

# 资源型城市土地生态安全预警与障碍因子诊断

周 颖,何如海,陆雅雯,李青松

(安徽农业大学 经济管理学院,安徽 合肥 230036)

**摘要:**以马鞍山市为例,从时间维度对研究区土地生态安全进行动态预警评价及障碍因子诊断,为资源型城市保持区域土地生态安全和社会经济可持续发展提供参考。基于 PSR 模型,构建马鞍山市土地生态安全预警指标体系,综合运用熵权法、综合指数法测算 2007—2017 年马鞍山市土地生态安全指数,结合障碍因子分析法诊断影响其土地生态安全的主要障碍因子,并对马鞍山市未来 5 年的土地生态安全发展趋势进行动态预测。研究发现,11 年研究期内马鞍山市土地生态安全综合指数增长态势良好;从准则层和指标层的障碍度看,压力及状态子系统对未来马鞍山市土地生态安全状况起到主要限制作用;GM(1,1)模型预测结果表明,2018—2022 年研究区综合指数值走势向好发展。

**关键词:**资源型城市;土地生态安全;预警;PSR 模型;障碍因子;GM(1,1)模型

**中图分类号:**F301.2   **文献标识码:**A   **文章编号:**1008-7192(2020)02-0047-08

资源型城市是人类在以自然资源为物质基础的工业化进程中进化而形成的,是以资源开发为主导的区域增长中心和空间集合<sup>[1]</sup>。当前我国已确定的资源型城市达 262 个,约占中国城市总量的三分之一<sup>[2]</sup>。资源型城市不仅加快了我国的城市化进程,而且在实现区域经济快速发展方面做出了突出贡献<sup>[3]</sup>。近年来,伴随着工业经济的快速发展和城市的不断扩张,人类对资源的开发强度、消耗强度持续加大,从而导致资源紧张、土地污染、耕地面积减少、生物多样性下降等现象日益严重,在一定程度上威胁着区域土地生态安全,制约着人类社会的可持续发展<sup>[4]</sup>。

土地生态安全预警是指对土地资源开发利用后的生态后果、区域生态环境质量变化进行评价预测,并提出及时的警告<sup>[5]</sup>。土地生态安全作为一个正在探索的新兴研究方向,已有研究主要集中在土地生态安全评价、土地生态安全预警、土地生态安全重构与空间布局优化等方面<sup>[6]</sup>。在研究区域上,冯文斌等<sup>[7]</sup>、王鹏等<sup>[8]</sup>、何如海等<sup>[9]</sup>分别选取江苏省、青铜峡市、金寨县作为研究区进行区

域土地生态安全评价;在研究方法上,熊建华等<sup>[10]</sup>、汪磊等<sup>[11]</sup>、魏黎灵等<sup>[12]</sup>、陈伊多等<sup>[13]</sup>分别运用 PSR 模型、主成分分析法、生态足迹法、熵权物元模型开展土地生态安全研究。现有研究对资源型城市土地生态安全预警涉及较少,以马鞍山市为例进行预警分析,可为资源型城市保持区域土地生态安全和社会经济可持续发展提供参考,具有重要的现实意义。

## 一、研究区概况与数据来源

### 1. 研究区概况

选取马鞍山市为研究区,马鞍山市位于安徽省东部,其区域内矿产种类多样,且储量较大,2018 年全市生铁产量 1 810.04 万吨、粗钢产量 1 964.19 万吨、钢材产量 2 103.69 万吨,是典型的金属资源型城市。马鞍山市既是合肥都市圈、南京都市圈核心城市之一,同时也是长三角城市群的重要成员城市,在长三角一体化上升为国家战略的背景下,对其资源型城市转型发展及保持区域土地生态安全是一大机遇和挑战。

收稿日期:2019-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目“面向多重不确定性的森林生态系统服务价值评估模型构建与优化研究”(71873003)

作者简介:周 颖(1996—),女,安徽农业大学经济管理学院硕士研究生,研究方向为土地资源管理;何如海(1969—),男,安徽农业大学经济管理学院副教授,博士,硕士生导师,研究方向为区域经济与土地资源可持续利用。E-mail:2684642459@qq.com

## 2. 数据来源

数据主要来源于《马鞍山市统计年鉴(2008 - 2018年)》《安徽统计年鉴(2008 - 2018年)》以及各年份的《国民经济和社会发展统计公报》,在对基础数据进行核查整理的基础上,得到研究所需原始数据。

## 二、研究方法

### 1. 评价指标体系构建

生态环境是自然环境、经济环境和社会环境三者的交集<sup>[14]</sup>,PSR模型能够全方位地反映表征生态系统安全的自然、社会和经济因子之间的关系<sup>[15]</sup>。

在结合已有研究成果<sup>[16]</sup>的基础上,本文运用PSR模型构建指标体系,考虑到资源型城市的特性以及指标数据的科学性、可获取性,从压力 - 状态 - 响应三个子系统选取了27项具有代表性的指标(表1)。其中,压力子系统包括 $C_1$ 、 $C_2$ 至 $C_8$ 等8个三级变量,表示各种人类生产活动对土地生态系统造成的多重压力;状态子系统包括 $C_9$ 、 $C_{10}$ 至 $C_{16}$ 等8个三级变量,表示土地生态系统结构的状况;响应子系统包括 $C_{17}$ 、 $C_{18}$ 至 $C_{27}$ 等11个三级变量,表示人类为了改善土地生态安全状态所采取的积极响应措施。指标层中,正向指标有18项,负向指标有9项,涵盖了自然、社会、经济等各个方面。

表1 马鞍山市土地生态安全预警指标体系

目标层	准则层	指标层	指标代码	单位	指标趋向性	熵权
马鞍山市土地生态安全系统(A)	压力子系统( $B_1$ )	城市人口密度	$C_1$	人/km <sup>2</sup>	-	0.036 9
		人口自然增长率	$C_2$	‰	-	0.043 4
		城镇化水平	$C_3$	%	-	0.038 9
		第一产业占GDP比重	$C_4$	%	-	0.049 6
		化肥施用强度	$C_5$	t/hm <sup>2</sup>	-	0.027 5
		农药施用强度	$C_6$	t/hm <sup>2</sup>	-	0.036 1
		工业废水排放强度	$C_7$	t/km <sup>2</sup>	-	0.025 6
		万元GDP能耗	$C_8$	tce/万元	-	0.028 3
	状态子系统( $B_2$ )	土地垦殖率	$C_9$	%	+	0.075 2
		单位播种面积粮食产量	$C_{10}$	t/hm <sup>2</sup>	+	0.063 1
		森林覆盖率	$C_{11}$	%	+	0.047 5
		人均公园绿地面积	$C_{12}$	m <sup>2</sup> /人	+	0.019 4
		人均建设用地面积	$C_{13}$	m <sup>2</sup> /人	-	0.026 8
		人均城市道路面积	$C_{14}$	m <sup>2</sup> /人	+	0.033 6
		人均水资源量	$C_{15}$	m <sup>3</sup> /人	+	0.042 8
		经济密度	$C_{16}$	元/km <sup>2</sup>	+	0.035 4
	响应子系统( $B_3$ )	人均GDP	$C_{17}$	元/人	+	0.021 3
		第三产业占GDP比重	$C_{18}$	%	+	0.047 1
		城镇居民人均可支配收入	$C_{19}$	元/人	+	0.030 4
		农业机械化水平	$C_{20}$	kW/hm <sup>2</sup>	+	0.034 8
		废水治理设施数	$C_{21}$	套	+	0.034 0
		工业废气治理设施数	$C_{22}$	套	+	0.057 2
		工业固体废弃物综合利用率	$C_{23}$	%	+	0.048 7
		污水处理厂集中处理率	$C_{24}$	%	+	0.022 3
		生活垃圾无害化处理率	$C_{25}$	%	+	0.016 1
		节能环保支出占财政支出比重	$C_{26}$	%	+	0.030 9
		建成区绿化覆盖率	$C_{27}$	%	+	0.027 2

### 2. 土地生态安全水平计算

如下:

(1)数据标准化。考虑到评价指标的单位、趋向性有所不同,所以应对核查整理后的2007 - 2017年马鞍山市原始数据进行无量纲化处理。采用极值法可得到数据标准化值,具体计算公式

$$\text{正向指标: } y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

式中, $i$  表示年份( $i=1,2,3,\cdots,m$ ), $j$  表示第  $j$  项指标( $j=1,2,3,\cdots,n$ ), $x_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  项评价指标的实际值, $y_{ij}$  为其标准化后的数值( $0\leq y_{ij}\leq 1$ )。

(2)熵权法。综合分析多种赋权方法的特点,选用可以避免主观因素影响,同时客观性较强的熵权法确定评价指标权重。

第  $j$  项指标的信息熵:  $E_j = -k \sum_{i=1}^m (f_{ij} \ln f_{ij})$  (3)

第  $j$  项指标的熵权:  $W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)}$  (4)

表 2 2007 - 2017 年马鞍山市土地生态安全指数值

年份	压力指数	状态指数	响应指数	综合指数	安全等级
2007	0.085 7	0.025 9	0.052 9	0.164 4	I
2008	0.086 1	0.062 7	0.085 6	0.234 4	II
2009	0.088 6	0.089 9	0.095 4	0.273 9	II
2010	0.181 7	0.104 7	0.117 3	0.403 7	III
2011	0.182 8	0.147 6	0.175 3	0.505 7	III
2012	0.148 0	0.100 9	0.174 8	0.423 7	III
2013	0.141 9	0.114 5	0.193 0	0.449 5	III
2014	0.176 7	0.211 6	0.188 4	0.576 7	III
2015	0.178 8	0.245 9	0.272 3	0.697 1	IV
2016	0.161 5	0.250 5	0.293 4	0.705 4	IV
2017	0.159 1	0.239 6	0.324 4	0.723 1	IV

3. 土地生态安全预警标准

在参考已有研究<sup>[17-18]</sup>的基础上,结合马鞍山市的自然资源禀赋、社会经济发展水平等实际情况,确定资源型城市的土地生态安全预警标准(表 3)。

表 3 土地生态安全预警标准

安全水平	巨警	重警	中警	轻警	无警
取值区间	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1)
安全等级	I	II	III	IV	V

4. 障碍因子诊断

土地生态系统复杂多变,不同因素对土地生态安全造成的影响不同,限制作用的大小也有所差异<sup>[19]</sup>。通过障碍因子分析法,分别从准则层和指标层出发,可以计算出各年份压力 - 状态 - 响应三个子系统的障碍度以及各项评价指标的障碍度。在此基础上,识别 2007 - 2017 年 11 年的研究期内影响研究区土地生态安全的主要障碍因子。具体公式如下:

式中, $k=1/\ln m$ , $f_{ij}=y_{ij}/\sum_{i=1}^m y_{ij}$ ,当  $y_{ij}=0$  时, $f_{ij}\ln f_{ij}=0$ 。

(3)综合指数法。运用综合指数法对选取的 27 项评价指标的安全指数进行计算,从而得出马鞍山市 2007 - 2017 年土地生态安全指数结果(表 2),计算公式如下:

$A = \sum_{j=1}^n y_{ij} \times W_j$  (5)

式中, $A$  表示土地生态安全综合指数, $y_{ij}$  为标准化后的数值, $W_j$  为各指标熵权。

$Y_{ij} = 1 - y_{ij}$  (6)

$F_i = \frac{Y_{ij} \times W_j}{\sum_{j=1}^m Y_{ij} \times W_j}$  (7)

式中, $Y_{ij}$  表示第  $j$  项指标的偏离度,为该指标与理想值之间的差值, $y_{ij}$  为原始指标数据标准化后的数值。 $F_i$  为障碍度,表示第  $i$  年各指标对研究区土地生态安全水平的限制作用大小, $W_j$  为各评价指标的熵权。

5. 土地生态安全动态预测

灰色 GM(1,1) 模型可以根据已知的少量信息进行建模并预测<sup>[20]</sup>。在 Matlab2017 软件中输入研究区 11 年研究期的土地生态安全综合指数,依据 GM(1,1) 模型,可以预测 2007 - 2022 年马鞍山市的土地生态安全水平。为了探究所得模型是否适用,需要对其精度进行检验。一般采用后验差检验法,即比较 P 值、C 值是否满足相应的精度检验标准。

### 三、结果与分析

#### 1. 土地生态安全综合评价

从时间上看,2007—2017年研究区土地生态安全综合指数整体上呈波动上升趋势(图1),其数值变化区间为0.164 4~0.723 1,在11年研究期内其土地生态安全等级由I级上升为IV级,其安全水平由巨警转变为轻警状态,表明在此期间研究区土地生态安全状况在逐步改善和提升。可根据土地生态安全等级的动态变化,将11年的研究期总体上分为四个阶段:第一阶段2007年,马鞍山市土地生态安全等级处于I级;第二阶段2008—2009年,安全等级处于II级;第三阶段2010—2014年,安全等级一直处于III级;第四阶段2015—2017年,安全等级处于IV级。其中,2008年、2010年、2012年和2015年四个年份较为特殊。在2008年,马鞍山市土地生态安全等级由I级转变为II级,其综合指数较2007年提高了42.58%,主要是因为2008年马鞍山市单位播种面积粮食产量较2007年增加了217.17 kg/hm<sup>2</sup>,污水处理厂集中处理率由73.66%提升至81.4%,同时政府在节能环保方面的财政支出增加了0.865%。2010年,马鞍山市土地生态安全等级由II级转变为III级,得益于其工业废水排放强度、万元GDP能耗相较于2009年分别下降了30.98%、18.35%,同时污水处理厂集中处理率显著提升了18.21%,由于马鞍山市是矿产丰富的资源型城市,所以控制其资源消耗量、消耗强度,提高工业废弃物处理能力,能够有效改善区域土地生态安全水平。2012年综合指数值较2011年下降了16.22%,主要是由于2012年马鞍山市人口自然增长率大幅度提升,从2.57%升至4.85%,表明人口数量的增加导致人地关系紧张,对土地造成的压力超过其承载力,对区域土地生态安全造成了负面影响。2015年,安全等级由III级转变为IV级,主要是因为2015年马鞍山市第三产业比重由2014年的31.9%增至37.5%,工业固体废弃物综合利用由71.06%增至86.51%,表明产业结构的优化以及工业废弃物利用能力的提升,可以使资源型城市的土地生态安全状况向好发展。

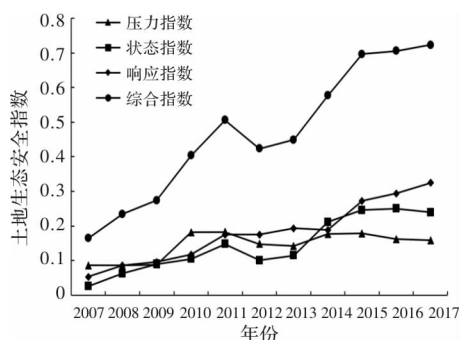


图1 2007—2017年马鞍山市土地生态安全指数动态变化趋势

#### 2. 子系统土地生态安全预警分析

(1) 压力指数分析。综合图1和表2可知,2007—2017年压力指数较不稳定,略有波动,总体上呈先上升后下降再趋于平缓的趋势,数值变化区间为0.085 7~0.159 1。2007—2011年,压力指数从0.085 7上升到0.182 8,并在2011年达到其压力指数的最高点,主要是因为马鞍山城市人口密度从5 111人/km<sup>2</sup>下降至3 564人/km<sup>2</sup>,2011年农药施用强度、工业废水排放强度、万元GDP能耗相较于2007年有大幅度下降,其降幅分别为41.34%、67.50%、29.46%。但在2011—2013年,土地生态压力状况出现明显恶化,压力指数从0.182 8下降至0.141 9,由于马鞍山市在2011年末进行了行政区划调整,并入了和县、含山二县,拓展了城市空间,人口自然增长率从2.57%提高至4.8%,同时城镇化率从59.4%升至62.57%。“十二五”初期,马鞍山市开始实施“1255”城市发展战略,人口数量的猛增以及城镇化水平的提高,在一定程度上对区域土地生态安全造成了双重压力。2013—2015年,压力指数逐年回升,从2013年的0.141 9升至0.178 8,表明马鞍山市土地生态压力状况在逐渐改善,在此期间马鞍山市人口自然增长率从4.8%降至4.12%,化肥、农药施用强度分别降至0.460 t/hm<sup>2</sup>、0.021 t/hm<sup>2</sup>,人口及土地污染带来的压力相应减少,得益于“十二五”后期,马鞍山市严格控制污染物总量等指标。2015—2017年,压力指数出现小幅度下降,其数值从0.178 8降至0.159 1,主要是由于2017年马鞍山人口自然增长率和城镇化水平相较于2015年分别提高了1.58%、2.74%。“十三五”初期,长江经济带、皖江城市带产业转移等区域发展战略持续

深入推进,在促进城市发展的同时,也在一定程度上使得马鞍山市的土地资源、环境承载力面临着更大的挑战。

(2)状态指数分析。由图1和表2可知,2007-2017年状态指数总体上表现为先上升再下降后回升再趋于平缓的特点,其数值变化为0.025 9~0.239 6。2007-2011年,状态指数积极向好,其数值从0.025 9大幅度增至0.147 6,单位播种面积粮食产量从6.66 t/hm<sup>2</sup>升至7.33 t/hm<sup>2</sup>,人均公园绿地面积从12.13 m<sup>2</sup>/人升至15.02m<sup>2</sup>/人,森林覆盖率相较于2007年提高了2.34%,得益于“十一五”期间,马鞍山市积极进行绿地生态圈建设,绿地、森林面积的增加有效地改善了区域土地生态安全状态,并增强了生态保护功能。2011-2012年,状态指数出现了小幅度下降,从0.147 6降至0.100 9,主要是因为马鞍山市人均城市建设用地面积从41.075 m<sup>2</sup>/人增至43.809 m<sup>2</sup>/人,城市建设用地的扩张使得马鞍山市维持其原有生态安全状况有一定的难度。2012-2015年,状态指数逐年回升,从0.100 9升至0.245 9,土地垦殖率、森林覆盖率相较于2012年分别提高了12.42%、5.37%,表明研究区生态状况在稳步提升。一方面是因为行政区划的调整使得马鞍山市耕地面积比重增加;另一方面是由于马鞍山市在“十二五”期间推进“森林进城工程”建设,显著提升了区域绿化覆盖率。2015-2017年,状态指数数值略有小幅波动。其中,状态指数在2016年达到11年研究期内的最大值,2016年人均水资源总量从986.33 m<sup>3</sup>/人猛增至1 745.1 m<sup>3</sup>/人,同时经济密度相较于2015年增幅为9.41%。

(3)响应指数分析。由图1和表2可知,2007-2017年响应指数呈波动渐进的趋势,其数值变化为0.052 9~0.324 4,11年研究期内响应指数积极向好发展,2007年为响应指数的最小值,2017年达到研究期内的最大值。在响应子系统中, $C_{18}$ 、 $C_{22}$ 、 $C_{23}$ 等3个指标对响应指数的贡献率较高,其熵值较高,相较于其他指标对响应子系统的影响更大。根据响应指数的变化趋势,可将其分为三个阶段:第一阶段2007-2011年,响应指数从0.052 9升至0.175 3。“十一五”时期,马鞍山市推进“生态马鞍山”建设,以马钢新区建设为基础,结合其资源禀赋

和产业结构调整,在工业“三废”污染治理方面加大投入,2011年废水治理设施套数、工业废气治理设施套数相比2007年有大幅度增加,分别增至197套、493套,工业固体废弃物综合利用率提高了9.52%,节能环保支出占财政支出比重大幅度增加了79.14%,低碳循环理念的贯彻使得污染物排放总量得到有效控制,污水集中处理率、废气排放达标率和工业固废利用率得到显著提高。第二阶段2011-2014年,响应指数趋于平缓,数值变化较小,从0.175 3升至0.188 4。第三阶段2014-2017年,响应指数保持上升趋势,从0.188 4升至0.324 4。其中,2015年较为特殊,2015年是“十二五”的末年,也是11年研究期内响应指数增幅最大的一年,其数值增幅达44.53%。“十二五”时期,马鞍山市实施“6653”现代产业体系发展战略,使得一二三产业结构更加合理,同时在制度方面确定了一系列的环保新标准及考核制度。此外,严控污染物总量、征收资源环境税等政策措施的实施,促进了马鞍山市区域土地生态安全水平向好发展。在此期间,马鞍山市第三产业比重从31.9%增至37.5%,工业固体废弃物综合利用率从71.06%增至86.51%,生活垃圾无害化处理率达到100%,因而在2015年响应指数能够有大幅增加。“十三五”初期,安徽省深入推进“调转促”行动计划,一方面使得马鞍山市一二三产业结构得到优化,节能环保、新材料等新兴产业和现代物流等服务性产业迅速发展;另一方面使其工业布局得到有效调整,工业化水平逐渐迈向新阶段。在“一带一路”、长三角一体化等区域发展战略和政府政策的叠加效应下,马鞍山市的经济总量增加,2017年人均GDP和城镇居民可支配收入相比2015年分别提高了22.87%、17.41%。同时,马鞍山市在“十三五”期间实施工业强市战略,以绿色发展理念协调好资源开发利用与节能环保的关系,生态市建设取得了很好的成效,如废气、工业及生活污水、土壤等污染得到有效整治,进一步加快了其资源型城市转型的步伐。

### 3. 障碍因子分析

(1)准则层障碍度分析。土地生态安全系统由压力、状态、响应子系统构成,三者之间相互作用、相互影响构成了一个有机复合体。从时间维度上

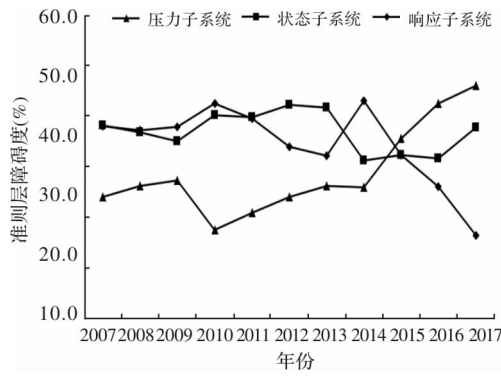


图2 2007-2017年马鞍山市准则层各子系统障碍度变化趋势

看,准则层3个子系统的障碍度随着时间的推移一直处于动态变化当中(图2)。其中,压力子系统和响应子系统的障碍度曲线波动较大,而状态子系统的障碍度波动相对较小。可根据压力、状态、响应子系统障碍度曲线的变化,将11年研究期总体上分为两个阶段:第一阶段2007-2014年,状态子系统和响应子系统的障碍度曲线始终保持在压力子系统之上,且两者障碍度数值之和始终超过54.1%,表明在此阶段状态和响应子系统对马鞍山市土地生态安全状况起到主要限制作用。第二阶段2014-2017年,压力子系统障碍度表现为上升趋势,其障碍度显著增加,从25.88%大幅增至45.91%;状态子系统有小幅波动,相对较为平稳;响应子系统走向持续向下,降幅达26.42%。其中,在2015年准则层3个子系统的障碍度变化曲线相互交叉,压力子系统的障碍度从2015年开始高于状态及响应

子系统。从各子系统近三年的障碍度的变化趋势看,在2015年之后,压力及状态子系统将转变为影响马鞍山市土地生态安全的主要障碍因素。表明未来应重点从降低压力、状态子系统障碍度的角度出发,兼顾维护响应子系统,从而提高研究区的土地生态安全水平。

(2)指标层障碍因子分析。现以障碍度数值排名靠前的8个主要障碍因子为例(表4),分析影响研究区土地生态安全水平的评价指标。综合图2和表4知,2007-2014年指标层8个主要障碍因子中大部分是状态及响应子系统的评价指标,而2015-2017年大部分是压力及状态子系统的评价指标。2007-2013年, $C_9$ 土地垦殖率的障碍度始终居于首位,其数值最大值为13%,一直是第一障碍因子,而排名二、三位的障碍因子中出现频率相对较高的主要是 $C_{10}$ 单位播种面积粮食产量、 $C_{22}$ 工业废气治理设施数、 $C_{23}$ 工业固废综合利用率、 $C_4$ 第一产业占GDP比重。2014年,第一障碍因子由 $C_9$ 转变为 $C_{10}$ ,第二障碍因子由 $C_{10}$ 转变为 $C_4$ 。总的来看,2007-2014年间, $C_9$ 、 $C_{10}$ 、 $C_{22}$ 、 $C_{23}$ 、 $C_4$ 等5个指标是阻碍研究区土地生态安全水平改善的主要障碍因子。“十一五”及“十二五”时期,马鞍山市依托区域矿产资源,大力发展马钢等工业企业,在一定程度上造成经济发展与保持区域土地生态安全的矛盾愈发突出。2015-2017年, $C_{10}$ 、 $C_4$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为排名靠前的主要障碍因子。

表4 2007-2017年马鞍山市土地生态安全指标层主要障碍因子

年份	障碍因子排序							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2007	$C_9$ (8.74)	$C_{10}$ (7.25)	$C_{22}$ (6.85)	$C_{23}$ (5.83)	$C_{11}$ (5.27)	$C_{15}$ (5.13)	$C_2$ (4.53)	$C_6$ (4.18)
2008	$C_9$ (9.32)	$C_{22}$ (7.41)	$C_{23}$ (5.93)	$C_{11}$ (5.75)	$C_{10}$ (5.35)	$C_{15}$ (5.28)	$C_{18}$ (5.20)	$C_2$ (4.94)
2009	$C_9$ (10.04)	$C_{22}$ (7.76)	$C_{23}$ (6.45)	$C_{11}$ (6.07)	$C_3$ (5.05)	$C_2$ (5.02)	$C_1$ (4.94)	$C_{18}$ (4.73)
2010	$C_9$ (12.60)	$C_{22}$ (9.20)	$C_{11}$ (7.96)	$C_{18}$ (7.35)	$C_{23}$ (6.68)	$C_1$ (6.19)	$C_{15}$ (5.52)	$C_6$ (5.00)
2011	$C_9$ (13.00)	$C_{18}$ (9.53)	$C_4$ (8.89)	$C_{22}$ (8.87)	$C_{16}$ (7.17)	$C_{23}$ (7.06)	$C_{11}$ (7.03)	$C_{15}$ (6.91)
2012	$C_9$ (11.17)	$C_{10}$ (10.87)	$C_4$ (7.94)	$C_{18}$ (7.16)	$C_{22}$ (6.57)	$C_{23}$ (5.89)	$C_{11}$ (5.76)	$C_{15}$ (5.60)
2013	$C_9$ (11.77)	$C_{10}$ (11.45)	$C_4$ (9.01)	$C_{15}$ (7.25)	$C_{18}$ (6.43)	$C_{22}$ (6.30)	$C_{23}$ (5.91)	$C_2$ (5.61)
2014	$C_{10}$ (10.19)	$C_4$ (10.04)	$C_{20}$ (8.22)	$C_{23}$ (7.39)	$C_2$ (6.45)	$C_{16}$ (6.42)	$C_{15}$ (6.34)	$C_{18}$ (6.12)
2015	$C_4$ (14.28)	$C_{20}$ (10.09)	$C_3$ (9.39)	$C_{10}$ (9.11)	$C_{16}$ (8.50)	$C_{15}$ (7.94)	$C_2$ (7.09)	$C_{22}$ (6.65)
2016	$C_{10}$ (20.45)	$C_4$ (13.34)	$C_2$ (11.62)	$C_3$ (11.39)	$C_{20}$ (9.52)	$C_{22}$ (7.63)	$C_{16}$ (6.81)	$C_1$ (4.47)
2017	$C_{10}$ (21.29)	$C_2$ (15.66)	$C_3$ (14.04)	$C_{20}$ (11.71)	$C_{15}$ (10.65)	$C_4$ (9.92)	$C_1$ (4.90)	$C_{26}$ (4.02)

4. GM(1,1)模型预测结果分析

从 Matlab 程序输出结果可以发现, $P=1$ , $C=$

0.2809,满足相应的精度检验标准,表明模型适合用于预测,可得到2007-2022年研究区土地生态安

全水平预测趋势图(图3)。由图3可知,2007—2017年研究区综合指数的实际值曲线基本在预测值曲线上下进行小幅度波动,两条曲线的总体上升趋势一致。2018—2022年,土地生态安全综合指数预测值曲线走势向好发展,增长态势良好。2017年综合指数的实际值和预测值分别为0.723、0.779,尚未达到无警状态,表明未来五年研究区的土地生态安全水平仍有进一步改善的空间。

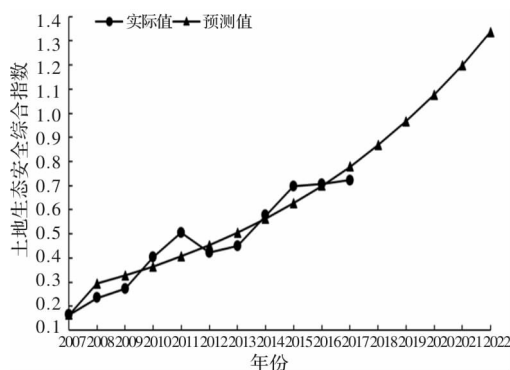


图3 2007—2022年马鞍山市土地生态安全水平预测趋势

## 四、结论与讨论

本研究结合资源型城市的自然资源禀赋、社会经济发展水平等实际情况,基于“压力—状态—响应”PSR模型选取了27项具有代表性的指标,构建了评价指标体系。综合运用熵权法、综合指数法及GM(1,1)模型,结合2007—2017年的时间序列数据对马鞍山市土地生态安全水平进行预警分析,分析影响其区域土地生态安全的主要障碍因子,得到如下结论。

(1)从时间维度上看,2007—2017年马鞍山市土地生态安全综合指数整体上呈波动上升趋势,在11年研究期内其土地生态安全水平由巨警逐步上升为轻警状态,表明在此期间研究区土地生态安全状况在逐步改善和提升。通过准则层各子系统指数的变化特点可知,应将各项压力指标控制在合理范围之内,同时维持好现有土地生态安全状态,并提高自身响应能力,才能有助于进一步提升马鞍山市区域土地生态安全水平,使马鞍山市社会经济能够可持续发展。

(2)由准则层3个子系统的障碍度变化可知,在2007—2014年,状态和响应子系统对马鞍山市土地生态安全状况起到主要限制作用;在2015年之

后,压力及状态子系统将转变为影响马鞍山市土地生态安全的主要障碍因素。由指标层各评价指标障碍度排名可知,2007—2014年, $C_9$ 、 $C_{10}$ 、 $C_{22}$ 、 $C_{23}$ 、 $C_4$ 等5个指标是阻碍马鞍山市土地生态安全水平改善的主要障碍因子;2015—2017年, $C_{10}$ 、 $C_4$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为排名靠前的主要障碍因子。马鞍山市未来应注重降低压力、状态子系统的障碍度,兼顾维护响应子系统,从而减弱主要障碍因子对保持区域土地生态安全的限制作用。

(3)根据GM(1,1)模型结果,可以预测2018—2022年马鞍山市的土地生态安全水平走势向好发展,其安全等级将从Ⅳ级提升为Ⅴ级,若采取积极合理的措施,兼顾资源型城市转型发展和生态保护,马鞍山市未来五年的土地生态安全状况将进一步得到改善和提升。

## 参考文献

- [1] 王亮,宋周莺,余金艳,等.资源型城市产业转型战略研究——以克拉玛依为例[J].经济地理,2011,31(8):1277—1282.
- [2] 郭平,周伟,袁涛,等.衰退型资源城市土地利用时空变化及驱动因素分析[J].水土保持研究,2016,23(4):191—198.
- [3] 葛学杰,徐松.安徽省典型资源型城市经济发展与转型的实证研究——基于DEA模型[J].市场周刊(理论研究),2013(6):3—5.
- [4] 陈晓珍.基于P—S—R模型和灰色预测模型的银川市土地生态安全评价[J].农业科学研究,2018,39(1):22—26.
- [5] 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.
- [6] 熊建华.土地生态安全研究理论框架初探[J].国土资源情报,2018(7):22—27.
- [7] 冯文斌,李升峰.江苏省土地生态安全评价研究[J].水土保持通报,2013,33(2):285—290.
- [8] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等.基于PSR模型的青铜峡市土地生态安全评价与预测[J].水土保持通报,2018,38(2):148—153,159.
- [9] 何如海,卞晓娣,程玉祺,等.基于PSR模型的金寨县土地生态安全评价研究[J].云南农业大学学报(社会科学),2018,12(5):101—106.
- [10] 熊建华,韩书成.基于熵权法和PSR模型的佛山市土地生态安全评价研究[J].环境科学与管理,2015,40

- (6):160-164.
- [11] 汪磊,张觉文. 基于主成分聚类分析的山东省土地生态安全评价及其影响因素分析[J]. 江苏农业科学, 2017,45(17):246-250.
- [12] 魏黎灵,李岚彬,林月,等. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价[J]. 生态学报,2018,38(12):4317-4326.
- [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] 崔玉婕,赵海燕. 城镇化与生态环境建设的关联性理论分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2017,29(1):124-126,143.
- [15] 杜艳春,姜畔,毛建素. 基于P-S-R模型的焦作市生态安全评价[J]. 环境科学与技术,2011,34(S1):280-285.
- [16] 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.
- [17] 李林潼,舒英格. 基于P-S-R模型的贵州省土地资源生态安全评价[J]. 广东农业科学,2015,42(15):116-121.
- [18] 孙鹏,何如海,王其帅,等. 合肥市土地生态安全预警及调控研究[J]. 辽宁工业大学学报(社会科学版), 2018,20(2):26-30.
- [19] 潘铃,周兴. 贵港市土地生态安全评价与时空动态研究[J]. 江西农业学报,2019,31(3):113-118.
- [20] 范胜龙,杨玉珍,陈训争,等. 基于PSR和无偏GM(1,1)模型的福建省耕地生态安全评价与预测[J]. 中国土地科学,2016,30(9):19-27.

## A Study of the Early-warning for Land Ecological Security of Resource-dependent Cities and the Diagnosis of Obstacle Factors

ZHOU Ying, HE Ru-hai, LU Ya-wen, LI Qing-song

(College of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** Taking Maanshan City as an example, the paper evaluates the early warning system for the ecological security dynamically and diagnoses the obstacle factors of the land in the study area. It aims to provide reference for maintaining the future ecological security of regional land and the socio-economic sustainable development in resource-dependent cities. Based on the PSR model, the early warning index system of land ecological security in Maanshan City was constructed. The entropy weight method and comprehensive index method are used to calculate the ecological security index of Maanshan City from 2007 to 2017. By means of obstacle factor analysis the main obstacle factors affecting the ecological security of the land are diagnosed. Accordingly the paper predicts dynamically the development trend of land ecological security in Maanshan City in the next five years. It is found that: 1) in these 11 years, the comprehensive index of land ecological security in Maanshan City grew well; 2) from the perspective of obstacle amounts in layers of criterion and index, the subsystems of both pressure and condition play a major role to restrain the future ecological security of Maanshan City; 3) the prediction results of GM (1,1) model indicate that the trend of the comprehensive index in the study area of 2018-2022 is developing well.

**Key words:** resource-dependent city; land ecological security; early warning; PSR model; obstacle factor; GM (1,1) model

【编辑 高婉炯】