

基于PSR-CPM模型的市域土地生态安全评价

郭宇伦, 师学义, 璩路路, 刘畅

(中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要:以PSR模型为基础,构建目标层、准则、因素层和指标层4级评价体系,运用突变级数法(CPM)对2005—2014年晋城市土地生态安全水平进行了评价。结果表明:2005—2008年,晋城市土地生态安全水平呈上升趋势,达到临界安全状态;2008—2009年,土地生态安全呈下降趋势,降低到较不安全水平;2009—2013年,土地生态安全水平呈上升趋势,并稳定在较安全水平;2013—2014年土地生态安全水平略有下降趋势,再次降低到较不安全状态。2005—2008年的变化主要是晋城市开展造林工程和产业结构改革的结果;2008—2009年的变化主要是受经济危机和旱灾的影响;2009—2013年的变化主要是由于经济、粮食产量的恢复和工业污染得到有效控制;2013—2014年的变化主要是经济发展减缓和人口增长所造成的。针对主要限制因素,晋城市今后应更加注重产业结构转型,控制工业污染排放和增加农业灌溉设施这三个方面的工作。

关键词:土地生态安全评价;突变级数法;PSR模型;晋城市

中图分类号:X821

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)04-0108-05

Evaluation of Land Ecological Security in Jincheng Based on the Model of PSR-CPM

GUO Yulun, SHI Xueyi, QU Lulu, LIU Chang

(College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the PSR model, the four-level model of target, criterion, factor and index was built, and land ecological security level of Jincheng City from 2005 to 2014 was evaluated by using catastrophe progression method. The results show that from 2005 to 2008, the ecological security level of land in Jincheng City was rose, and reached to the critical security state; from 2008 to 2009, the ecological security of the land declined and fell to less secure; from 2009 to 2013, land ecological security level was rose, and stabilized at relatively safe level; from 2013 to 2014, the level of land ecological security had a slight downward trend, and reduced to a less secure state again. The change was mainly the result of the afforestation project and industrial structure reform in Jincheng City in the period from 2005 to 2008. The change was mainly due to the economic crisis and drought in the period from 2008 to 2009. The change was mainly due to the recovery of economic, food production and industrial pollution in the period from 2009 to 2013. The change was mainly due to economic slow down and population growth in ther period from 2013 to 2014. In view of the main restrictive factors, Jincheng City should pay more attention to the transformation of industrial structure, control the industrial pollution emissions and increase the agricultural irrigation facilities.

Keywords: evaluation of land ecological security; catastrophe progression method; PSR model; Jincheng City

随着我国步入现代化进程,社会、经济的发展对土地需求量越来越大,并且在土地利用的过程中,存在着资源不合理、生境退化、生物多样性下降等一系列问题,因此对土地生态安全的研究已受到诸多学者的关注。在理论方面,对土地生态安全还没有统一的定义,梁留科等认为土地生态系统的安全是结构和功

能处于动态稳定平衡的状态^[1];曲福田等认为土地生态安全状态是能稳定、持续地提供人类生态服务和保障^[2];傅伯杰提出陆地表面上的地貌、水文、气候和土壤等自然要素与人和人类活动之间所形成具有相互作用的统一整体的状态是土地生态安全^[3]。在评价体系方面,许多学者选用自然—经济—社会概念框架

模型^[4]、PSR 框架模型^[5]、DPSIR 模型^[6-7]。在评价方法方面,主要有层次分析法、熵权法、模糊综合评价法^[8]、灰色关联度法^[9]、物元模型法^[10]等数学模型法;景观生态安全格局法^[11]、景观空间邻接度法^[12]等景观生态模型法;生态足迹法^[13]、生态承载力法^[14]等生态模型法。但是,目前大部分的研究缺乏对土地生态安全系统突变特性的考虑,没有考虑土地生态系统变化所导致的突变效应;并且在评价体系的构建上局限于模型架构,没有很好地结合研究区相关特点。晋城市是典型煤炭资源型城市,多年来粗放开采和工业化发展导致环境污染问题愈加严峻,对土地生态系统和人类生存环境形成极大威胁,因此科学评价晋城市土地生态安全具有重要意义。基于以上背景,本文运用改进 PSR 模型,选取有代表性的指标,通过突变级数法(CPM)对晋城市土地生态安全进行评价,可为土地生态安全评价模型的构建和方法的选取提供一种思路,为晋城市土地可持续利用和土地生态系统保护提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

晋城市位于山西省东南部,丹河、沁河流域下游,地理坐标 35°11′—36°04′N,111°55′—113°07′E,地势东北高,中南部较低。属于暖温带半湿润大陆性季风区,四季分明,夏热多雨,冬燥寒冷。年平均降水量 626~750 mm,降水量主要分布在夏季,主要的植被类型为针叶林、阔叶林、针阔混交林、草甸和灌丛等。土壤类型主要有褐土、棕壤土、草甸土、潮土、红黏土和新积土^[15]。2014 年,全市土地总面积为 9 424.9

km²,农用地、建设用地、和其他用地面积分别占总面积的 70.66%,6.22%,23.12%,总人口为 2 308 946 人。煤炭产业仍旧占据大量土地^[16],耕地面积逐年减少,土壤侵蚀严重,土地生态安全面临严峻考验。

1.2 数据来源

本文研究所用数据主要来源于《中国环境统计年鉴(2005—2014)》、《晋城市统计年鉴(2005—2014)》、《晋城市环境保护公报》、《晋城市土地利用总体规划(2006—2020 年)》和相关职能部门的统计数据。

2 研究方法 with 评价过程

2.1 研究方法

突变理论是由法国科学家托姆在前人研究的基础上提出的,它着重研究系统连续变化导致不连续的突变现象,适用于内部结构尚未清楚的系统^[17]。其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。突变级数法是该理论评价方法之一,首先将比较抽象和难于量化的最终评价目标进行逐级分解,分解到可以量化的指标层,再将同一层次的指标按重要性排列,最后再由指标层的控制变量根据不同突变模糊隶属函数和归一化公式得出总隶属度,从而得出最终目标的评价值^[18-19]。对于突变模型势函数 $E(x)$,对其求一阶导数,所得的所有一阶导数的集合称奇点集,所有满足奇点集的点就构成了平衡曲面。对势函数求二阶导数,由 $E'(x)=0$ 和 $E_3(x)=0$ 组成方程组,求解后即可确定分歧点方程。当控制变量满足分歧点方程时,该系统就会发生突变,当状态变量为 1 维时,常见的突变模型有 4 种(表 1)。

表 1 一维状态变量的突变模型

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	$G(x)=x^5+ax^3+bx+cx$	$a=-6x^2, b=8x^3, c=3x^4$	$X_1=a^{1/2}, X_2=b^{1/3}, X_3=c^{1/4}$
蝴蝶模型	4	$G(x)=x^6+ax^4+bx^3+cx^2+dx$	$a=-10x^2, b=20x^3, c=-15x^4, d=4x^5$	$X_1=a^{1/2}, X_2=b^{1/3}, X_3=c^{1/4}, X_4=d^{1/5}$

2.2 评价指标体系构建

评价指标体系是进行土地生态安全定量化评价的重要依据,其选取应遵循科学性、代表性、可操作性等原则。本文在构建指标体系时,参考了相关研究成果^[20],并结合晋城市当地实际情况,在 PSR 模型三级架构的基础上加入因素层,构建 4 个层次的评价体系,目标层、准则层、因素层和指标层(表 2)。其中,目标层表示土地生态安全综合水平。准则层是构成目标层的相互联系、相互作用的三个子系统,即土地生态系统压力、系统状态和系统响应,体现土地生态环境所承受人类活动带来的压力,在外界压力的影响下所呈现的环境质量和生态系

统状况,以及人类社会面对土地生态安全问题所采取的措施。因素层包括每个子系统的主要决定因素,包括环境、社会、经济、资源、人口 5 个主要因素,环境因素是土地生态安全的前提,其主要功能是维持土地生态系统的正常运作,保持生态结构的稳定和增强土地生态安全系统的自我调节能力;社会因素是土地生态系统的保障,是土地生态系统可持续发展的重要条件,保障社会发展下土地资源的合理分配和利用;经济因素是土地生态系统良好发展的有利支撑,经济的稳定增长为土地生态安全提供了资金支撑;资源因素是土地生态安全的根本目标,土地生态系统安全水平的高低与资源的可利用程度

呈正比,只有土地生态安全得到保证,供人类生存发展的资源才能永不枯竭;人口因素是土地生态安全的限制因素,随着人口的扩张,土地系统所面临的压力越来越大,合理控制人口发展,是维持土地生态安全的必要条件。指标层是每个评价因素的具体指标,共计 19 个。

表 2 晋城市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	W ₁	W ₂	W
土地生态安全(Z)	生态系统压力(A ₁)	环境压力(P ₁)	D ₁ 单位耕地面积化肥施用量(kg/hm ²)	—	0.087	0.063	0.075
			D ₂ 工业二氧化硫排放量(t)	—	0.038	0.062	0.05
		人口压力(P ₂)	D ₃ 人口密度(人/km ²)	—	0.059	0.084	0.0715
			D ₄ 人口自然增长率(%)	—	0.058	0.033	0.0455
			D ₅ GDP 增长率(比上年)(%)	+	0.051	0.029	0.04
		经济压力(P ₃)	D ₆ 经济密度(万元/hm ²)	+	0.03	0.046	0.038
			D ₇ 城市化水平(%)	—	0.028	0.042	0.035
	生态系统状态(A ₂)	社会状态(S ₁)	D ₈ 第三产业比重(%)	+	0.072	0.04	0.056
			D ₉ 单位耕地粮食产量(t/hm ²)	+	0.047	0.055	0.051
			D ₁₀ 农业机械化水平(kW·h/hm ²)	+	0.027	0.043	0.035
		环境状态(S ₂)	D ₁₁ 森林覆盖率(%)	+	0.129	0.083	0.106
			D ₁₂ 有效灌溉面积占耕地面积比(%)	+	0.04	0.048	0.044
		资源状态(S ₃)	D ₁₃ 人均粮食产量(kg/人)	+	0.042	0.034	0.038
			D ₁₄ 单位土地面积固定资产投资额(万元)	+	0.061	0.053	0.057
	生态系统响应(A ₃)	社会响应(R ₁)	D ₁₅ 工业废水排放达标率(%)	+	0.064	0.05	0.057
			D ₁₆ 工业固体废物综合利用率(%)	+	0.031	0.053	0.042
		经济响应(R ₂)	D ₁₇ 人均 GDD(元/人)	+	0.047	0.055	0.051
			D ₁₈ 农村居民家庭人均纯收入(元)	+	0.045	0.037	0.041
		环境响应(R ₃)	D ₁₉ 当年造林面积(%)	+	0.044	0.09	0.067

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。

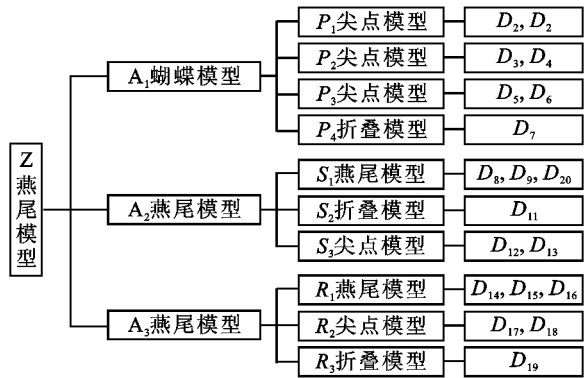


图 1 突变级数模型

2.3 数据标准化

由于选取的评价指标来自生态安全系统的各个方面,为了消除指标间量纲不统一,使数据有更强的可比性,则将各个指标用极差法进行无量纲化处理。

d_i = (x_i - x_min) / (x_max - x_min) (1)

d_i = (x_max - x_i) / (x_max - x_min) (2)

式中:d_i 为标准化后的指标数值;D_i, D_{max}, D_{min} 分别为评价指标 i 的实际值、最小值和最大值。公式(1)为正向指标标准化公式,公式(2)为负向指标标准化公式。

突变级数法(Catastrophe Progression Method,简称 CPM)要求指标按重要性排序,为了降低权重的主观性和增强权重的合理性,本文采取层次分析法(W₁)和熵权法(W₂)相结合的方法,确定各指标权重(W)^[15],并得到突变级数模型(图 1)。

2.4 评价标准的确定

评价标准的确定直接影响评价结果的正确性,一般都采用定量等分的方法确定评价区间,但基于突变级数法得到的数值通常较高,并且分值差距较小,因此本文参考前人所做研究将等分原理下的等级指数带入突变模型^[18-19],依据相应公式计算出准则层和目标层的评价范围(表 3)。

表 3 晋城市土地生态安全评判标准

安全等级	土地生态安全(Z)	系统压力(A ₁)	系统状态(A ₂)	系统响应(A ₃)
不安全	[0,0.905)	[0,0.784)	[0,0.784)	[0,0.682)
较不安全	[0.905,0.948)	[0.784,0.853)	[0.784,0.853)	[0.682,0.746)
临界安全	[0.948,0.9573)	[0.853,0.9124)	[0.853,0.9124)	[0.746,0.821)
较安全	[0.9573,0.976)	[0.9124,0.963)	[0.9124,0.963)	[0.821,0.9112)
安全	[0.976,1)	[0.963,1)	[0.963,1)	[0.9112,1)

3 结果与分析

将所收集数据带入上述方法模型中,应用 Matlab 和 Excel 软件对指标进行计算和汇总,最终得到目标层和准则层的计算结果(表 4)。

3.1 土地生态安全状况分析

从表 4 可以明显看出,晋城市土地生态系统安全变化总体为上升趋势,安全指数从 2005 年的 0.817 8 上升到 2014 年的 0.911 8,总体水平处于临界安全附

近。具体而言,2005—2008 年土地生态系统总体水平处于快速上升期,总增长率为 16.7%,从不安全水平提升到较不安全水平,并趋近于临界安全。主要原因是土地生态系统响应增长所带来的推动作用,2005 年开始,山西省开展产业结构改革,关停一些高污染的企业,推动第三产业的发展,并响应国家退耕还林的政策,在造林绿化方面投入资金 36 亿元,对林业的大力发展使得土地生态安全水平显著提升。

表 4 晋城市土地生态系统安全变化

年份	土地生态 安全(Z)	生态系统 压力(A_1)	生态系统 状态(A_2)	生态系统 响应(A_3)
2005	0.8178	0.6955	0.583	0.3778
2006	0.893	0.8711	0.5402	0.7524
2007	0.9492	0.8967	0.8383	0.8418
2008	0.9547	0.9053	0.8802	0.8289
2009	0.9185	0.883	0.8016	0.6186
2010	0.9617	0.9202	0.8583	0.9053
2011	0.9555	0.8637	0.8486	0.9618
2012	0.9577	0.8698	0.8666	0.9498
2013	0.9612	0.8464	0.9573	0.9152
2014	0.9118	0.6333	0.9069	0.8915

而 2009 年安全状况下降到较不安全状态,究其原因 是受到 2008 年经济危机的冲击,工业出现负增长现象,实体经济受到严重影响,并且随着煤炭资源的整合和价格的下降,煤炭行业出现大规模缩减,导致社会稳定性和土地生态安全性下降;另一方面,2009 年晋城市造林面积减少,比 2008 年降低 15.3%。2010 年开始,总体状况开始好转,并保持一定稳定,到 2013 年为止,总体波动水平不超过 0.7%,基本介于临界安全和较安全的水平,通过开展休闲农业和生态农业,使农民收入有所增加,人均 GDP 增长了 44.6%,并且农业机械化水平的提高也促使了粮食产量的恢复。此外,为了全面贯彻党的十七大和十七届三中全会精神,晋城市开展的“围绕打造四个中心,突出抓好六个重点,强力推进十大工程”工作也取得了一定成效,并且产业转型也促进土地生态安全的好转;2014 年较前几年相比有一定下降趋势,降低到了不安全水平,主要由于晋城市经济开始进入“新常态”,从高速增长转为中高速增长, GDP 增长率下降了 4.5 个百分点,经济下行压力较大,同时,粮食产量受自然灾害的影响也大幅下降,人均粮食创十年内新低。总体来说,晋城市土地生态系统面临严峻挑战,还需加强警惕。

3.2 生态系统压力变化分析

由表 4 可知,2005—2014 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。第一个阶段为 2005—2010 年,这个阶段总体变化为上升期,系统压力指数从 2005 年的 0.695 5 上升到

2010 年的 0.920 2,达到了较安全的水平,虽然 2009 年受经济危机的影响略有恶化,但幅度较小,阶段总特征依然为好转。这一阶段的变化主要由于环境压力和经济压力的改善,2010 年 SO₂ 总排放量比 2005 年下降 12.19%;GDP 和经济密度分别增长 128.1% 和 129.4%,实现了翻番,城市居民可支配收入和农民居民纯收入也都达到了 94.7%和 64.2%的增长。这主要归功于在“十一五”期间,晋城市实施了“蓝天碧水工程”,通过调整产业结构转变经济增长方式,促进清洁能源生产,实现了排污总量的减少和经济的快速发展。第二阶段为 2010—2014 年,这一阶段总体呈下降趋势,而且降幅较大,从 2010 年的较安全状态恶化到 2014 年的不安全状态,并且降幅有增大的趋势。这一阶段的变化影响因素较多,人口、社会、经济压力都有较大恶化,人口密度这一阶段增加 6.7%,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,建设用地快速扩张,乱占乱用农用地等行为都加大了土地生态系统所面临的压力。不仅如此,由于煤炭市场持续低迷导致经济压力逐年递增,从 2010 年开始,GDP 增长率从 13.7%降到了 2014 年的 4.8%,经济的低迷给土地生态系统带来更大的压力。

3.3 生态系统状态变化分析

从表 4 中可以看出,土地生态系统状态变化趋势为波动上升,并趋于稳定在临界安全水平范围内。2006 年比 2005 年略有下降,系统状态指数下降 0.012 8,主要是农业机械化水平降低引起的。而 2006—2008 年系统状态快速提升,从不安全状态转变为临界安全状态,是环境状态和社会状态飞速发展的结果。2006 年晋城市启动“六大造林绿化工程”,2007 年获全国绿化模范城市,2008 年成为林权改革试点,2006—2009 年,晋城市共投入造林绿化资金 26 亿元,使全市森林覆盖率达到 35.7%。通过推进经济结构调整和产业结构改革,使得第三产业快速发展,比重提高 5 个百分点,并淘汰了一些高污染的企业。而 2009 年系统状态再次下降,主要原因为粮食大量减产,年初受 30 a 一遇的冬春连旱影响,春播被迫推迟,入夏之后又遭受少雨水的灾情,导致当年粮食减产 19%,降低了整体生态系统状态。2010—2013 年,系统状态开始慢慢恢复并逐渐好转,指数提升了 0.155 7,达到了较安全的状态。这一阶段各个方面皆得到良好发展,粮食产量得到恢复,森林覆盖率稳定提升,第三产业比重也逐步增大,农业机械化水平也显著提高。然而 2014 年又显示了下降的趋势,回到了临界安全状态,主要原因是遭遇旱情粮食减产,对比 2013 年,粮食总产量下降 19.3%,人均粮食产量下降 19.6%。由此看出,2009—2014 年,粮食

产量的变化对土地生态系统状态的影响较大。

3.4 生态系统响应变化分析

由表4可以得出,2005—2007年生态系统响应处于快速上升期,安全指数增长149.2%,从不安全等级上升到较安全等级。这一阶段的变化主要是由于造林工程的开展,2006年和2007年总造林面积达23 001 hm^2 ,极大改善了土地生态安全状况,改善生态环境;并且,政府积极行动,查处重污染企业,工业废水达标排放率和工业固体废物综合利用率都有显著提升,改善了土地生态环境条件。2008年和2009年连续下降则是因为经济危机的冲击,导致工业疲软,经济增速缓慢,而且,造林面积大幅下降,两年造林总面积不足12 793 hm^2 导致系统响应水平又下降到不安全水平。2010年和2011年,土地生态系统响应水平恢复并有所提高,达到了安全等级,主要是因为经济响应的大幅提升和环境响应的恢复。通过“一村一品”双百工程的建设,推动农村农业生产和休闲观光的结合,提升了农民的收入,2011年农村居民家庭人均纯收入、人均GDP比2009年增长了34%和44.6%。此外,为了全力推进国家森林城市创建工作,实施生态造林绿化工程,新建了100个林业生态园林村,造林总面积达22 863 hm^2 。2011—2014年,土地生态系统响应水平略有下降,减退到较安全状态,其原因是经济发展进入新常态,增速放缓,三年人均GDP增速不到5%;并且,工业固体废物综合利用率增加也较缓慢,三年增加不到2个百分点;造林面积的缩减也是降低生态系统响应水平的重要因素之一。

4 结论与讨论

本文通过构建层次性更强的PSR模型指标体系,考虑土地生态系统潜在的突变特性对评价结果的影响,运用突变级数法揭示了晋城市土地生态安全2005—2014年的总体变化趋势,并对其进行分析,研究结果与实际事实相符,证明了CPM的有效性,为其他地区进行土地生态安全评价提供了参考。

总体来说,晋城市这10年间土地生态系统安全有所提升,随着2005年开始大力推动造林工程,土地生态安全稳步提升。虽然2009年受经济危机和旱灾等影响有所下降,但随着工业结构改革,绿色经济的发展,2010年开始逐步恢复,2013年已经达到较安全的状态。但需要注意的是,2014年进入经济新常态时期,经济增速减缓,经济下行压力依旧很大,需要加快转型速度,减少对煤炭资源的依赖,控制企业污染,推动清洁企业和循环经济的发展。此外,应大力发展农业灌溉设施,增强对旱情的抵抗作用。

本文尚存在一些不足。由于目前没有统一的土

地生态安全评价体系,本文所构建的体系不可避免地存在一些主观因素;此外,在指标的选取上,因有些代表性指标无法获得完整数据,只能选择其他指标代替,对结果可能会造成一定干扰,最后,本文未对土地生态安全进行演变和发展预测,以及相关调控措施的建议,这是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 梁留科,张运生,方明.我国土地生态安全理论研究初探[J].云南农业大学学报,2005,20(6):81-86.
- [2] 曲福田,赵海霞,朱德明.江苏省土地生态安全问题及对策研究[J].环境保护,2005(2):57-59.
- [3] 傅伯杰.土地生态系统的特征及其研究的主要方面[J].生态学杂志,1985(1):35-38.
- [4] 张小虎,雷国平,袁磊,等.黑龙江省土地生态安全评价[J].中国人口·资源与环境,2009,19(1):88-93.
- [5] 陈静,刘秀华,刘勇.基于PSR-TOPSIS模型的三峡库区土地生态安全评价:以丰都县为例[J].湖北农业科学,2015,54(24):6226-6230.
- [6] 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.
- [7] 郑奇洋,王纯彬,蒋丽钠,等.基于DPSIR修正模型下的土地生态安全评价:以舟山市为例[J].湖北农业科学,2016(16):4158-4164.
- [8] 赵春容,赵万民.模糊综合评价法在城市生态安全评价中的应用[J].环境科学与技术,2010(3):179-183.
- [9] 李希灿,王静,白兰,等.土地生态安全多目标多层次灰色关联度评价模型[C]//全国灰色系统学术会议,2008.
- [10] 乔蕻强,程文仕.基于熵权物元模型的土地生态安全评价[J].土壤通报,2016,47(2):302-307.
- [11] 张玉虎,李义禄,贾海峰.永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价[J].干旱区地理,2013,36(6):1049-1057.
- [12] 角媛梅,肖笃宁.绿洲景观空间邻接特征与生态安全分析[J].应用生态学报,2004,15(1):31-35.
- [13] 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.
- [14] 何亚芬.基于格网的南昌市土地生态承载力评价[D].南昌:江西农业大学,2015.
- [15] 刘伟玮.土地利用变化与土地生态安全评价研究[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [16] 刘畅,师学义,梁旭琴,等.基于物元模型的资源型城市土地利用效益动态评价研究[J].水土保持研究,2015,22(4):122-126,131.
- [17] 丁庆华.突变理论及其应用[J].黑龙江科技信息,2008(35):11-23.
- [18] 高奇.基于CPM-RBF模型的区域土地生态安全预警研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
- [19] 徐美,朱翔,周军.基于突变理论的湖南省土地生态安全格局分析[J].自然灾害学报,2012,21(6):199-207.
- [20] 张红侠,肖杰,张孝存.基于PSR的商洛市各县区土地生态安全分析[J].安徽农业科学,2015,43(36):306-308.