

基于BP-ANN模型的农村土地生态安全评价及影响因素分析

——以重庆市丰都县为例

杨人豪, 杨庆媛, 曾黎, 陈伊多

(西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要:针对重庆市丰都县土地生态敏感特性和区域实际情况,将土地生态安全评价指标值作为输入,土地生态安全评价得分作为输出,基于多层反向传播人工神经网络(BP-ANN)构建了具有15个隐含层神经元的3层土地生态安全评价模型,通过Matlab R2012b随机选取2013年317个总样本中的200个样本,将其中的70%,30%分别作为网络的训练样本和检验样本用于训练及检验BP-ANN,将剩余117个样本测试网络,再将2014年317个村的相关指标值代入人工神经网络通过模式识别进行评价;在此基础上分析丰都县农村土地生态安全状况的空间分异现象,并使用因子分析法结合多元线性回归分析法研究影响丰都县农村土地生态安全的因素。结果表明:(1)117个测试样本中相对误差小于5%的样本占98.21%,BP-ANN模型精度良好;(2)2014年丰都县各村土地生态安全评分为40.47~55.73,平均得分49.19,土地生态安全状况处于中等偏下水平,空间上土地生态安全评分全局Moran's I指数为0.34,空间呈自相关性,县域内西北部的农村土地生态状况较好;(3)影响丰都县农村土地生态安全的因素按照影响程度大小依次为:植被生物条件、土壤条件、景观多样性、生态建设与发展协调程度、降水条件、水域条件。BP-ANN模型一定程度上克服了传统评价过程中主观因素导致的误差,精确的评价结果对区域土地生态保护提供指导。

关键词:土地生态安全;评价;BP-ANN模型;农村土地;丰都县

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0206-08

Evaluation on Ecological Security and Analysis of Influence Factors of Rural Land Based on BP-ANN Model

—A Case Study of Fengdu County in Chongqing

YANG Renhao, YANG Qingyuan, ZENG Li, CHEN Yiduo

(School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Aiming at ecological sensitive characteristic of rural land and the real regional situation in Fengdu County, a comprehensive assessment model of rural land ecological security based on Back-Propagation Artificial Neural Network (BP-ANN) was set up, which contained 15 cryptic layer nodes and 3 layers. The 70% of 200 samples which randomly selected from 317 samples in 2013 were chosen as the training samples, and the 30% of 200 samples were regarded as examining samples. We tested the 117 test samples using this model, evaluated the rural land ecological security of Fengdu County in 2014, and analyzed its spatial distribution, finally extracted the main factors that affected the rural land ecological security with factor analysis and multiple linear regression. The results showed that: (1) the test samples with the relative error less than 5% of all the 117 test samples accounted for 98.21%, which indicated that the accuracy of BP-ANN model is good; (2) the score of rural land ecological security of Fengdu County in 2014 ranged from 40.47 to 55.73, with a mean value of 49.19; the Global Moran's I index of rural land ecological security was 0.34, and the space was the autocorrelation; the rural land ecological security status of the northwest region was better than the southeast region; (3) factors influencing the rural land ecological security situation in Fengdu County can be sorted as: biomass and vegetation, soil, landscape diversity, ecological construction and devel-

opment coordination degree, rainfall, water area. BP-ANN model can partly overcome the error caused by the subjective judgment in the traditional evaluation process, and the accurate evaluation results can also provide guidance to the regional land ecological protection.

Keywords: land ecological security; evaluation; BP-ANN model; rural land; Fengdu County

生态安全是区域经济社会发展的重要前提^[1],生态安全评价则是区域生态文明建设的基础性工作。随着人类社会对土地使用强度增加,土地污染、土壤退化和水土流失的现象不断增多,人地矛盾突显,土地生态安全成为生态安全研究领域中的重点和热点。土地自然条件、土地利用方式和区域社会经济条件等因素从不同方面不同程度地影响着土地生态这一承载有限的系统^[2]。利用科学合理的标准和方法评价土地生态安全,对于探索如何促进土地生态可持续发展和保护区域生态安全有重要意义。

土地生态安全问题被国内外学者广泛关注。世界银行^[3]在《土地质量指标》研究项目中率先提出“压力—状态—响应”(P-S-R)框架用于土地生态质量的评价。Jeffery^[4]从农业生产对于土地利用的影响程度角度评价土地生态安全;Herrmann等^[5]运用系统工程方法研究发现,多种自然条件可作为土地生态约束条件来优化乡村土地利用结构;Allan等^[6]在评价土地生态基础上利用GIS缓冲区分析优化小流域土地生态利用格局。国内学者主要研究土地生态安全的评价框架模型、评价方法、条件模拟及其区域实证。谢余初等^[7]利用P-S-R模型构建了甘肃白龙江流域的景观生态安全指标体系并探讨其时空变化特征;徐美等^[8]运用DPSIR模型对湖南省的土地生态状况进行测度;张玉泽等^[9]通过DPSR模型构建山东省生态安全预警机制。张虹波^[10]和鲍艳^[11]等分别利用层次分析法、主成分分析法建立和调整土地生态评价指标体系;黄海等^[12]利用生态足迹法分析重庆市合川区的土地生态情况,并计算其土地生态压力指数;肖笃宁等^[13]从景观生态学的视角解析应该如何评价和保护土地生态系统;吴晓等^[14]利用灰色关联法对重庆市巫山县的土地生态状况进行动态评价。林彰平等^[15]对东北农牧交错带土地利用生态安全模式进行案例研究和条件模拟。土地生态安全评价实证区域囊括了国家^[16]、省域^[17]、市域^[18]、县域^[19]、镇域^[20]等多种尺度。现有研究中较缺乏利用人工神经网络模型测度区域土地生态安全状况,且村域评价尺度研究较少。本文结合丰都县土地生态环境和区域经济社会特点,尝试以村为研究单元运用可以模拟人脑神经元计算的非线性动力学系统BP-ANN模型评价区域土地生态安全状况。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

作为长江上游天然生态屏障的丰都县地处重庆市中部,地理位置为 $107^{\circ}28'03''$ — $108^{\circ}12'37''$ E, $29^{\circ}33'18''$ — $30^{\circ}16'25''$ N,位于生态系统敏感性显著的长江三峡水库消落带,是渝东北生态涵养区的重要组成部分。丰都县处于西南丘陵山区地带,以山地地貌为主,山区面积超过60%,整体植被覆盖率偏低,地表流水侵蚀冲刷严重。该区域属于亚热带季风气候,年平均气温 18.5°C ,年均风速 1.5 m/s ,多年平均降雨量 $900\sim 1\,200\text{ mm}$,无霜期310余天。2014年丰都县共辖30个乡镇,幅员 $2\,900.86\text{ km}^2$;全县户籍人口为83.62万人,其中农业人口65.47万人,占比偏大;地区生产总值(GDP)达135.37亿元,城镇居民人均可支配收入21 749元,农村居民人均收入8 679元^[21],为国家级贫困县。本文将丰都县城镇建成区范围作为城镇区域,其余区域视为农村区域,面积共 $2\,833.22\text{ km}^2$ 。

1.2 样本分类与数据来源

为方便数据收集与统计,本文以村为研究单元,1个村即是1个样本。全县农村区域共317个村,即共有317个样本。现将2013年的317个样本数据分为两类:第一类,将随机选取200个样本的70%和30%分别作为构建BP-ANN模型的训练样本和验证样本;第二类,将剩余的117个作为网络测试样本。样本数据(2013年)主要来自于国土资源部“重点区域土地生态状况调查与评估”项目中“西南山区生态敏感区典型区域土地生态状况信息提取与精细评估”的前期研究成果,包括23项评价指标和1项评估结果分值。研究运用2013年的样本对BP-ANN模型训练、验证和测试,再将2014年指标数据代入模型,用于评价2014年丰都县农村土地生态安全状况。

评价指标数据主要来源于《丰都县统计年鉴(2015)》、丰都县国民经济和社会发展统计公报、丰都县政府工作报告;自然基础数据来源于航拍数字高程DEM(1:10 000)、重庆市气象站点数据和重庆市农业委员会的土壤及土壤侵蚀数据库;土地利用数据来源于人机交互遥感解译重庆市丰都县航拍影像后形成的土地利用现状数据库(比例尺为1:2 000),土地分类标准参照《土地利用现状分类》(GB/T21010—2007)将土地利用类型分为耕地、林地、草地、园地、水域及水利用地、建设用地、其他用地。

2 BP-ANN 模型构建及运行

2.1 BP-ANN 模型概要

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)以大量神经元联结组成非线性复杂网络,模拟人脑神经判断的运行过程,具有自主学习、联想存贮和高速寻求最优解的能力,对于实现地理模式识别、复杂地理系统的优化计算和地理过程模拟与预测等问题有较强的适应性^[22]。人工神经网络类型多样,除了BP-ANN模型之外,还有自组织特征映射网络(Self-Organizing Feature Map, SOM)、径向基函数网络(Radial Basis Function, RBF)、自适应共振网络(Adaptive Resonance Theory, ART)等,其中BP-ANN在进行模式识别和预测方面具有较好的容错性^[23],可以实现任何函数的逼近,在网络训练期间反向传播误差,不断地修正每层神经元之间连接权重和阈值,直至均方差最小,一定程度上避免主观因素对评价结果的影响,提高预测的精准性、公平性和客观性。

2.2 BP-ANN 模型构建

2.2.1 确定BP-ANN层数 一般由输入层、隐含层和输出层构成的3层BP网络即可在闭合区间内逼近1个连续函数^[24],可以完成任意的 n 维到 m 维的函数映射,因此将BP-ANN模型设计为3层(图1)。

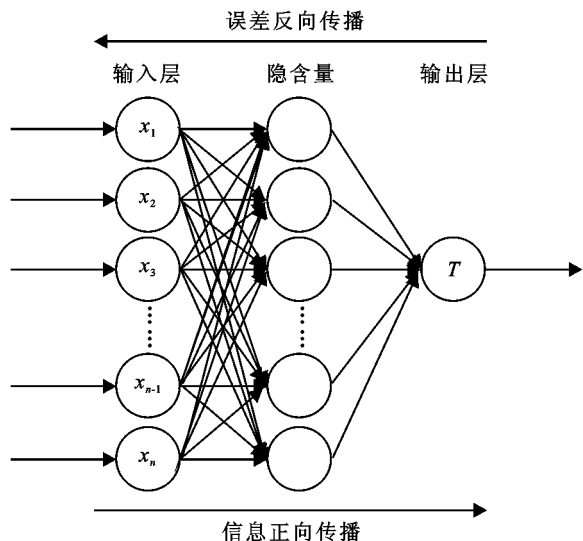


图1 BP-ANN模型结构图

2.2.2 确定网络输入和网络输出 土地生态系统是自然条件基础、土地利用状态和社会经济响应三者协调牵制的综合体,西南山区生态敏感区土地生态状况调查与评估过程从这三个方面考虑选取指标。影响土地生态的自然因素可用年均降水量、降水量季节分配、土壤有机质含量、有效土层厚度、土壤碳蓄积量水平、坡度、植被覆盖度、生物量等指标表达,土地利用状态可以用土地利用类型多样性指数、土地利用格局多样性指数、斑块多样性、高等级耕地比例、有林地与

防护林地比例、天然草地比例、水面比例、生态基础设施用地比例、土壤侵蚀比例等指标表达,社会经济响应主要用人口密度、人口与生态用地增长弹性系数、人口与生态用地增长贡献度、地区生产总值与生态用地增长弹性系数、地区生产总值与生态用地增长贡献度指标表达。为保证评价和预测的合理性和连续性,每组23个评价指标数值(表1)作为一个样本数据的输入。每组指标值通过评价后都得到的一个土地生态状况得分,故将BP-ANN模型的输出层设计为一个节点。

2.2.3 确定隐含层神经元节点个数 隐含层的神经元数量是控制BP-ANN模型的关键,神经元个数过少会使网络陷入局部极小值^[25],过多会影响网络预测结果的稳定性。神经元个数初始值设定参照“黄金分割”的隐含层神经元个数计算方法^[26],初步将隐含层神经元个数设为10~25,再在训练和测试网络使其收敛的过程中确定最终隐含层神经元个数(表2)。

2.2.4 数据标准化处理 评价区域中 n 个村包括 m 个评价指标的土地生态安全状况,则其原始数据矩阵 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

原始指标的值存在量纲和数值区间的差异,无法构建统一有序的数据集合,故使用极差标准化的方法将数据进行标准化处理:

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

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

式中: y_{ij} 为 x_{ij} 标准化后的值; $x_{i,\min}$ 为第 i 个指标中最小值; $x_{i,\max}$ 为第 i 个指标中的最大值;最终将 x_{ij} 的值转为 $[0, 1]$ 的值,矩阵 X 转变为标准化数据矩阵,即网络输入矩阵 $p = (y_{ij})_{n \times m}$ 。相应地网络输出数据也构成矩阵 $T = (t_1, t_2, \cdots, t_n)^T$ 。

2.3 BP-ANN 模型运行

2.3.1 网络训练和验证 将第一类数据200个样本代入MatlabR2012软件中人工神经网络工具箱nprtool,随机抽取200个样本中70%训练网络,30%验证网络,设置参数对网络进行训练,其中训练误差设置为0.00001,学习速率设置为0.1,最大训练次数为50000次;训练过程中采用Levenberg-Marquart算法,传递函数采用tansig,学习函数采用learnngdam。通过不同隐含层神经元个数训练网络收敛的次数,将隐含层节点确定为15,经过703次训练后,网络收敛,最终的均方差为3.39E-12,符合研究精度要求^[27],可对第二类数据117个待测试样本进行测试。

2.3.2 网络测试 将需测试的117个样本代入训练

和验证后的 BP-ANN 中,得到测试结果(表 3)。表 3 显示相对误差 $\geq 10\%$ 的样本仅有 2 个,占 1.7%,相对误差 $\leq 5\%$ 的样本仅有 1 个,占 0.09%,相对误差 $\leq 5\%$ 的样本有 114 个,占 98.21%,模型精度良好。

表 1 西南山区生态敏感区土地生态状况调查与评估指标

目标层	准则层	指标层	指标含义
自然条件		X_1 年均降水量(mm)	基期年前 3 a(包含基期年)三年降水量之和/3
		X_2 降水量季节分配(mm)	基期年前 3 a(包含基期年)三年区域主要农作物生长期降水量之和/3
		X_3 土壤有机质含量(g/kg)	土壤内有机质含量/土壤质量
		X_4 有效土层厚度(cm)	农作物有效生长的土层厚度
		X_5 土壤碳蓄积量水平(kg/m ²)	1 m 深度的土壤有机碳质量/土层面积
		X_6 坡度(°)	DEM 数据生成
		X_7 高程(m)	DEM 数据生成
		X_8 植被覆盖率(%)	区域内植物垂直投影面积/总面积 $\times 100\%$
		X_9 生物量(g/m ²)	实存生活的有机物质/总面积 $\times 100\%$
土地生态安全状况		X_{10} 土地利用类型多样性指数	$H = - \sum_{i=1}^n (P_i) \cdot \lg(P_i)$ H 为土地利用类型多样性指数; P_i 为土地利用类型 i 所占比例; n 为土地利用类型数目
			$H(b) = - \sum_{i=1}^n (PE_i) \cdot \lg(PE_i)$ $H(b)$ 为土地利用格局多样性指数, PE_i 为土地利用类型 i 的边界累积长度占土地利用边界总长度的比例, n 为土地利用类型数目
		X_{11} 土地利用格局多样性指数	
	土地利用状态	X_{12} 斑块多样性指数	单位面积斑块数量/土地总面积
		X_{13} 高等级耕地比例(%)	高等级耕地面积/土地总面积 $\times 100\%$
		X_{14} 有林地与防护林比例(%)	(有林地面积+防护林地面积)/土地总面积 $\times 100\%$
		X_{15} 天然草地比例(%)	天然草地面积/土地总面积 $\times 100\%$
		X_{16} 水面比例(%)	水面面积/土地总面积 $\times 100\%$
		X_{17} 生态基础设施用地比例(%)	生态基础设施用地面积/土地总面积 $\times 100\%$
	社会经济响应	X_{18} 土壤侵蚀程度指数(%)	(重度侵蚀土地面积/土地总面积 $\times 100\%$) $\times 0.5$ +(中度侵蚀土地面积/土地总面积 $\times 100\%$) $\times 0.3$ +(轻度侵蚀土地面积/土地总面积 $\times 100\%$) $\times 0.2$
		X_{19} 人口密度(人/km ²)	人口数量/土地总面积
		X_{20} 人口与生态用地增长弹性系数	总人口增长幅度/生态用地增长幅度
		X_{21} 人口与生态用地增长贡献度	(总人口增长量/全部评价单元总人口增长量)/(生态用地增长量/全部评价单元生态用地增长量)
		X_{22} 地区生产总值与生态用地增长弹性系数	地区生产总值增长幅度/生态用地增长幅度
		X_{23} 地区生产总值与生态用地增长贡献度	(地区生产总值/全部评价单元地区生产总值增长量)/(生态用地增长量/全部评价单元生态用地增长量)

表 2 BP-ANN 模型隐含层神经元个数的检验

隐含层神经元个数	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
训练次数	1141	724	821	918	1023	703	842	936	821	818	1316	1617	821	920	1117	1445

3 结果与分析

3.1 丰都县农村土地生态安全状况

运用 MatlabR2012 将 2014 年 317 个待估样本指标值代入已经测试好的 BP-ANN 模型里,得到评价结果(图 2)。从总体分值看,2014 年丰都县农村区域 317 个村的土地生态安全得分为 40.47~55.73,平均得分为 49.19,土地生态安全状况不容乐观,处于中等偏下水平。通过 ArcGIS 9.3 的 Natural breaks 方法将土地生态安全得分结果将丰都农村区域划分 5 个等级,每个等级的分值分为 40.47~46.04,46.05~48.37,48.38~49.87,49.98~51.30,51.31~55.73。从单项指标看,年均降水量、有效土层厚度和斑块多样性指标得分较高,分别为

83.29,85.93,82.84,表明丰都县的自然环境基础条件较好,降水条件和土壤条件助力农业发展,土地利用类型多样;天然草地比例、生态设施用地、人口密度指标得分最低,分别为 0.82,0.88,0.63,表明丰都县草地等天然绿化面积较少,生态设施用地比例不足,人口压力较大。

3.2 丰都县农村土地生态安全空间分异

全局 Morans'I 指数常被用来反映区域内空间自相关性的状态。公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1, l \neq i}^n x_{kl} (x_k - \bar{X})(x_l - \bar{X})}{\sum_{k=1}^n} \times 100\% \quad (3)$$

式中: n 为研究区空间单元的总数; x_k 和 x_l 分别为第 k 个和第 l 个单元上的值; \bar{x} 为所有 x 值的平均值; w_{kl} 是连接空间单元的权重; S_0 是矩阵 w_{kl} 所有元素之和。

全局 Morans' I 指数的取值在 $[-1,1]$ 之间,当全局 Morans' $I < 0$ 时,空间呈负相关;Morans' $I > 0$ 时,空间呈正相关,全局 Morans' $I = 0$ 时,空间呈无相关性^[28]。通过

ArcGIS 9.3 中 Spatial Statistics Tools 中的 Cluster and Outlier Analysis 工具进行空间自相关性分析测算得到丰都县生态安全评分的全局 Morans' I 指数为 0.34,以及相对应的 Z 统计值 14.08 和 p 值 0.000 3。根据表 4,此次分析置信水平达到 99%,表明显著水平下,丰都县农村土地生态安全存在空间自相关性。

表 3 BP-ANN 模型测试结果

序号	真实值	拟合值	残差	相对误差/%	序号	真实值	拟合值	残差	相对误差/%	序号	真实值	拟合值	残差	相对误差/%
1	52.667537	52.460119	0.207418	0.393825	40	52.572140	52.819599	-0.247459	0.470703	79	54.178759	54.423002	-0.244243	0.450809
2	54.841301	54.946583	-0.105283	0.191977	41	54.626375	54.237737	0.388639	0.711449	80	55.980214	57.008257	-1.028043	1.836440
3	57.110924	56.799400	0.311524	0.545473	42	54.636244	54.407105	0.229138	0.419389	81	56.453911	55.824781	0.629130	1.114413
4	53.906105	54.555014	-0.648909	1.203776	43	56.204349	55.768213	0.436136	0.775982	82	54.278553	54.499791	-0.221238	0.407597
5	51.474626	51.127207	0.347419	0.674932	44	56.326236	56.204963	0.121273	0.215305	83	51.293658	50.178934	1.114724	2.173220
6	55.102276	55.191792	-0.089515	0.162453	45	55.036092	55.268431	-0.232339	0.422158	84	54.713672	54.781761	-0.068089	0.124446
7	57.980388	57.817117	0.163271	0.281597	46	49.306533	50.038423	-0.731891	1.484369	85	55.628060	55.753419	-0.125359	0.225352
8	55.543313	55.338317	0.204996	0.369075	47	53.115225	52.564540	0.550684	1.036773	86	52.563600	52.597699	-0.034100	0.064874
9	56.133061	56.297373	-0.164312	0.292719	48	57.883523	57.621191	0.262332	0.453206	87	56.839264	56.813605	0.025659	0.045143
10	56.870790	56.451836	0.418954	0.736677	49	58.705337	58.266089	0.439248	0.748224	88	55.346681	55.665278	-0.318597	0.575639
11	54.169705	53.275491	0.894214	1.650763	50	53.433191	53.676274	-0.243083	0.454929	89	55.470387	55.325622	0.144765	0.260977
12	56.049379	55.828169	0.221211	0.394671	51	56.411462	57.252757	-0.841296	1.491356	90	50.156719	50.772213	-0.615494	1.227142
13	57.705416	58.321088	-0.615672	1.066923	52	54.661436	54.837053	-0.175617	0.321282	91	54.739293	54.695989	0.043304	0.079110
14	56.017779	57.148970	-1.131190	2.019341	53	52.001507	51.806558	0.194949	0.374891	92	56.294148	55.961170	0.332978	0.591496
15	51.210379	51.667442	-0.457063	0.892520	54	54.000395	53.695231	0.305163	0.565113	93	50.680841	51.219507	-0.538666	1.062859
16	46.348108	38.652532	7.695576	16.603863	55	54.826352	54.972597	-0.146245	0.266742	94	56.172441	56.643786	-0.471345	0.839104
17	56.863241	56.243835	0.619405	1.089290	56	53.194616	53.086725	0.107891	0.202823	95	54.979950	54.912785	0.067164	0.122162
18	54.447204	54.470830	-0.023627	0.043394	57	55.365288	55.421001	-0.055713	0.100629	96	54.441425	55.070908	-0.629483	1.156258
19	54.965573	55.523981	-0.558408	1.015924	58	55.122409	55.338317	-0.215908	0.391689	97	56.322223	57.634651	-1.312428	2.330214
20	54.712710	54.825800	-0.113091	0.206699	59	55.588844	55.401608	0.187236	0.336822	98	51.746146	52.662242	-0.916095	1.770364
21	52.796760	52.746763	0.049997	0.094696	60	57.994993	58.351368	-0.356375	0.614492	99	56.051260	55.105848	0.945412	1.686691
22	52.665054	53.034623	-0.369569	0.701735	61	56.297924	57.174548	-0.876624	1.557116	100	52.684550	52.556842	0.127708	0.242401
23	54.755858	54.721805	0.034052	0.062189	62	50.020473	50.002510	0.017962	0.035910	101	56.364551	56.332821	0.031730	0.056294
24	56.384270	56.128213	0.256057	0.454128	63	54.232900	53.478382	0.754518	1.391254	102	55.828547	55.660956	0.167591	0.300189
25	55.205402	55.352415	-0.147013	0.266302	64	54.576359	54.694117	-0.117757	0.215766	103	55.521477	55.525722	-0.004245	0.007645
26	55.505438	55.774760	-0.269322	0.485217	65	53.744491	53.974835	-0.230344	0.428591	104	54.779111	54.601760	0.177351	0.323756
27	55.904094	56.291850	-0.387756	0.693610	66	56.330950	56.378749	-0.047799	0.084855	105	55.640775	55.520463	0.120313	0.216232
28	50.747559	50.410115	0.337444	0.664946	67	55.146497	55.315657	-0.169160	0.306747	106	56.502253	56.610015	-0.107763	0.190723
29	55.805897	56.289549	-0.483653	0.866669	68	55.428715	55.442560	-0.013845	0.024977	107	55.199878	55.134097	0.065780	0.119167
30	54.227611	54.552495	-0.324884	0.599111	69	52.078172	51.895360	0.182812	0.351034	108	54.946665	54.936995	0.009669	0.017598
31	55.640737	55.561717	0.079020	0.142019	70	51.738847	51.927079	-0.188232	0.363812	109	48.850315	46.766010	2.084305	4.266718
32	55.536598	55.265230	0.271368	0.488629	71	53.554755	53.767600	-0.212845	0.397434	110	54.335081	54.196515	0.138565	0.255020
33	52.814180	53.065563	-0.251383	0.475976	72	54.404227	54.723795	-0.319569	0.587397	111	54.738050	54.737369	0.000681	0.001244
34	53.952475	54.361488	-0.409013	0.758098	73	55.585397	55.648924	-0.063527	0.114288	112	54.852168	54.833497	0.018671	0.034040
35	55.886375	55.735385	0.150990	0.270174	74	56.186321	56.061729	0.124592	0.221749	113	49.226975	49.859763	-0.632787	1.285448
36	54.388422	54.599828	-0.211406	0.388696	75	50.882806	47.069811	3.812995	7.493681	114	57.095190	57.023819	0.071371	0.125004
37	50.928973	51.831793	-0.902821	1.772705	76	50.289699	51.272822	-0.983123	1.954920	115	57.230037	57.655441	-0.425405	0.743324
38	53.088232	53.260678	-0.172447	0.324831	77	44.308090	38.347635	5.960455	13.452295	116	50.219378	51.059970	-0.840591	1.673838
39	54.180562	54.145892	0.034670	0.063989	78	56.284988	56.136697	0.148291	0.263465	117	55.255060	55.510147	-0.255087	0.461654

图 2 表明丰都县由长江分隔开的西北部 and 东南部差别明显,生态较脆弱的区域位于主要包括河流蓄滞洪区、滨江防患区、地质灾害高危险地区等。西北部农村土地生态安全评分在 58 上下浮动,较东南部

土地生态安全状况好;区域内海拔较低,低山丘陵广布,土层厚度较厚,土地利用方式多样,生态保护工作开展效果较好。东南部农村土地生态安全评分在 49 左右,这一带属县内海拔较高、土层厚度较薄的区域,

受滑坡、崩塌等地质灾害威胁的可能性较大;渝利铁路丰都段、涪丰石高速公路丰都段的施工修建占用大量生态用地,给区域内生态环境造成一定程度影响。由于受工业污染和人类生产生活影响较大,沿长江分布的丰都县城周围的土地生态安全得分也偏低。

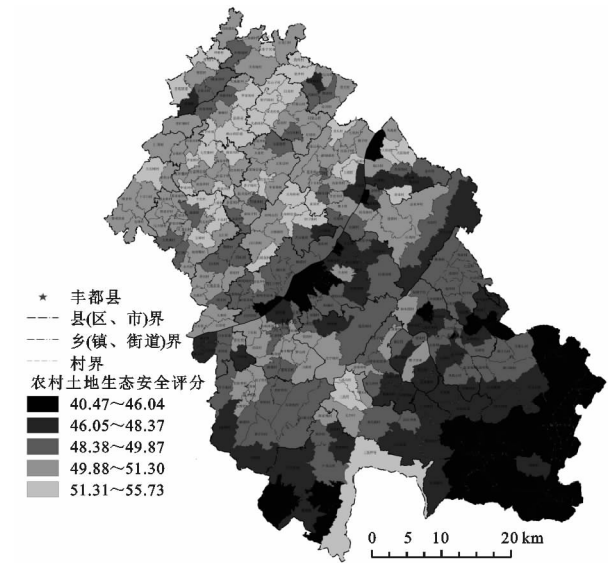


图 2 丰都县农村土地生态安全评价结果

表 4 Morans'I 指数置信度

Z 得分	p 值	置信度
$(-1.96,-1.65] \cup [1.65,1.96)$	$(0.05,0.10]$	90%
$(-2.58,-1.96] \cup [1.96,2.58)$	$(0.01,0.05]$	95%
$(-\infty,-2.58] \cup [2.58,+\infty)$	$(-\infty,0.01]$	99%

表 5 旋转成分矩阵

序号	变量	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6
1	年均降水量	0.064	-0.022	0.071	0.019	0.971	-0.139
2	降水量季节分配	0.024	-0.002	0.060	0.000	0.969	-0.147
3	土壤有机质含量	-0.799	0.128	-0.016	-0.051	-0.038	-0.071
4	有效土层厚度	0.825	-0.113	-0.019	0.017	-0.097	0.080
5	土壤碳蓄积量水平	-0.746	0.189	0.209	-0.071	-0.062	-0.175
6	坡度	0.230	-0.626	-0.021	0.151	0.229	-0.040
7	高程	0.802	-0.350	-0.119	0.084	0.070	0.189
8	植被覆盖度	0.133	0.705	0.579	0.096	0.083	0.122
9	生物量	0.134	0.705	0.579	0.096	0.084	0.122
10	土地利用类型多样性指数	0.185	-0.099	0.001	0.020	-0.067	0.936
11	土地利用格局多样性指数	-0.031	0.217	-0.133	-0.001	-0.255	0.853
12	斑块多样性指数	0.587	-0.409	0.375	0.053	0.189	0.358
13	高等级耕地比例	0.221	-0.438	0.230	0.045	0.190	0.122
14	有林地与防护林比例	-0.358	0.776	0.225	0.022	0.083	-0.303
15	天然草地比例	-0.539	-0.074	0.015	0.119	-0.031	0.202
16	水面比例	0.190	-0.194	-0.916	-0.037	-0.068	0.090
17	生态基础设施用地比例	0.191	-0.194	-0.715	-0.037	-0.069	0.092
18	人口密度	-0.266	0.701	0.198	0.076	0.193	0.120
19	人口与生态用地增长弹性系数	-0.050	0.088	0.069	0.895	0.081	0.020
20	人口与生态用地增长贡献度	0.014	-0.003	0.056	0.821	0.088	0.031
21	地区生产总值与生态用地增长弹性系数	0.025	-0.061	0.029	0.816	0.063	-0.024
22	地区生产总值与生态用地增长贡献度	0.068	-0.028	-0.090	0.618	-0.228	-0.055
23	土壤侵蚀程度	-0.124	0.126	-0.317	0.163	0.037	-0.328

3.3 丰都县农村土地生态安全影响因素分析

利用 SPSS 19.0 对数据进行 KMO 统计量检验和 Bartlett 球形检验,得到 KMO=0.706,大于 0.5, Bartlett 球形检验值为 0.000,小于 0.001,结果显著,适合进行因子分析。在 23 个指标变量进行因子分析提取 6 个特征根大于 1 的因子。6 个新因子的方差累计贡献率达到 73.29%,原有变量信息丢失较少,因子分析效果较为理想^[29],能够较好反映 23 个变量信息;再使用方差极大法对因子荷载矩阵进行正交旋转得到表 5。

其中因子 1 对土壤有机质含量(x_3)、有效土层厚度(x_4)、土壤碳蓄积量水平(x_5)、高程(x_7)有较高荷载,因子 2 对植被覆盖度(x_8)、生物量(x_9)、有林地与防护林比例(x_{14})有较高荷载,因子 3 对水面比例(x_{16})有较高荷载,因子 4 对人口与生态用地增长弹性系数(x_{19})、人口与生态用地增长贡献度(x_{20})、地区生产总值与生态用地增长弹性系数(x_{21})有较高荷载,因子 5 对年均降水量(x_1)、降水量季节分配(x_2)有较高荷载,因子 6 对土地利用类型多样性指数(x_{10})、土地利用格局多样性指数(x_{11})有较高荷载。根据研究和经验尝试对 6 个因子进行分别重新命名为:土壤条件(Z_1)、植被生物条件(Z_2)、水域条件(Z_3)、生态建设与发展协调程度(Z_4)、降水条件(Z_5)、景观多样性(Z_6)。

再利用 SPSS 19.0 将提取出的新因子进行多元线性回归分析, F 检验值为 135.81, 显著性概率 p 为 0, 低于显著水平 ($\alpha=0.05$), 丰都县农村土地生态安全得分 Y 可以用线性函数 $Y=54.467+1.096Z_1+1.121Z_2+0.504Z_3+0.834Z_4+0.683Z_5+0.844Z_6$ 表达(表 6)。

表 6 各解释变量的偏回归系数系数矩阵

指标	非标准化系数		标准系数	t 检验	显著性 Sig.
	B	标准差	Beta		
(常量)	54.467	0.075		727.209	0.000
Z_1	1.096	0.075	0.332	11.123	0.000
Z_2	1.121	0.075	0.445	14.937	0.000
Z_3	0.504	0.075	0.200	6.714	0.000
Z_4	0.834	0.075	0.436	14.609	0.000
Z_5	0.683	0.075	0.272	9.107	0.000
Z_6	0.844	0.075	0.335	11.251	0.000

根据影响程度排序分别为 $Z_2>Z_1>Z_6>Z_4>Z_5>Z_3$, 即植被生物条件>土壤条件>景观多样性>生态建设与发展协调程度>降水条件>水域条件。6 个新的因子较好解释了丰都县西北部和东南部土地生态安全状况的空间分异。丰都县西北部耕地较多, 土壤多为紫色土类和水稻土类, 养分条件较好, 土层厚度较厚; 水分条件较好, 农业生产以粮食作物和经济作物种植为主; 土地利用类型丰富, 斑块多样性高; 长江流经西北部的南部区域, 水域的过滤和净化等生态调节能力较强。相比之下, 东南部海拔较高, 多山地地貌, 水土流失现象严重, 植被立地优势条件较弱, 多年平均降水量低于西北部, 土地利用类型多样性较低。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) BP-ANN 模型经训练、测试后精度较高。区域土地生态安全评价不仅需要一套科学合理的评价指标体系, 而且需要尽量降低评价过程人为主观因素产生的误差。本文通过 MatlabR2012 软件利用 2013 年 317 个样本数据构建“输入—灰色系统—输出”映射关系, 训练人工神经网络, 使其自行学习至网络的均方差最小, 再利用 117 个样本测试网络。结果表明: 98.21% 的测试样本的评价结果相对误差小于 5%, 模型的精度和可信度较高。

(2) 2014 年丰都县农村土地生态安全状况不容乐观, 并且在空间上呈现自相关性和区域分异的特点。运用训练和测试好的 BP-ANN 模型对 2014 年丰都县农村土地生态安全状况进行评价, 测算值为 40.47~55.73, 平均得分为 49.19, 处于中等偏下水平。空间上土地生态安全评分的全局 Morans'I 指数

为 0.34, 呈正相关, 表明丰都县农村土地生态安全状况有一定的空间自相关性和聚集性; 区域内生态安全状况空间分异明显, 其中西北部的土地生态安全状况评价结果比东南部好。

(3) 运用因子分析结合多元线性回归分析发现 6 个影响丰都县农村土地生态安全的因子。其按影响程度大小分别为: 植被生物条件、土壤条件、景观多样性、生态建设与发展协调程度、降水条件、水域条件。其中指标中生物量、植被覆盖度、有效土层厚度和土壤有机质含量等自然基础性指标有较高的影响, 生态用地设施比例、人口与生态用地增长弹性系数及贡献度等人类活动影响性指标有一定的影响。

4.2 讨论与展望

丰都县不但是三峡库区移民区域, 而且是渝东北生态涵养发展区域, 既是秦巴山连片特困区域, 又是城乡统筹发展重点区域, 其生态安全尤其是土地生态安全需要特别重视。应继续加大对丰都县土地生态安全状况的监测和保护力度, 在政策、资金和技术上给予支持, 将保护土地生态安全作为保护生态环境的重要抓手, 着力合理进行土地利用结构调整, 控制人口和建设用地数量增长, 进一步维护好丰都县农村土地生态, 最终实现经济绿色增长和生态涵养保护双重目标。BP-ANN 在土地生态安全评价过程中表现出增强结论客观性、提高评价精度、简化评价过程、扩大模型普适性等重要特点。通过本次研究, 较为准确客观地评价 2014 年丰都县农村土地生态安全状况, 也证实 BP-ANN 模型在评价土地生态安全的科学实用性。

限于数据、样本的可获取性, 本文选取的指标还不够完善, 例如土地利用过程中仅考虑了耕地、林地、草地和水域的比例, 土地利用过程中发生的损毁和污染并未包含在内。此外, 本文利用的指标体系是针对丰都县农村土地生态状况和社会经济发展状况选取的, 应用于其他地区应根据实际情况酌情增减。随着人工神经网络技术的不断发展, 容错性和自学能力更好的 BP-ANN 模型将会在地理学研究中拥有更好的应用前景。

参考文献:

[1] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 597-606.
[2] 张虹波, 刘黎明. 土地资源生态安全研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 77-85.
[3] World Bank. Land Quality Indicators. World Bank Discussion Papers315[M]. Washington D C: The World Bank, 1995.
[4] Jeffrey A L. Agricultural and biodiversity: Finding our

- place in the world[J]. *Agricultural and Human Values*, 1999,16(4):365-379.
- [5] Herrmann S, Osinski E. Planning sustainable land use in rural areas at different spatial levels using GIS and modeling tools [J]. *Landscape & Urban Planning*, 1999,46(1):93-101.
- [6] Allan I, Peterson J. Spatial Modeling in Decision Support for Land-Use Planning: A demonstration from the Lal Lal Catchment, Victoria, Australia[J]. *Australian Geographical Studies*, 2002,40(1):84-92.
- [7] 谢余初,巩杰,张玲玲. 基于PSR模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. *地理科学*, 2015,35(6):790-797.
- [8] 徐美,朱翔,李静芝. 基于DPSIR-TOPSIS模型的湖南省土地生态安全评价[J]. *冰川冻土*, 2012,34(5):1265-1272.
- [9] 张玉泽,任建兰,刘凯,等. 山东省生态安全预警测度及时空格局[J]. *经济地理*, 2015,35(11):166-171.
- [10] 张虹波,刘黎明,张军连,等. 黄土丘陵区土地资源生态安全及其动态评价[J]. *资源科学*, 2007,29(4):193-200.
- [11] 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(8):87-90.
- [12] 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.
- [13] 肖笃宁,解伏菊,魏建兵. 区域生态建设与景观生态学的使命[J]. *应用生态学报*, 2004,15(10):1731-1736.
- [14] 吴晓,吴宜进. 基于灰色关联模型的山地城市生态安全动态评价:以重庆市巫山县为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2014,23(3):385-391.
- [15] 林彰平,刘湘南. 东北农牧交错带土地利用生态安全模式案例研究[J]. *生态学杂志*, 2002,21(6):15-19.
- [16] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. *地球科学进展*, 2009,24(6):571-576.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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):195-199.
- [20] 何春燕,杨庆媛. 镇域土地生态安全综合评价研究:以重庆市丰都县十直镇为例[J]. *水土保持研究*, 2014,21(3):163-168.
- [21] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴 2015[M]. 北京:中国统计出版社, 2015.
- [22] 李明月,赖笑娟. 基于BP神经网络方法的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.
- [23] 韩力群. 神经网络研究趋势展望[J]. *北京工商大学学报:自然科学版*, 2007,25(6):39-43.
- [24] 苑韶峰,吕军. 利用人工神经网络进行国有土地价格评估的探讨[J]. *上海交通大学学报:农业科学版*, 2004,22(2):188-191.
- [25] 任勋益,王汝传,周何骏. 遗传BP神经网络及其在异常检测中的应用[J]. *计算机工程与科学*, 2008,30(11):19-20.
- [26] 李双成,郑度. 人工神经网络模型在地学研究中的应用进展[J]. *地球科学进展*, 2003,18(1):68-76.
- [27] Liu H, Zhang H B. Application of BP neural network technology in evaluation of groundwater quality of Nantong based on MATLAB[J]. *Journal of Geology*, 2009,33(4):382-386.
- [28] Eamer J B R, Walker I J. Quantifying spatial and temporal trends in beach-dune volumetric changes using spatial statistics[J]. *Geomorphology*, 2013,191(4):94-108.
- [29] 林海明. 因子分析模型的改进与应用[J]. *数理统计与管理*, 2009,28(6):998-1012.