

基于 RBF 神经网络模型的土地生态安全预警

——以甘肃省张掖市为例

陈英, 孔喆, 路正, 王东, 邱晓娜, 闵文婧, 杨润慈
(甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 以张掖市为研究区域, 在借鉴国内土地生态安全研究成果的基础上, 依据 PSR 模型, 结合 2001—2012 年土地利用的相关数据, 建立土地生态安全预警指标体系。运用 RBF 神经网络模型对张掖市 2013—2017 年土地生态安全演变趋势进行预测, 并结合预警指数和警度标准对 2001—2017 年的安全警况进行分析。结果表明: 2001—2012 年张掖市土地生态安全的压力系统的警度呈波动上升趋势, 状态系统和响应系统的警度呈下降趋势, 2013—2017 年的压力系统将逐步由“中警”转变为“重警”, 状态系统将基本维持在“中警”水平, 响应系统将处于“无警”状态; 2001—2017 年, 张掖市土地生态安全警度呈略有下降态势, 2013—2017 年的预警指数将处于 0.46 左右, 警度将处于“中警”状态。

关键词: 土地生态安全; 预警; RBF 神经网络; PSR 模型; 张掖市
中图分类号: S181; F301.2 **文献标志码:** A

Land ecological security early-warning based on RBF neural network

—— A case of Zhangye in Gansu province

CHEN Ying, KONG Zhe, LU Zheng, WANG Dong, QIU Xiao-na, MIN Wen-jing, YANG Run-ci
(College of Resources and Environment Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: For the target area of Zhangye area for research, the land ecological security early warning index system is established based on PSR model and the relevant data of land use from 2001 to 2012. Using the RBF neural network model to Zhangye from 2013 to 2017, we predicted the evolution trend of land ecological security in combination with the analysis of the early warning alert degree of the index and standard for 2001—2017 safety warning condition. The results showed that the land ecological security alert degree of the pressure system for Zhangye from 2001 to 2012 exhibited a tendency of fluctuations rise and alert degree of the state system and response system is on the decline, and the 2013—2017 pressure system shows the pattern of “moderate warning” to “severe warning”, the state system will be maintained in the “moderate warning” in the level, the response system will be in a state of “no warning”. In 2001—2017, Zhangye alert degree of the land ecological security will be slightly decreasing, with early warning index in 2013—2017 being about 0.46 and warning degrees in a state of “moderate warning”.

Keywords: land ecological security; warning; RBF neural network; PSR model; Zhangye City

土地生态安全源于近年来所兴起的“生态安全”研究^[1]。生态安全是 21 世纪人类社会可持续发展所面临的一个新主题^[2], 是由资源安全、生物安全、环境安全等多方面组成的安全体系, 土地资源是人类社会存在和发展的最基本条件。土地生态安全是指人类赖以生存和发展的土地所处的生态环境, 处于一种不受或少受威胁与破坏的健康、平衡状态^[3]。土地的生态安全状况是决定一个国家安全程度的重要因素, 但国内土地生态安全及其评价研究还处于起步阶段。目前关于生态脆弱区土地资源生态安全评价的研究, 主要涉及到黄土高原生态脆弱区^[4-5]和北方农牧交错生态脆弱区^[6], 而对西北干旱区尤其是张掖市的研究还比较少。

目前, 国内外土地生态安全的预警方法主要有模糊综合评判法、层次分析评价法、灰色关联法、主成分投影法、系统聚类分析法、综合指数法、土地承

收稿日期: 2016-04-12
基金项目: 国家自然科学基金(71263003)
作者简介: 陈英(1969—), 男, 甘肃武威人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土地资源管理。E-mail: chenying@gsau.edu.cn。
通信作者: 孔喆(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为土地资产管理。E-mail: 751242399@qq.com。

承载力分析法、生态模型方法、生态足迹法、景观生态学方法等^[7-9]。这些方法大都采用的是线性或指数模型等回归统计进行评价,但影响土地生态安全的各因素关系非常复杂,往往是非线性的,通过某种确定的数学模型来准确描述是很困难的。而径向基函数(Radial Basis Function,简称 RBF)神经网络具有逼近能力强、网络结构简单、学习速度快等优点,可以任意精度逼近任意的非线性函数^[10],对提高预测的准确性具有重要意义,已广泛运用于短时交通量预测、地下水位预测、需水量预测、中长期负荷预测等诸多领域,并取得了很好的效果,但其在生态安全预警领域的应用仍鲜见报道。基于此背景,以张掖市为例,对其土地生态安全发展趋势进行预测预警分析,以期对张掖市土地生态安全的有效调控与管理提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

张掖市地处河西走廊中段,东临巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,按照地形地貌特征可分为祁连山区、走廊平原区、北部山区。全市国土总面积 4.2 万 km²,耕地面积 25.3 万 hm²,森林面积 44.9 万 hm²,森林覆盖率 10.71%。区域多年平均气温 7.6℃,降水量 110 mm,蒸发量 2002.5 mm,为典型的大陆性温带干旱气候,生态环境脆弱。近些年来随着人口的快速增长和城市化、工业化进程的推进,张掖市的生态环境遭到了极大的破坏。水土流失、土地沙化、土地污染、湿地和优质土地的锐减以及土壤盐渍化等土地退化问题已直接和间接导致了河流断流、湖泊淤积、土地生产力降低、森林功能衰退、生物多样性减少等土地生态问题。而所有的这一切也都直接或间接地与土地资源不合理开发利用密切相关,土地利用结构不尽合理,城郊农业化肥农药的大量施用和工业三废的超负荷排放,环保和技术投入水平较低等导致土地集约利用水平不高,土地生态环境恶劣。

1.2 数据来源

研究数据主要来源于 2001—2012 年《中国城市统计年鉴》^[11]、《甘肃发展年鉴》^[12]及 2001—2012 年《张掖市环境状况公报》^[13]、《张掖市国民经济和社会发展统计公报》^[14]和张掖市土地利用结构现状数据。

2 研究方法

2.1 层次分析法与熵权法

土地生态安全具有系统性、复杂性等特点,其评价指标体系是一个融合人口、经济、资源、环境和社

会等方面的复合系统^[15]。土地生态安全预警作为土地生态安全研究的重要内容之一,其指标的选择不仅要考虑土地生态现状,还要反映对土地生态安全有潜在影响的因素和人类活动的影响。该研究基于 PSR 模型,根据指标选取的科学性、完整性、相对独立性、可操作性等原则,参考相关研究成果^[16],结合张掖市实际,考虑数据的可获得性,构建张掖市土地生态安全预警指标体系,包括目标层、准则层、因素层、指标层、权重和指标性质 6 个层次,指标体系如表 1 所示。

其中“压力”是指造成土地生态安全恶化的原因,包括自然原因和人为原因,从人口压力、社会经济压力、环境压力、自然压力等方面构建;“状态”即土地生态安全在上述压力下所处的状况,从资源状态、环境状态、利用状态等方面构建;“响应”即人们在促进土地生态可持续发展进程中所采取的对策措施,从经济响应、环境响应、社会响应等方面构建。P-S-R 模型能反映人类社会与生态系统的关系,将自然资源、社会经济有效地联系起来,因此实用性较强^[17-18]。

指标权重反映了指标对所研究问题的重要程度,对区域土地生态安全预警结果有重要影响。目前,存在的指标权重确定方法总体可分为客观赋权法和主观赋权法,客观赋权法能够根据已有数据较为客观地反映指标权重,所以本文采用熵权法来确定土地生态安全预警指标权重。

① 对原始数据进行无量纲化处理,得到标准化的指标值。正向指标值进行标准化的计算见公式(1):

$$X_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (1)$$

对于越小越安全的负向生态安全指标,计算见公式(2):

$$Y_{ij} = (X_{j\max} - X_{ij}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (2)$$

式中, X_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的实际值; Y_{ij} 为第 i 年第 j 指标的标准化值; $X_{j\min}$ 为第 j 项指标的最小值; $X_{j\max}$ 为第 j 项指标的最大值。

② 熵权法确定指标权重如下:定义 f_{ij} 为指标标准化值占总标准化值的比重,则有公式(3):

$$f_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (3)$$

令 e_j 为第 j 项指标的熵值,则有公式(4):

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m (f_{ij} \ln f_{ij}), (k = 1/\ln m; \text{当 } f_{ij} = 0 \text{ 时,令 } f_{ij} \ln f_{ij} = 0) \quad (4)$$

计算第 j 项指标的熵权 w_j ,即公式(5):

$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j), (0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^m w_j = 1)$

由此可得出各指标权重,如表 1 所示。

(5)

表 1 张掖市土地生态安全预警指标体系

Table 1 Index system of land ecological security early warning in Zhangye City

目标层 Target layer	准则层 Rule layer	因素层 Factors layer	指标层 Index layer	权重 Weight	指标性质 Index properties
A 土地生态安全预警 Land ecological security early warning	B ₁ 压力 Pressure	C ₁ 社会经济压力 Social and economic pressure	D ₁ 人口密度/(人·km ⁻²) Population density/(people·km ⁻²)	0.028	-
			D ₂ 人口自然增长率/% The natural population growth rate	0.024	-
			D ₃ 城市化水平/% Urbanization level	0.034	-
			D ₄ 农业经济比重/% Agricultural economy proportion	0.106	-
		C ₂ 环境压力 Environmental pressure	D ₅ 单位耕地地膜使用量/(kg·hm ⁻²) Unit farmland mulch usage	0.042	-
			D ₆ 单位耕地农药使用量/(kg·hm ⁻²) Unit farmland pesticides	0.036	-
			D ₇ 单位耕地化肥使用量/(kg·hm ⁻²) Unit farmland fertilizer usage	0.056	-
			D ₈ 自然灾害受灾面积比重/% Natural disasters in the affected area	0.123	-
	B ₂ 状态 State	C ₃ 土地资源状态 Land resources state	D ₉ 人均建设用地面积/(m ² ·人 ⁻¹) Per capita construction land area/(m ² ·person ⁻¹)	0.036	-
			D ₁₀ 人均耕地面积/(m ² ·人 ⁻¹) Per capita arable land area/(m ² ·person ⁻¹)	0.034	+
		C ₄ 土地环境状态 Land environment state	D ₁₁ 建成区绿化覆盖率/% Built up area greening coverage	0.038	+
			D ₁₂ 森林覆盖率/% Forest coverage rate	0.051	+
		C ₅ 土地利用状态 Land utilization state	D ₁₃ 土地利用效率/% Land utilization rate	0.056	+
			D ₁₄ 人均粮食占有量/(kg·人 ⁻¹) Per capita occupancy of grain/(kg·person ⁻¹)	0.039	+
	B ₃ 响应 Response	C ₆ 经济响应 Economic response	D ₁₅ 人均 GDP/(元·人 ⁻¹) GDP per capita/(yuan·person ⁻¹)	0.037	+
			D ₁₆ 第三产业比重/% Tertiary industry proportion	0.051	+
		C ₇ 社会响应 Social response	D ₁₇ 农业机械化水平/(kW·hm ⁻²) Agricultural mechanization level	0.061	+
			D ₁₈ 环保投入占 GDP 比重/% Environmental protection into a share of GDP	0.044	+
		C ₈ 环境响应 Environmental response	D ₁₉ 自然保护区面积比重/% Nature reserve area proportion	0.043	+
			D ₂₀ “三废”治理率/% “Three wastes” treatment rate	0.059	+

注:指标性质中的“+”号为正指标,指标值越大,土地生态越安全,警度越小;“-”号为负指标,指标越大,土地生态安全问题越严重;指标权重的计算见 2.2.

Note: The properties of indicators “+” is positive index, index is larger, the more land ecological security, the smaller the warning degree; “-” is negative index, index is larger, land ecological security issues more serious; the calculation of index weight as 2.2.

2.2 RBF 神经网络

径向基函数(RBF)神经网络是以函数逼近理论为基础而构成的一类前向网络。能够以任意精度逼近任意有限函数,且相比于 BP 神经网络具有收敛速度快、不易陷入局部极小点、鲁棒性好和易于实现等优点,特别适用于预测非线性时间序列,进而得到广泛地应用。RBF 神经网络包括输入层、中间层和输出层 3 部分。网络具有 n 个输入节点, p 个隐节点, m 个输出节点,隐节点的激活函数为“基函数”,一般选用 Green 函数,输入层到中间层的权值不变,而中间层到输出层的突触权值是可调整的。

RBF 神经网络最常用的基函数是高斯函数,即对于任意的输入向量 $x \in R_n$ (R_n 为输入样本集),有: $R_i(x) = \exp[-||x - C_i||^2/(2a_i^2)]$, $i = 1, 2, \cdots, r$; 式中: $R_i(x)$ 为隐含层第 i 个神经元节点的输出; x 为 n 维输入向量; C_i 为第 i 个隐节点高斯函数的中心点; a_i 为第 i 个隐节点的归一化参数; r 为隐含层节点数^[10,19]。

2.3 预警指数的计算

其公式为:

$$E_p = \sum_{j=1}^m w_j y_{ij}; E = \sum_{p=1}^k w_p E_p$$

表 2 张掖市土地生态安全警度及指示灯标准

Table 2 The warning degree of land ecological security and the standard of indicating lamp in Zhangye City

项目 Item	警度区间 Warning degree extent				
	[0,0.2]	[0.2,0.4]	[0.4,0.6]	[0.6,0.8]	[0.8,1.0]
警度 Warning degree	无警 No warning	轻警 Light warning	中警 Moderate warning	重警 Severe warning	巨警 Giant warning
指示灯 Indicator light	绿灯 Green light	蓝灯 Blue light	黄灯 Yellow light	橙灯 Orange light	红灯 Red light

3 结果与分析

运用前述预警方法计算得 2001—2012 年张掖市土地生态安全各子系统的预警指数(图 2),将计算的各子系统预警指数作为预测基础数据,按年限为时间序列建立预测模型,采用迭代一步滚动预测方式对 2013—2017 年张掖市土地生态安全各子系统的发展趋势进行预测,预测步长取 1 步,即相当于 1 年。由于滚动预测中输入层的神经元数可确定为多个值,一般是根据学习样本数量的多少,采用试验法确定^[20],本研究在对张掖市土地生态安全各子系统分别选择 3、4、5 等值进行大量试验的基础上,综合确定各系统的最佳输入层神经元数为 4(即用各子系统前 4 年的预警指数预测其第 5 年的预警指

式中, E_p ($p = 1, 2, 3$) 为各子系统的预警指数; E 为土地生态安全总预警指数; w_p 为 p 系统的权重。 E_p 和 E 均介于 0 ~ 1 之间,其值越大,表明土地生态安全警度越严重。

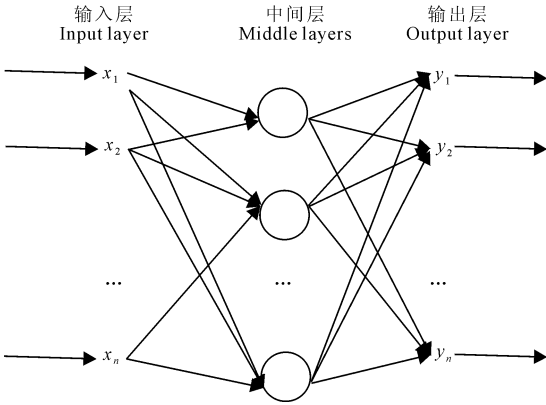


图 1 RBF 神经网络结构

Fig.1 Structure of RBF neural network

2.4 警度的确定

按照等分的原理,依据预警指数将张掖市土地生态安全警度分为 5 等,确定其警度及指示灯划分标准如表 2。

数,依此类推),输出层神经元数为 1(即预测目标年各子系统的预警指数)。

在此基础上,运用 MatlabR2010a 应用程序的 newrb 工具箱^[21]设计程序,用 2001—2011 年张掖市土地生态安全各子系统的预警指数构造输入样本集,以 2001—2012 年 12 个年份张掖市土地生态安全各子系统的预警指数作为期望输出值,构造 RBF 网络模型进行网络学习,学习结果显示张掖市土地生态安全各子系统的 R 均远大于 0.95, $RMSE$ 则小于 0.4,说明模型学习效果好,可信度高,可用其对张掖市土地生态安全发展趋势进行预测。据此预测得 2013—2017 年张掖市土地生态安全各子系统的变化趋势,结果如图 3,并由此计算得张掖市土地生态安全预警总指数。

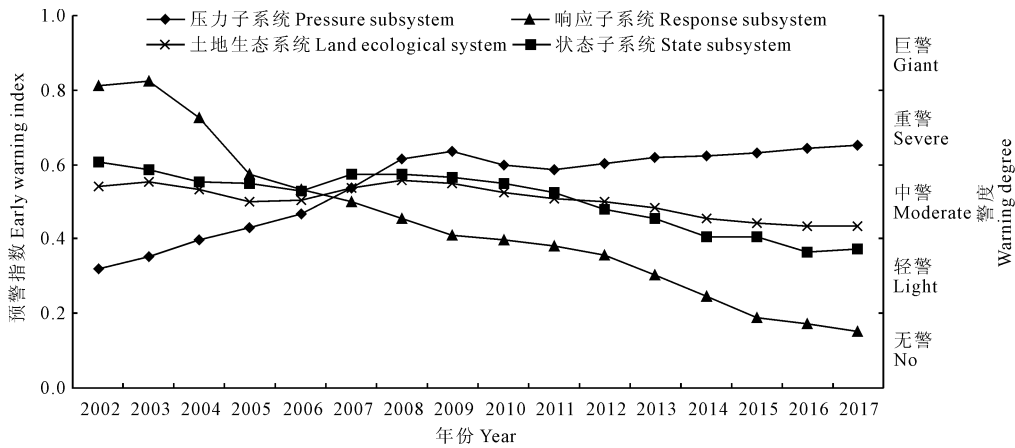


图 2 张掖市土地生态安全预警指数及警度

Fig.2 The early warning index and warning degree of land ecological security in Zhangye City

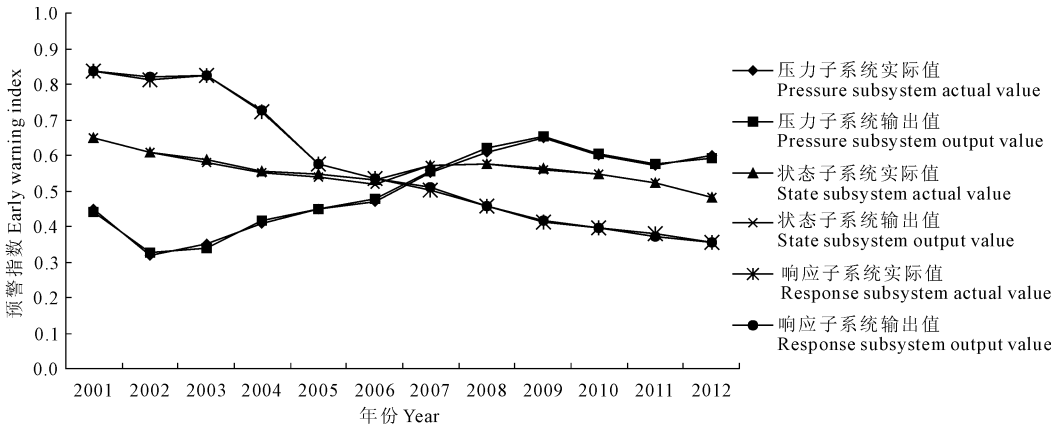


图 3 张掖市土地生态安全预警各系统 RBF 学习情况

Fig.3 RBF study situation of each land ecological security early-warning subsystem in Zhangye City

3.1 各子系统生态安全警况分析

3.1.1 压力系统生态安全警况分析 2001—2012 年,张掖市土地生态安全压力系统的预警指数整体呈上升趋势,警度由“轻警”上升到“中警”再到“重警”,指示灯则由“蓝灯”逐步变至“黄灯”再至“橙灯”(表 3)。不过大致可以分为两个阶段:2001—2009 年为迅速上升期,进入二十一世纪以来,张掖市逐步进入工业化和城市化的快速发展时期,农业经济水平随之得到快速提高,农药、化肥和地膜使用量急剧增加,另外建设占用耕地日益严重,都导致了农业资源的破坏。耕地面临蚕食和面源污染的双重压力,使得土地生态负荷加大,警度由“轻警”迅速上升到“中警”,逐步靠近“重警”。2010—2012 年为波动上升期,较前几年化肥、农药以及地膜使用量等趋于稳定,随着农业经济比重的下降和农民应对自然灾害能力的增强,近几年人们所面对的土地生态压力有所平缓,但不会降低,预警指数基本保持在 0.60 左右。通过对 2013—2017 年的预测可知,其预警指数

会在前三年的基础上波动上升,警度会保持在“重警”,指示灯为“橙灯”。因为在未来几年,工业化和城市化水平会稳步提高,人口密度及人口增长率也不会降低,人地矛盾日益突出,土地生态安全的维护压力只会越来越大。

3.1.2 状态系统生态安全警况分析 2001—2012 年,张掖市土地生态安全状态系统的预警指数整体呈波动下降趋势,警度由 2001—2002 年的“重警”逐渐过渡到“中警”,指示灯也由“橙灯”转变为“黄灯”(表 3),虽然近几年警度都处于“中警”格局,但是预警指数总体在下降。2001 年以来,虽然张掖市人均建设面积在急剧增加,大量农田免不了被占用,但是随着农业经济水平的提高、农业科技的发展,大量未利用地得到了很好的开发利用,人均耕地面积不但没有减少反而略有逐步增加的趋势。此外,近年来张掖市政府和人民的生态意识和资源意识增强,建成区绿化覆盖率由 2001 年的 20.20% 上升到 2012 年的 41.25%,增加了一倍;森林覆盖率和土地利用

率也呈现稳步提高的趋势,使得张掖市土地生态安全的状态系统预警指数波动下降。未来几年,十八大从新的历史起点出发,做出了“大力推荐生态文明建设”的重大战略决策以后,张掖市政府在土地利用规划和城市规划过程中会更加重视土地利用、森林利用率和绿化覆盖率的提高。根据预测结果可知,2013—2017 年其预警指数将继续波动下降,警度将由“中警”逐渐过渡到“轻警”,指示灯也由“黄灯”逐渐转变为“蓝灯”。

3.1.3 响应系统生态安全警况分析 2001—2012 年张掖市土地生态安全响应系统预警指数呈明显下降态势。由 2001 年的 0.837 下降到 2012 年的 0.355,警度也由“巨警”逐渐下降至“轻警”状态,指示灯则由“红灯”转变为“蓝灯”(表 3)。进入 21 世纪以来,尤其是中国加入世界贸易组织以来,中国经济得到突飞猛进的发展,在这个大的背景下,中国的西部城市尤其是农业较为发达的张掖市经济水平也得到了迅速提高。张掖市人均 GDP 由 2001 年的 4 986 元·人⁻¹提高至 2012 年的 24 235 元·人⁻¹,十二年时间增加了将近原来的四倍之多;环保投入占 GDP 比重也由 2001 年的 1.08% 上升到 2012 年的 2.16%;此外,农业机械化水平和“三废”治理率也相应提高。这些都对全市土地生态安全响应系统的预警指数持续下降做出了贡献。未来几年,人均 GDP 会持续增长,生态环保意识日益增强,农业机械化水平也在不断提高都使得张掖市响应系统预警指数会像预测的那样持续下降。

3.2 土地生态系统总体安全警况分析

2001—2012 年,张掖市土地生态安全警度维持在“中警”水平,指示灯则处于“黄灯”状态(表 3)。其中 2001—2008 年上下波动,涨幅不大,2008 年预警指数达到最大值 0.559,之后到 2012 年呈现下降态势,与这几年状态系统预警指数变化趋势基本一致,说明状态系统在全市土地生态安全格局变化中具有重要地位。2008 年以来,土地生态保护的重要性日益凸显,工业“三废”治理率不断提高,环保投入占 GDP 比重持续增加,自然保护区面积也有所扩大,使得土地生态安全状况有所好转,预警指数略有下降,但幅度有限,仍处于 0.499~0.559 之间。

按照这种趋势发展,根据预警结果可知,2013—2017 年,全市土地生态安全的总体警度仍将基本保持这一发展态势,变化幅度有限,预警指数将保持在 0.46 左右,基本维持在“中警”水平,指示灯处于“黄灯”状态(表 3),需要采取相应措施予以改善。

表 3 2001—2017 年张掖市土地生态安全警度指示灯状况
Table 3 Situation of warning degree' indicator lamp of land ecological security in Zhangye in 2001—2017

年份 Year	土地生态安全子系统 Land ecological security subsystem			土地生态系统 Land ecological system
	压力系统 Pressure system	状态系统 State system	响应系统 Response system	
2001	◆	★	●	▲
2002	◆	★	●	▲
2003	◆	▲	●	▲
2004	◆	▲	★	▲
2005	▲	▲	◆	▲
2006	▲	▲	◆	▲
2007	▲	▲	◆	▲
2008	★	▲	◆	▲
2009	★	▲	◆	▲
2010	★	▲	◆	▲
2011	★	▲	◆	▲
2012	★	▲	◆	▲
2013	★	▲	◆	▲
2014	★	▲	◆	▲
2015	★	▲	■	▲
2016	★	◆	■	▲
2017	★	◆	■	▲

注:●代表红灯,★代表橙灯,▲代表黄灯,◆代表蓝灯,■代表绿灯。

Note: ●on behalf of the red light, ★on behalf of orange light, ▲ on behalf of the yellow light, ◆on behalf of blue light, ■on behalf of the green light.

4 讨 论

张掖市作为河西走廊的重要生态屏障,属典型的生态脆弱区,土地生态问题显得尤为重要。土地生态安全状况评价结果显示 2001—2012 年,张掖市土地生态安全压力系统的预警指数整体呈上升趋势,状态系统的预警指数整体呈波动下降趋势,响应系统预警指数呈明显下降态势,土地生态安全警度维持在“中警”水平。研究结果与实际情况相符,与刘凌冰^[22]的“张掖市土地生态安全处于敏感级”的研究结论吻合,而且文章对 2013—2017 年张掖市土地生态安全变化趋势的预测也通过了效度检验,证明了该方法具有一定的现实意义。研究仅在区域尺度上从生态安全的视角对研究区土地生态安全状况进行了预测研究,但区域土地生态安全受多方面因素的影响,文章所构建的指标体系还存在一定的局限性,有待进一步完善。

5 结 论

1) 运用 RBF 神经网络模型对张掖市土地生态安全各系统的发展态势进行学习模拟与预测,结果表明,RBF 模型拟合精度高,预测结果符合张掖市实际情况,能够基本反映张掖市土地生态安全的整体发展趋势,说明 RBF 神经网络模型是土地生态安全预测预警的有效方法之一。

2) 近十几年来,张掖市土地生态安全发展态势未得到根本性转变,这与其城市化快速扩张、工业化迅速发展、人口快速增长、产业结构不优、土地利用方式不合理等因素有重要联系。今后一段时期,在“两型社会”纵深推进、粮食安全问题日趋严峻、新型城市化和新型工业化全面推进及生态重要性日趋明显的形势下,积极采取应对措施缓解全市土地生态压力,推进人地协调和土地可持续利用,应成为张掖市发展中重点关注的内容之一。

3) 改善张掖市土地生态安全状况,需要加大资金投入力度,加快生态建设,牢固树立土地生态安全的观念,做好宣传教育工作,使保护土地生态安全的观念深入人心;控制人口增长,缓解人地矛盾,做到人与土地资源的协调共处,为实现土地资源生态安全的可持续发展打下坚实的基础。

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):829-834.

[2] 李进涛,李贻学,巩玉玲.基于 IDRISI 的山东省土地生态安全评价研究[J].中国人口·资源与环境,2014,(S3):190-193.

[3] 张 利,陈 影,王树涛,等.滨海快速城市化地区土地生态安全评价与预警——以曹妃甸新区为例[J].应用生态学报,2015,26(8):1-10.

[4] 刘世梁,郭旭东,连 纲,等.黄土高原典型脆弱区生态安全多尺度评价[J].应用生态学报,2007,18(7):1544-1559.

[5] 杨倩倩,陈 英,金生霞,等.西北干旱区土地资源生态安全评价——以甘肃省古浪县为例[J].干旱地区农业研究,2012,30

(4):195-200.

[6] 许月卿,赵菲菲,孙丕苓.生态脆弱区土地生态安全动态评价——以河北省张家口市为例[J].水土保持通报,2015,35(5):232-238.

[7] 陈志凡,李勤奋,赵 烨.基于熵权的模糊物元模型在农用地土壤健康评价中的应用[J].中国土地科学,2008,22(11):31-37.

[8] Shilling Su, Xia Chen, Stephen D, et al. Integrative fuzzy set pair model for land ecological security assessment: a case study of Xiaolangdi Reservoir Region, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010,24(5):639-647.

[9] Same Dean H. JCAHO security risk assessment tools[J]. Journal of Healthcare Protection Management, 2007,23(1):1-6.

[10] 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,2012,10(67):1411-1422.

[11] 国家统计局城市社会经济调查司.中国城市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2002—2013.

[12] 甘肃省统计局.甘肃发展年鉴[M].北京:中国统计出版社,2002—2013.

[13] 张掖市环境保护局.张掖市环境状况公报[M].北京:中国统计出版社,2002—2013.

[14] 张掖市统计局.张掖市国民经济和社会发展统计公报[M].北京:中国统计出版社,2002—2013.

[15] 吴冠岑,牛 星.土地生态安全预警的惩罚型变权评价模型及应用[J].资源科学,2010,32(5):992-999.

[16] 王惠飞,任志远,薛 亮,等.土地生态安全动态评价研究——以西安市长安区为例[J].统计与信息论坛,2008,23(8):22-26.

[17] 杜艳春,姜 畔,毛建速.基于 P-S-R 模型的焦作市生态安全评价[J].环境科学与进步,2011,34(6G):280-285.

[18] 王 鹏,况福民,邓育武,等.基于 P-S-R 模型的湘南红壤丘陵区土地生态安全研究——以衡阳市为例[J].华南大学学报(社会科学版),2013,14(3):5-10.

[19] 舒帮荣,刘友兆,徐进亮,等.基于 BP-ANN 的生态安全预警研究——以苏州市为例[J].长江流域资源与环境,2010,19(2):1080-1085.

[20] 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.

[21] 闻 新.MATLAB 神经网络应用设计[M].北京:科学出版社,2001.

[22] 刘凌冰.甘肃省土地生态安全评价研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.