓，杨海娟，刘庆果. 南水北调重要水源地的土地生态安全动态研究：以陕西省商洛市为例[J]. 自然资源学报，2012，27(9)：1520-1530.

[11] 张松男，雷国平. 基于 E-E-S 协同模型的土地生态安全模糊物元评价：以哈尔滨市为例[J]. 国土资源情报，2012(11)：51-56.

[12] 刘蕾，姜灵彦，高军侠. 基于 P-S-R 模型的土地生态安全物元评价：以河南省为例[J]. 地域研究与开发，2011，30(4)：117-121.

[13] 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.

[14] 郭宇伦，师学义，璩路路，等. 基于 PSR-CPM 模型的市域土地生态安全评价[J]. 水土保持研究，2017，24(4)：108-112.

[15] 严超，张安明，石仁蓉，等. 重庆市黔江区土地生态安全评价及时空变化分析[J]. 水土保持通报，2016，36(4)：262-268.

[16] Hua Ye, Yan Ma, Dong Limin. Land ecological security assessment for Bai Autonomous prefecture of Dali based using PSR model: with data in 2009 as case[J]. Energy Procedia, 2011,5(22):2172-2177.

[17] You Heyuan. Assessing land ecological security based on BP neural network: A case study of Hangzhou, China[J]. Journal of Computers, 2013,8(6):1394-1400.

[18] 余敦，陈文波. 基于物元模型的鄱阳湖生态经济区土地生态安全评价[J]. 应用生态学报，2011，22(10)：2681-2685.

[19] Du Peijun, Xia Junshi, Du Qian, et al. Evaluation of the spatio-temporal pattern of urban ecological security using remote sensing and GIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013,34(3):848-863.

[20] 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.

[21] 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.

（下转第 161 页）