

# 基于 RBF 模型的广东省土地生态安全时空演变预警研究

陈美婷<sup>1,2</sup>, 匡耀求<sup>1</sup>, 黄宁生<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**基于压力—状态—响应(P-S-R)模型构建土地生态安全预警评价指标体系,运用熵权法和 RBF 模型对 2000—2016 年广东省土地生态安全进行评价与预警研究,同时分析 2012 年广东省 21 地级市土地生态安全空间格局。结果表明:(1) 广东省土地生态安全水平总体呈波动上升趋势,其中 2000—2006 年处于重警状态,2007—2009 年处于高警状态,2010—2012 年处于中警状态。2013—2016 年,若不出现较大变故,全省土地生态安全将仍保持这一发展趋势,平稳中略有上升,仍处于中警状态;(2) 2012 年广东省土地生态安全基本上呈粤北、粤西警情高,珠三角和粤东警情低的格局;(3) 影响广东省土地生态安全的主要因素包括自然灾害受灾面积比重、公路密度、建成区面积比重、人均 GDP、经济密度、农民人均纯收入、自然保护区面积比重等,这些是今后调控的重点。

**关键词:**熵权法; 土地生态安全; 预警; 广东省

**中图分类号:**F301.2; F323.211

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)03-0217-08

## Early-warning of Spatiotemporal Evolvement of Land Ecological Security in Guangdong Province Based on RBF

CHEN Meiting<sup>1,2</sup>, KUANG Yaoqiu<sup>1</sup>, HUANG Ningsheng<sup>1</sup>

(1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,*

*Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Based on a pressure-status-response (PSR) model, the evaluation index system of land ecological security early-warning was built. And then the entropy weight and RBF model were used to evaluate and make a prediction for land ecological security development trend of Guangdong Province, meanwhile the spatial variation of eco-security in Guangdong Province in 2012 was analyzed. The results are shown as follows: (1) the comprehensive land ecological security index showed the rising trend with fluctuations, and remained in the heavy warning from 2000 to 2006, in the high warning from 2007 to 2009, in the moderate warning from 2010 to 2012, if the serious event didn't existed, comprehensive land ecological security index would keep the same development trend, and still in the moderate warning from 2013 to 2016; (2) the spatial variation of eco-security in 2012 in Guangdong Province showed that the warning degree was high in the northern and western areas of Guangdong Province, and the eastern area and Pearl River Delta were lower than the northern and western areas; (3) the main factors influencing the land ecological security of Guangdong Province include the proportion of natural disaster-affected area, road density, the proportion of built-up urban area, per capita GDP, economic density, per capita net income of farmers, the proportion of nature reserves, which will be the focus of land ecological security regulation in the future.

**Keywords:** entropy weight; land ecological security; early-warning; Guangdong Province

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,同时土地生态系统为人类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<sup>[1]</sup>。目前国内土地生态安全评价尚处于起步阶段<sup>[2-6]</sup>,大多停留于现状和过去的静态评价,缺乏从时空角度对土地生态安全进行动

态评价、预测和预警。目前预警理论和方法发展已较为成熟,在诸多领域都有成功应用,就土地生态安全预警而言,起步较晚。我国关于土地生态环境系统的预警研究始于 20 世纪 90 年代后期<sup>[7]</sup>,大多集中于对土地生态系统的某一生态安全问题,例如盐碱化<sup>[8]</sup>、荒漠化<sup>[9]</sup>、耕地数量变化<sup>[10]</sup>、土壤质量<sup>[11]</sup>等方面的预

警研究,而对整个土地生态系统安全预警的研究还比较少,因此有必要加强研究。鉴于此,本文采用熵权法、RBF 模型对 2000—2016 年广东省土地生态安全进行评价与预警研究,同时分析 2012 年广东省 21 地级市土地生态安全空间格局,从而为广东省制定土地生态安全预警调控措施、保障区域经济社会可持续发展提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

广东省位于中国大陆南部  $20^{\circ}09'—25^{\circ}31'N$ ,  $109^{\circ}45'—117^{\circ}20'E$ ,陆域土地  $1\,797.57$  万  $hm^2$ ,约占全国陆地面积的  $1.85\%$ ,其中耕地面积  $261.62$  万  $hm^2$ 。地势北高南低,地貌类型复杂多样,以丘陵为主,素有“七山一水二分田”之称。全省光、热、水资源丰富,四季常青,植被类型众多,土壤类型多样,主要有红壤、紫色土、砖红壤、黄壤、水稻田等。2012 年广东省常住人口  $10\,594$  万人,人均 GDP 为  $54\,095$  元,城镇居民人均可支配收入  $30\,226.71$  元,农村居民人均纯收入  $10\,542.84$  元。近几十年来广东省经济发展迅速,工业化和城镇化水平较高,但其发展所带来的人口、资源、环境与社会经济发展问题矛盾突出,尤其是土地生态环境问题。截至 2010 年,全省建设用地面积为  $18\,485$   $km^2$ ,开发强度为  $10.29\%$ ,其中深圳、东莞均超过  $40\%$ ,全省单位建设用地每  $km^2$  生产总值产出为  $2.56$  亿元,虽然位于国内较高水平,但远低于发达国家和地区(一般在 10 亿元以上)。

### 1.2 研究方法

土地生态安全评价的关键是建立科学的评价指标体系和确定各指标的权重<sup>[12]</sup>。指标权重的确定是获得客观评价结果的重要基础。目前,对土地生态安全的评价还处在实践和探索阶段,比较常用的确定权重的方法有模糊综合评价法<sup>[13]</sup>、灰色关联度法<sup>[14]</sup>、极差标准化法<sup>[15-16]</sup>、主成分聚类分析法<sup>[17-18]</sup>、物元模型法<sup>[19]</sup>、人工神经网络法<sup>[20]</sup>、投影寻踪法<sup>[21]</sup>、层次分析法等。为克服主观赋权所带来的人为因素的影响,本文将运用客观定权的熵权法,确定各评价指标的权重。

为了客观、全面、科学地衡量土地资源生态状况,在评价指标选取中,遵循科学性、可获取性和可操作性原则,并充分考虑研究区的特点和主要生态问题构建指标体系。本文根据 20 世纪 80 年代末,经济合作发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)共同提出的 P-S-R 模型,即压力(Pressure)—状态(State)—响应(Response),建立了一套土地生态安

全评价指标体系(表 1)。

### 1.3 数据获取

研究数据来源于 2001—2013 年《广东统计年鉴》、《广东农村统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》,历年 21 地级市统计年鉴和广东省国民经济和社会发展统计公报等。

### 1.4 土地生态安全计算模型

确定土地生态安全评价标准是整个土地生态安全评价过程中极为关键的环节,本文标准值的确定主要根据已有研究成果<sup>[22-23]</sup>,从以下几方面选取:(1)对于国际、国内公认的指标标准,以公认值为准;(2)若涉及我国生态、环保等考核标准,如生态县、生态市、生态省建设指标,以考核标准为准;(3)若某项指标值差异较大,则以省内相关规划要求为标准。

1.4.1 数据标准化 由于各指标的量纲、数量级,正负取向不同,需要对原始数据进行标准化,将其转化到  $[0,1]$  区间内,具体方法可见参考文献<sup>[24]</sup>。

1.4.2 权重计算 采用熵权赋权法,根据信息熵的定义,有  $m$  个样本、 $n$  个评价指标,评价矩阵  $m \times n$  中第  $ij$  项指标的信息熵为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}, f_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}} \quad (1)$$

式中: $E_j$ ——信息熵; $Y_{ij}$ ——第  $i$  个研究对象第  $j$  个指标的标准化值。由此可得出第  $j$  个指标的熵权定义:

$$W_j = \frac{(1-E_j)}{\sum_{j=1}^n (1-E_j)} \quad (2)$$

式中: $W_j$ ——第  $j$  项指标的权重, $W_j \in [0,1]$ 。

1.4.3 土地生态安全综合得分计算

$$T = \sum_{j=1}^n W_j Y_{ij} \quad (3)$$

式中: $T$ ——土地生态安全综合指数, $T$  值为  $0 \sim 1$ ,其值越大,表明土地生态安全水平越高。

## 2 土地生态安全预警研究

径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络是 J Moody 和 C Darken 在 20 世纪 80 年代提出的一种以函数逼近理论为基础的三层前馈网络,具有逼近能力强、学习速度快、网络结构简单等优点,可以任意精度逼近任意的非线性函数<sup>[25]</sup>,其优秀的函数逼近能力使其在经济预测、港口吞吐量预测、交通量预测、需水量预测等领域有着较为广泛的应用,但其在土地生态安全预警领域的应用还比较罕见。本文尝试采用 RBF 神经网络模型对广东省土地生态安全发展趋势进行预测预警分析。

表1 广东省土地生态安全预警指标体系

目标层	准则层	指标层	标准值	标准值来源	指标性质	权重	
土地生态安全综合指数	土地生态压力	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	128.78	国际公认值	负	0.0050	
		人口自然增长率/%	1.33	世界平均值	负	0.0046	
		单位耕地化肥负荷/(kg·hm <sup>-2</sup> )	255	国际公认值	负	0.0138	
		单位耕地农药负荷/(kg·hm <sup>-2</sup> )	30	国际公认值	负	0.0145	
		自然灾害受灾面积比重/%	2.6	全国平均值	负	0.1735	
		城市化水平/%	60	国际公认值	负	0.0010	
		第一产业比重/%	5	世界平均值	负	0.0373	
		公路密度/(km·km <sup>-2</sup> )	0.44	全国平均值	负	0.0773	
		土地生态状态	人均耕地面积/(hm <sup>2</sup> /人)	0.053	国际公认值	正	0.0169
			耕地面积比重/%	12.68	全国平均值	负	0.0152
	建成区面积比重/%		0.47	全国平均值	负	0.1361	
	万元GDP能耗/t标准煤		0.57	广东规划值	负	0.0265	
	森林覆盖率/%		60	广东规划值	正	0.0001	
	城市人均公园绿地面积/(m <sup>2</sup> /人)		14	广东规划值	正	0.0363	
	粮食作物单产/(kg·hm <sup>-2</sup> )		6000	国内公认值	正	0.0006	
	人均GDP/(元/人)		25000	国内公认值	正	0.0538	
	经济密度/(万元·km <sup>-2</sup> )		2305.66	生态省指标	正	0.2093	
	第三产业比重/%		45	国内公认值	正	0.0002	
	土地生态响应	农民人均纯收入/元	8000	国内公认值	正	0.0886	
		工业固体废弃物综合利用率/%	100	国际公认值	正	0.0094	
工业废水达标排放率/%		100	国际公认值	正	0.0025		
自然保护区面积比重/%		10	生态示范区	正	0.0482		
		农业机械化水平/(kW·hm <sup>-2</sup> )	20	全国平均值	正	0.0292	

## 2.1 RBF神经网络原理

RBF神经网络是一种具有三层结构组成的神经网络,即输入层、隐含层和输出层。输入层由信号源结点组成;第二层为隐含层,它将输入空间映射到新的空间,其单元数视所描述问题的需要而定;第三层为输出层,它对输入模式的作用做出响应<sup>[26]</sup>。其运行原理为:用RBF作为隐含层神经元的“基”构成隐含层空间,因此输入矢量就可以直接映射到隐含层空间,隐含层节点通过基函数执行一种非线性变化,而隐含层空间到输出空间的映射又是线性的,将输入空间映射到一个新的空间,输出层则在这个新的空间实现线性加权组合<sup>[27]</sup>。

RBF神经网络最常用的基函数是高斯函数:

$$R_i(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2a_i^2}\right) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中: $x$ —— $n$ 维输入向量; $c_i$ ——第 $i$ 个基函数的中心; $a_i$ ——第 $i$ 个隐节点的归一化参数; $m$ ——隐含层节点数。

## 2.2 RBF网络学习

RBF网络学习分为非监督学习和监督学习两个阶段。非监督学习阶段采用K-means聚类法对训练样本的输入量进行聚类,找出聚类中心 $c_i$ 及 $a$ 参数;

当 $c_i$ 和 $a$ 确定后,RBF网络从输入到输出就成了一个线性方程组,第二阶段监督学习阶段采用最小二乘法确定隐含层到输出层的权重 $W_j$ 。

本研究采用Newrb创建一个精确的RBF神经网络模型,利用RBF神经网络对2000—2012年土地生态安全评价指数样本数据做训练样本进行训练,建立预测模型并对验证样本集进行检验,检验模型的精确程度。

## 2.3 警度标准的划分

参考相关学者的有关研究成果<sup>[28-29]</sup>,依据广东省区域实际,确定广东省土地生态安全警度划分标准,见表2。

## 3 结果与分析

根据前述评价方法,计算出广东省土地生态安全综合值及各子系统指数(表3)。把2000—2012年各系统预警指数及综合值作为预测基础数据,建立时间序列预测模型,采用迭代滚动预测方法对2013—2016年广东省土地生态安全及各子系统发展趋势进行预测,在进行大量试验基础上,最终确定各系统的最佳输入层神经元为4,即用前4年的指数数据预测第5年的数据,因此类推,其中输出层神经元数为1。

本文应用 Matlab 2009b 软件的 newrb 函数和 sim 函数设计程序,用 2000—2012 年 13 a 共 9 组样本数

据,预测 2013—2016 年土地生态安全及各子系统变化趋势(图 1)。

表 2 广东省土地生态安全分级标准

警度区间	警度	警度描述
[0,0.4)	巨警	土地生态系统严重破坏,系统功能丧失,难以恢复,人地关系失衡
[0.4,0.5)	重警	土地生态系统受到明显破坏,系统功能发挥面临较大威胁,恢复与重建困难较大,人地关系在某种程度上失衡
[0.5,0.6)	高警	土地生态系统受到较大破坏,系统功能发挥受较大威胁,恢复与重建困难面临一定困难,人地关系面临较大威胁
[0.6,0.75)	中警	土地生态环境受到一定破坏,系统功能发挥受一定影响但尚可维持基本运作,土地生态系统受一定破坏但仍可恢复,人地关系面临一定威胁
[0.75,0.9)	轻警	土地生态系统受到的破坏较小,系统功能较好,土地生态破坏可得到及时控制与预防,人地关系较为协调
[0.9,1]	无警	土地生态系统基本未受到破坏,处于安全状态,系统功能完好,土地生态破坏现象较少,人地关系协调

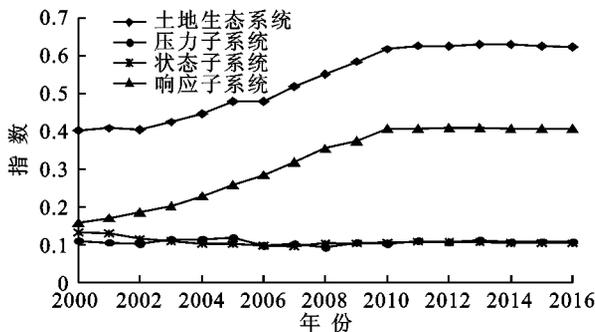


图 1 广东省土地生态安全预警指数发展趋势

### 3.1 土地生态安全子系统预警分析

(1) 压力子系统。如图 1,表 3 所示,2000—2012 年,广东省土地生态安全压力系统一直在 0.09~0.12 波动,变化趋势不明显,基本分为三个阶段:2000—2002 年为下降期,该阶段人口密度、城市化水平、自然灾害受灾面积、公路密度指标的增大致使土地压力子系统安全水平有所下降;2003—2005 年为上升期,该阶段人口自然增长率、农药化肥施用量、自然灾害受灾面积、第一产业比重指标的下降使土地压力子系统安全水平呈上升趋势;2006—2012 年变化复杂,压力指数上升和下降变化交替出现,基本上在 0.10 左右波动,相对前两阶段来说土地面临的生态负荷略有加大。2000 年以来,广东省进入城市化水平和工业化快速发展时期,城市不断扩张,聚集人口不断攀升,农药、化肥大量使用等造成土地生态压力一直居高不下,其中公路密度由 2000 年的  $0.5607 \text{ km/km}^2$  上升到 2012 年的  $1.0841 \text{ km/km}^2$ ,人口密度由 2000 年的  $486 \text{ 人/km}^2$  上升到 2012 年的  $590 \text{ 人/km}^2$ 。

根据预测结果,若不出现较大变故,2013—2016 年预警指数波动不大,基本保持原有变化趋势,而未来几年是广东省经济社会发展转型升级的关键时期,大量交通、能源、水利、产业项目的实施将不可避免给

土地生态安全带来一定压力,因此必须采取适当措施加以调控和缓解。

(2) 状态子系统。2000—2012 年状态子系统变化基本可分为两阶段:2000—2007 年为下降期,从 0.133 027 下降到 0.096 341,该阶段建成区面积比重、耕地面积比重呈上升趋势,城市人均公园绿地面积、粮食作物单产指标呈下降趋势,整体变化形势不容乐观。2008—2011 年为上升期,从 2007 年的 0.096 341 上升到 0.108 003,该阶段由于政府加大环保投入,直接带来了森林覆盖率、万元 GDP 能耗、人均公园绿地面积等指标呈好转发展趋势,但由于人口增加、建设用地扩展、人均耕地面积减少等不合理的土地利用方式,广东省土地生态安全状态系统面临一系列问题,在短期有所好转后,2012 年土地生态安全状态系统仍呈下降趋势,预测 2013—2016 年广东省土地生态安全状态系统的安全形势仍不容乐观,但在响应系统的进一步作用和调控下,也不会出现较大的恶化现象,将基本维持在 2008—2011 年的水平波动。

(3) 响应子系统。2000—2012 年响应子系统预警指数一直呈明显上升态势,由 2000 年的 0.159 056 增长到 2012 年的 0.409 082,其中经济密度指数从 2000 年的  $597.3577 \text{ 万元/km}^2$  上升到  $3173.7425 \text{ 万元/km}^2$ ,增长了 5.3 倍,人均 GDP 增长了 4.2 倍、农民人均纯收入增长了 2.9 倍、自然保护区面积比重从 3.49 增长到 6.7。这些指标的好转促使了土地响应指数发展态势良好,这与近年来广东省重视生态环保与资源节约理念而推行的一系列措施有关。近年,面对土地生态破坏带来的负面效应,全省积极应对,出台了《广东省土地利用总体规划》、《广东省环境保护规划条例》、《广东省基本农田保护区管理条例》、《广东省土地管理实施办法》等一系列政策法规,带动

全省土地生态安全响应系统呈良好发展趋势。

未来几年,随着生态文明建设步伐的纵深推进,一系列环保措施的实施以及人们环保意识的进一步提升,全省土地生态安全响应系统发展趋势将继续朝好的方向发展。

### 3.2 土地生态安全综合预警评价

广东省 2000—2012 年土地生态安全水平总体呈波动上升趋势,由 2000 年的 0.402 577 上升到 2012 年的 0.624 734,增加了 0.222 157,其中 2000—2006 年处于重警状态,2007—2009 年处于高警状态,2010—2012 年处于中警状态。按此发展态势,根据预警结果可知,2013—2016 年,若不出现较大变故,全省土地生态安全的总体警度仍将基本保持这一发展趋势,平稳中略有上升,仍处于中警状态。2010 年是土地生态安全变化趋势的拐点,2010 年之前土地生态安全增长趋势明显,之后在 0.625 左右略有波动,变化不明显。由图 1 可见,广东省土地生态安全综合指数波动趋势与土地生态安全响应指数变化趋势基本一致,说明了近 13 a 广东省土地生态安全指数上涨,是由于土地生态响应增强所致。

表 3 2000—2012 年广东省土地生态安全指数变化表

年份	压力子系统	状态子系统	响应子系统	综合安全指数	土地生态安全等级
2012	0.108248	0.107404	0.409082	0.624734	中警
2011	0.110630	0.108003	0.407338	0.625972	中警
2010	0.103716	0.106343	0.407183	0.617242	中警
2009	0.105851	0.103672	0.375071	0.584595	高警
2008	0.092569	0.103902	0.354900	0.551371	高警
2007	0.102960	0.096341	0.318853	0.518154	高警
2006	0.097153	0.097721	0.284846	0.479720	重警
2005	0.118959	0.101991	0.258527	0.479477	重警
2004	0.115195	0.102057	0.228978	0.446230	重警
2003	0.113685	0.108965	0.202202	0.424851	重警
2002	0.103052	0.115636	0.185774	0.404462	重警
2001	0.105839	0.130959	0.171188	0.407986	重警
2000	0.110494	0.133027	0.159056	0.402577	重警

### 3.3 土地生态安全警情空间格局分析

依据 2012 年广东省 21 地级市的相关数据,运用前述研究方法,计算广东省 21 地级市土地生态安全的预警指数,结果如表 4 所示。

2012 年广东省 21 地级市土地生态安全综合指数为 0.492 979~0.789 646,如图 2 所示,广东省土地生态安全基本呈粤北粤西警情高,珠三角和粤东警情低的格局。珠海、惠州两市土地生态安全指数居全省前茅,处于“轻警”状态;潮州、汕头、东莞、广州、深

圳、肇庆、汕尾、佛山等十市处于“中警”状态;江门、韶关、河源、阳江、中山、湛江、茂名、清远八市处于“高警”状态;云浮处于“重警”状态。

表 4 2012 年广东省地级市土地生态安全综合指数

年份	压力子系统	状态子系统	响应子系统	综合安全指数	土地生态安全等级
广州	0.736489	0.253011	0.085257	0.398221	中警
深圳	0.726103	0.268119	0.080224	0.377760	中警
珠海	0.789646	0.266442	0.091180	0.432024	轻警
汕头	0.743121	0.234030	0.080992	0.428099	中警
佛山	0.683831	0.197693	0.087633	0.398505	中警
韶关	0.592404	0.129348	0.208997	0.254059	高警
河源	0.591396	0.155429	0.220922	0.215044	高警
梅州	0.662792	0.211798	0.210864	0.240130	中警
惠州	0.778779	0.261138	0.112755	0.404887	轻警
汕尾	0.693819	0.236553	0.160403	0.296863	中警
东莞	0.737567	0.238972	0.092283	0.406312	中警
中山	0.585643	0.079459	0.103574	0.402610	高警
江门	0.596774	0.086583	0.124359	0.385832	高警
阳江	0.589658	0.107290	0.188585	0.293783	高警
湛江	0.562697	0.055388	0.163078	0.344231	高警
茂名	0.557256	0.065175	0.142083	0.349998	高警
肇庆	0.707665	0.238763	0.189041	0.279860	中警
清远	0.583664	0.117889	0.210719	0.255056	高警
潮州	0.744611	0.226815	0.115672	0.402125	中警
揭阳	0.674208	0.137734	0.124453	0.412021	中警
云浮	0.492979	0.100777	0.146551	0.245651	重警

(1) 压力系统警情格局。在压力系统上,广东省土地生态安全总体上呈粤西、粤北警情高,粤东和珠三角警情低的格局。湛江、茂名、中山、江门、云浮、阳江排名处在全省垫底位置,土地生态安全压力负荷大。粤西地区湛江自然灾害面积比重全省最大,人口自然增长率仅次于深圳,公路密度仅次于东莞、汕头,第一产业比重仅次于云浮、梅州,因而压力负荷居全省之首,警情最大;茂名、中山,农药化肥施用量大,人口密度大,自然灾害受灾面积大,也促使其压力系统警情处于全省较高水平。江门工业发达,城市化水平较高,公路密度较大,因而压力系统也面临较高警情。云浮农业经济发达,第一产业比重、单位耕地农药施用量居全省首位,面临的压力也较大。

珠三角地区中深圳、珠海、惠州、广州、东莞、肇庆,土地生态安全压力指数在全省排名依次处在前 6 位置。深圳虽然人口密度、人口自然增长率和城市化水平全省最高,但单位耕地农药负荷低,尤其是农业经济比重非常低,仅占 0.1%,在一定程度上缓解了其土地生态压力,面临的土地生态负荷全省最小;珠

海、惠州两市农业经济比重、自然灾害受灾面积比重, 农药化肥使用量均较低, 特别是珠海, 单位耕地化肥负荷全省最低、人口密度小, 压力子系统面临的警情

也相对较小; 广州、东莞两市虽然公路密度、城市化水平、人口密度均较大, 但其农业经济比重、自然灾害受灾面积比重均较低, 促使其面临的警情相对较小。

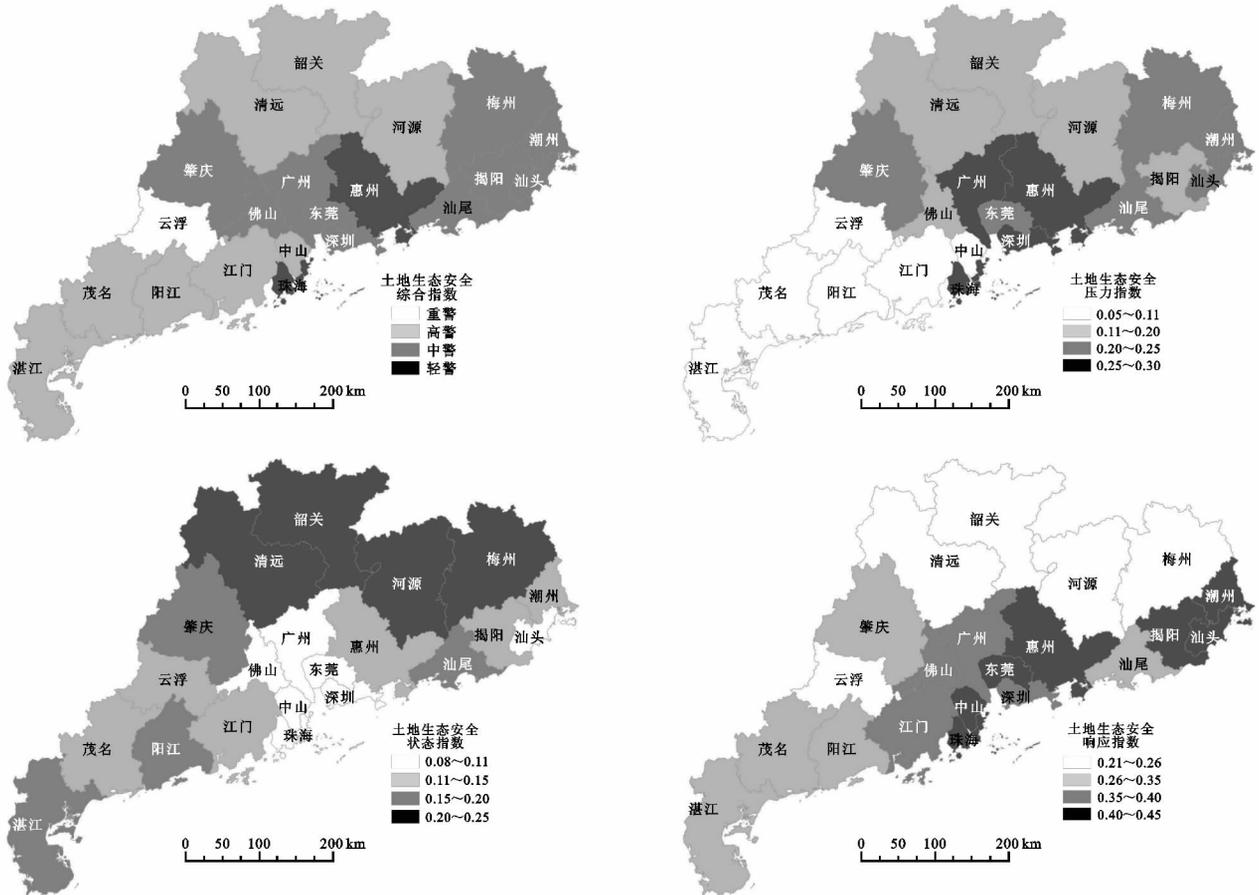


图 2 2012 年广东省土地生态安全空间分异

粤西地区汕尾、汕头、潮州、揭阳四市, 压力指数在全省排名处于中上游位置, 其中汕尾、汕头、潮州, 排名依次相对靠前, 揭阳靠后。四市中, 汕尾人口密度、自然增长率、农业化肥负荷量、公路密度均最小, 生态压力最小; 揭阳农业经济比重、自然灾害受灾面积、单位耕地化肥负荷最高, 人口密度、自然增长率也较高, 促使揭阳在四市中土地生态安全压力警情最高。

粤北地区梅州、河源、韶关、清远、云浮, 压力指数在全省排名中处于中下游位置, 其中梅州压力指数最大, 其次是河源、韶关、清远, 云浮垫底。梅州虽然农业经济比重、人口密度、公路密度较大, 但自然灾害受灾面积比重在粤北地区最小, 农药负荷相对较小等促使其在粤北地区面临的土地生态安全压力警情最小; 河源地区人口自然增长率、单位耕地化肥负荷, 农业经济比重在粤北地区中均最小, 面临土地生态安全压力相对较小; 韶关、清远两市, 在 5 市中经济发展水平相对较高, 城市化水平较高、第一产业比重较低, 但人口自然增长率最高, 使其面临一定土地生态安全压

力; 云浮农业经济比重、农药化肥负荷、自然灾害受灾面积、人口密度均最大, 其中单位耕地农药负荷在全省 21 市最大, 这些致使云浮面临较大的警情。

(2) 状态系统警情格局。在状态系统方面, 基本呈现粤北、粤西警情低, 粤东、珠三角警情高的格局。珠三角深圳、广州、佛山、珠海、东莞、中山、惠州等市处在全省垫底位置, 面临较大警情。珠三角地区由于城市化和工业化的发展, 人均耕地面积小、建成区面积比重大(特别是深圳达到将近 43.22%)、森林覆盖率低, 这些促使其土地生态安全状态系统面临较大警情, 其中深圳面临警情全省最大。粤北山区中河源、梅州、清远、韶关在全省排名依次处在前三位置, 这主要在于北部山区作为广东省重要的生态屏障和水源涵养区, 森林资源极其丰富, 森林覆盖率高, 建成区面积比重小, 人均耕地面积大, 粮食作物产量高。粤西地区阳江、湛江、茂名处在全省中上游位置, 其中尽管阳江粮食产量、人均公园绿地面积相对湛江、茂名较小, 但其耕地面积比重、建成区面积比重在三市中最小, 森林覆盖率较大, 促使阳江排名相对靠前; 茂名人

均耕地面积、建成区面积比重最小,万元GDP能耗最大,使其在粤西地区状态系统面临警情最大,同时其粮食作物产量、森林覆盖率均较高,也使其在全省排名处在中间位置。

(3) 响应系统警情格局。在响应系统上,广东省土地生态安全基本呈粤北警情高,粤西警情居中,珠三角和粤东警情低的格局。粤北地区社会经济发展水平全省最低,人均GDP、经济密度、农民人均纯收入、农业机械化水平等指标均较低,促使清远、韶关、云浮、梅州、河源在全省排名占据最后五名,其中河源因其经济密度、农民人均纯收入最低在全省排名处在垫底位置。粤西茂名、湛江、阳江排名处在中下游位置,其第三产业比重、农民人均纯收入、农业机械化水平均较低,茂名因其经济密度指数相对较高,排名在湛江、阳江之前。珠三角地区珠海、东莞、惠州、中山、佛山、广州、江门、深圳地区社会经济发展水平高,对生态环保的重视力度大,响应指数位居全省前列,其中珠海因其自然保护区面积比重全省最高,促使其位列全省第一位置,深圳、广州、佛山、中山虽然人均GDP、经济密度、农民人均纯收入等经济响应指标较高,但其自然保护区面积比重较小,导致其排名跌出了全省前五位置。粤东地区汕头、揭阳、潮州、全省排名依次为第二、三、七名,汕尾排名相对靠后,汕头、揭阳排名靠前主要得益于自然保护区面积比重较高、尽管其经济密度、第三产业比重等指标并不太高。

### 3.4 影响因素分析

依据熵权法的基本原理,如果某个指标的熵越小,就表明其指标值的变异程度越大,提供的信息量也越大,在综合评价中所起的作用也越大,其权重也应越大<sup>[30]</sup>。据此可根据土地生态安全各指标的权重大小来探讨制约其安全状况的主要因素。

从压力—状态—响应3个子系统来看,响应系统在全省土地生态安全评价指标体系中所占的权重最大,反映了人们发挥主观能动性协调人与自然和谐相处所做的努力,其应成为今后一段时期调控广东省土地生态安全的主要方向;其次是压力系统、状态系统最小,两者权重虽然相对较小,但却是促使广东省土地生态安全状况发生根本转变的主要因素。

从具体指标看,自然灾害受灾面积比重、公路密度、建成区面积、人均GDP、经济密度、农民人均纯收入、自然保护区面积比重指标权重较大(均大于0.045),是影响广东省土地生态安全状况的主要因子。自然灾害受灾面积比重权重较大,说明作为自然灾害频发地区之一,台风、暴雨洪涝、滑坡、泥石流等自然灾害对广东省土地生态安全影响较大,不容忽

视。建成区面积为状态指标,2012年广东省建成区面积为5 026.4 km<sup>2</sup>,2000年为1 763.98 km<sup>2</sup>,增长了3 263.42 km<sup>2</sup>,可见近10多年来广东建成区扩张迅速,且占用的土地大多是城郊菜地和良田沃土,要改变广东省土地生态安全状态子系统发展趋势,关键在于严格控制城市建成区无序蔓延扩张,推进建设用地集约利用。人均GDP、经济密度、农民人均纯收入均为经济响应指标,近年来这些指标均逐年攀升,在一定程度上提高了全省土地生态安全建设与维护水平,特别是农民人均纯收入的提高有助于打破资源诅咒,构造人地协调发展的良好局面。自然保护区面积比重,其指标值的增大对缓解土地生态压力、维护全省土地生态安全具有重要意义,其指标值由2000年的3.49%增长到2012年的6.7%,但与发达国家和地区相比还有一定差距。

此外,人口密度和人口自然增长率指标权重(合计约0.01)虽相对不大,但对于广东这种可适宜居住面积较小、外来人口多的地区,人口增加带来的能源与资源消耗增多,居住、交通面积的扩展,将给广东土地生态安全带来较大压力,因此人口因素也是制约广东省土地生态安全的重要因素,应给予重视。

## 4 结论与讨论

尽管土地生态安全状态子系统和压力子系统评价趋于下降,但得益于响应子系统的提升,广东省土地生态安全水平总体呈波动上升趋势,预测2013—2016年,全省土地生态安全平稳中略有上升,仍处于中警状态;2012年广东省土地生态安全基本上呈粤北粤西警情高,珠三角和粤东警情相对低的格局。

要提高广东省土地生态安全水平,结合前面所述及广东实际,可从以下5方面加以调控:

(1) 依据《广东省主体功能区规划》标准,优化开发区应将土地节约集约利用放在首位;重点开发区要将提高土地利用效益放在首位;重点生态功能区应坚持生态优先、适度开发理念;农产品主产区应将提高土地生产力、防止土地污染放在首位。

(2) 从工业化、城市化与农业现代化协同发展的长远战略入手,强化耕地保护,严格控制建设占用耕地,根本扭转人为抛荒、压损和侵占的问题<sup>[31]</sup>。

(3) 完善土地生态补偿机制。按照“资源有偿使用”和“污染者付费”原则,健全自然资源与环境补偿机制,在国家土地政策许可范围内,尽可能实施长期的土地生态补偿政策,把土地生态安全建设纳入国民经济和社会发展计划的财政预算中。对于广东省应通过多种渠道募集土地生态补偿资金,把重点生态功

能区作为重点补偿对象,提高其可持续发展能力。

(4) 合理利用土地,建立土地生态安全预警监测体系,及时监测并预报土地生态安全隐患存在的时空范围及危险程度。

(5) 推进农村地区人口城市化。目前广东省农村贫困人口大部分居住在生态环境恶劣地区,当地发展陷入了一种“环境脆弱—贫困—掠夺资源—环境退化—进一步贫困”的恶性循环发展模式,人地发展极不协调,特别是粤东和粤西地区,应制定有效政策引导这类地区的人口有序转移,推进农村人口到城市就业定居,并对进城务工的农民免费提供就业培训,增加其就业机会。

#### 参考文献:

- [1] 杨京平,卢剑波.生态安全的系统分析[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [2] 张建新,邢旭东,刘小娥.湖南土地资源可持续利用的生态安全评价[J].湖南地质,2002,21(2):119-121.
- [3] 曹新向,郭志永,雒海潮.区域土地资源持续利用的生态安全研究[J].水土保持学报,2004,18(2):192-195.
- [4] 高桂芹,韩美.区域土地资源生态安全评价:以山东省枣庄市中区为例[J].水土保持研究,2005,12(5):271-273.
- [5] 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.
- [6] 李静,李子君,吕建树.聊城市土地生态安全评价[J].水土保持通报,2011,31(2):198-202.
- [7] 罗婷文,苏墨,徐雅莉.生态环境预警研究进展及在土地领域的应用[J].现代经济信息,2011(8):202-204.
- [8] 李凤全,吴樟荣.半干旱地区土地盐碱化预警研究:以吉林省西部土地盐碱化预警为例[J].水土保持通报,2002,22(1):57-59.
- [9] 陈浩,周金星,陆中臣,等.荒漠化地区生态安全评价:以首都圈怀来县为例[J].水土保持学报,2003,17(1):58-62.
- [10] 葛向东,彭补拙,濮励杰,等.耕地总量动态平衡的监测和预警研究[J].自然资源学报,2002,17(1):35-41.
- [11] 李新举,胡振琪,刘宁,等.基于土地利用和覆盖变化的黄河三角洲土壤质量预警研究[J].农业工程学报,2006,22(8):32-37.
- [12] 张军以,苏维词,张凤全.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.
- [13] 孟兆鑫,李春艳,邓玉林.沱江流域生态安全预警及其生态调控对策[J].生态与农村环境学报,2009,25(2):1-8.
- [14] 张凤太,苏维词,周继霞.基于熵权灰色关联分析在城市生态安全评价[J].生态学杂志,2008,27(7):1249-1254.
- [15] 杜巧玲,许学工,李海涛,等.黑河中下游绿洲生态安全变化分析[J].北京大学学报:自然科学版,2005,41(2):273-281.
- [16] 邓爱珍,陈美球,林建平.鄱阳湖区土地生态安全综合评价[J].江西农业大学学报,2006,28(5):787-792.
- [17] 鲍艳,胡振琪,柏玉,等.主成分聚类分析在土地利用生态安全评价中的应用[J].农业工程学报,2006,22(8):87-90.
- [18] 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):234-238.
- [19] 张虹波,刘黎明,张军连,等.区域土地资源生态安全评价的物元模型构建及应用[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2007,33(2):222-229.
- [20] 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.
- [21] 高杨,黄华梅,吴志峰.基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价[J].生态学报,2010,30(21):5894-5903.
- [22] 李玲,侯淑涛,赵悦,等.基于PSR模型的河南省土地生态安全评价及预测[J].水土保持研究,2014,21(1):188-192.
- [23] 王鹏,唐丽,田亚平,等.湖南省土地资源生态安全评价[J].资源开发与市场,2012,28(3):257-261.
- [24] 周飞,郭良珍,陈士银,等.湛江市土地资源生态安全评价与限制因素[J].水土保持研究,2010,17(5):202-206.
- [25] Haykin S. Neural networks: A Comprehensive Foundation[M]. 2nd edition. New York: Prentice Hall, 1998.
- [26] 陈泽淮,张尧,武志刚.RBF神经网络在中长期负荷预测中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(1):15-19.
- [27] 唐启义,冯明光.DPS数据处理系统:实验设计、统计分析及模型优化[M].北京:科学出版社,2006.
- [28] 左伟,王桥,王文杰,等.区域生态安全评价指标与标准[J].地理学与国土研究,2002,18(1):67-71.
- [29] 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,2008,43(6):784-789.
- [30] 贾艳红,赵军,南忠仁,等.熵权法在草原生态安全评价研究中的应用:以甘肃牧区为例[J].干旱区资源与环境,2007,21(1):17-21.
- [31] 刘彦随.耕地保护要杜绝“监守自盗”[N].人民日报,2011-11-21(9).