

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190782

张成, 黄芳芳, 尚国珪. 土地生态安全预警系统设计与实现[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 931-944
ZHANG C, HUANG F F, SHANG G B. Design and implementation of the land ecological security warning system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 931-944

土地生态安全预警系统设计与实现*

张成¹, 黄芳芳^{1**}, 尚国珪²

(1. 浙江广厦建设职业技术学院(本科) 东阳 322100; 2. 河北地质大学 石家庄 050031)

摘要: 土地生态安全问题是区域生态安全的核心问题之一。定量化、可视化、自动化的评价和预测土地生态安全状况并进行实时预警, 对土地资源的可持续利用具有重要意义。本文以河北省为研究实例, 基于PSR(压力、状态、响应)模型构建了土地生态安全评价指标体系, 采用投影寻踪模型对土地生态安全状况进行评价, 采用主成分相关分析法诊断土地生态安全的主要影响因子, 采用空间差异系数模型分析了土地生态安全的时空格局, 采用马尔科夫预测模型对土地生态安全水平进行预测, 通过划分土地生态安全预警等级建立了预警机制, 并利用MATLAB的图形用户界面(GUI)开发了土地生态安全预警系统。结果表明: 1)2010—2018年, 河北省土地生态安全指数呈不断增长态势, 由0.300上升到0.611, 年均增长率为12.92%, 土地生态安全状态由“恶化级”转变为“敏感级”, 预警等级由“巨警”转变为“中警”, 土地生态安全总体水平仍然较低。2)土地生态安全主要限制因子是人口密度、工业化率、单位播种面积农药负荷、单位土地工业三废负荷、城市建设用地比重、工业用地比重和GDP能耗等。3)河北省各地级市土地生态安全区域差异性不断缩小, 近年趋于平稳, 至2018年, 空间差异系数为32.54%, 各市之间的差异性仍然不容忽视, 大部分地级市土地生态安全状态处于“敏感级”, 预警等级为“中警”, 土地生态安全水平有待进一步提高。4)2019—2025年, 河北省土地生态安全指数呈稳步上升趋势, 到2025年为0.834, 达到“较安全级”, 预警等级为“轻警”, 土地生态朝着良性方向发展的潜力较大。

关键词: 土地生态安全; PSR模型; 图形用户界面(GUI); 预警系统; 河北省

中图分类号: X826

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Design and implementation of the land ecological security warning system*

ZHANG Cheng¹, HUANG Fangfang^{1**}, SHANG Guobei²

(1. Zhejiang Guangsha College of Applied Construction Technology, Dongyang 322100, China; 2. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Land ecological security is one of the core issues in regional ecological security. Quantitative, visual, and automatic evaluation and prediction of land ecological security status and real-time warning are of great significance for the sustainable use of land resources. Taking Hebei Province as an example, an index system of land ecological security was constructed based on the pressure-state-response (PSR) model. In addition, a projection tracking model was used to evaluate the land ecological status, a principal component correlation analysis model was used to identify the main influencing factors of land ecological security, and the spatial

* 国家自然科学基金项目(41401193, 41301093)和浙江省住建厅建设科研项目(2019K101)资助

** 通信作者: 黄芳芳, 主要研究方向为环境科学与工程。E-mail: huangfangstudy@126.com

张成, 主要研究方向为土地资源管理。E-mail: zhangchengstudy@126.com

收稿日期: 2019-11-05 接受日期: 2020-01-22

* The study was funded by the National Natural Science Foundation of China (41401193, 41301093) and the Construction Research Foundation of Housing and Urban-rural Development of Zhejiang Province (2019K101).

** Corresponding author, E-mail: huangfangstudy@126.com

Received Nov. 5, 2019; accepted Jan. 22, 2020

<http://www.ecoagri.ac.cn>

difference coefficient model was used to analyze the spatial and temporal pattern of land ecological security. The Markov prediction model was adopted to predict the land ecological security level, an early warning mechanism was established by dividing the early warning levels of land ecological security, and the land ecological security warning system was developed by using the graphical user interface (GUI) of MATLAB. The results showed that: 1) From 2010 to 2018, the land ecological security index of Hebei showed an overall increasing trend, shifting from 0.300 to 0.611, with an average annual growth rate of 12.92%. The status of the land ecological security had changed from “deteriorating grade” to “sensitive grade”. The warning level had changed from “super-severe warning” to “moderate warning”. However, the overall level of land ecological security was still low. 2) The main limiting factors of land ecological security were population density, industrialization rate, pesticide input per unit area of cultivated land, load of industrial wastes per unit area of land, proportion of urban construction land, proportion of industrial land, and energy consumption per 10 000 ¥ GDP. 3) The regional differences in land ecological security in different prefecture-level cities of Hebei Province had been decreasing continuously and became stable in recent years. By 2018, the coefficient of spatial difference was 32.54%, and the differences between cities still cannot be ignored. The state of land ecological security in most prefecture-level cities was at “sensitive level”, and the warning level was “moderate warning”. The level of land ecological security needs to be further improved. 4) From 2019 to 2025, the land ecological security index of Hebei Province is predicted to show a steady upward trend, and by 2025, it predicted to be 0.834, reaching the “less security level,” with a warning level of “slight warning.” There is now greater potential for land ecology to develop in a benign direction.

Keywords: Land ecological security; PSR model; Graphical user interface (GUI); Warning system; Hebei Province

生态安全是国家安全的重要组成部分, 土地生态安全是生态安全的基础。随着城镇化的加速推进, 建设用地面积不断拓展, 土地利用强度不断提高, 对土地生态安全产生了深刻影响。土地生态安全预警是指在一定的时空范围内, 评估和预测土地生态安全的影响来源、受威胁状态以及响应效应, 综合判断是否达到土地生态安全的阈值, 并对可能出现的警情进行警报^[1-3]。

近年来, 我国一直致力于构建国家生态安全评价、预警体系和标准, 研发土地生态安全监控、预警和辅助决策系统, 以实时掌握生态环境状态和演变趋势, 为社会经济可持续发展和生态环境保护提供决策依据。开发土地生态安全预警系统, 对区域土地生态安全状况进行定量化、可视化、自动化评价和实时预警, 对于指导区域土地合理利用和制定科学的社会、经济发展对策具有重要作用。

目前国内外关于土地生态安全的研究主要集中在评价指标体系的构建、评价和预测方法的选择、安全指数的计算、安全等级的划分和相关技术应用等方面。在指标体系构建上, 目前尚未形成统一的指标体系, 常用的指标体系有 PSR(压力、状态、响应)模型^[4-5]和 EES(经济、环境、社会)模型^[6-7], 也有学者采用以 DPSIR(驱动力、压力、状态、影响、响应)模型^[8-9]为代表的修正模型。评价方法可分为定性和定量方法。定性方法主要采用理论分析的方式描述土地生态安全的现状和变化趋势, 并提出对策和建议^[10]。定量方法成为近年来所采用的主要方法, 常用方法包括层次分析法^[11]、主成分分析法^[12]、熵值法^[13]、投影寻踪法^[14]、灰色关联法^[15]、模糊综合法^[16]、物元分析法^[17]和正态

云法^[18]等数学模型。以生态足迹法^[19]为代表的生态模型是目前进行生态安全评价的另一种简便实用的方法。预测方法主要有空间插值^[20]、回归分析^[21]、BT 神经网络模型^[22]和灰色预测法^[23]等。安全指数的计算通常采用综合指数法^[24], 根据确定的指标权重对单个指标进行加权求和, 转化为综合指数。安全等级的划分目前学术界尚未建立统一的标准和专用术语, 根据研究区域实际情况进行划分, 常以等分法为主^[25-27]。在相关技术应用上, 主要是将遥感和 GIS 技术作为数据源和时空分析工具^[28-30]。

定量化评价方法的出现, 使得评价结果更加准确、合理, 但模型本身更加复杂、难懂, SPSS 等传统的统计分析软件已经难以满足复杂模型建立和求解的需求。数学和计算机方面的专家学者能熟练应用各种数学模型, 但对研究区域的土地利用现状了解不足; 土地管理人员了解区域土地利用的现状, 但难以熟练应用各种数学模型进行土地生态安全评价研究。将土地生态安全相关理论与计算机技术进行有机结合, 开发专门的土地生态安全评价和预警系统, 实现土地生态安全可视化、自动化评价和实时预警, 这将是土地生态安全研究的前沿方向之一, 目前该方面的研究尚不足^[31]。MATLAB 的图形用户界面(GUI)为用户提供了可视化的系统设计平台, 用户利用菜单、按键等工具可实现对系统的方便快捷设计和自动化数据处理。目前 MATLAB GUI 编程技术被广泛应用于很多领域^[32-34], 在生态安全方面的应用却不多见^[35]。

本研究将土地生态安全相关理论和方法, 与计算机技术进行有机结合, 综合应用数学模型、数据

<http://www.ecoagri.ac.cn>

库技术和 MATLAB GUI 编程技术开发土地生态安全预警系统, 以实现从不同的时空尺度对土地生态安全现状和动态演替过程进行定量化、可视化、自动化的评价和预测及实时预警。同时, 应用该系统对河北省土地生态安全状况进行实例研究。

1 系统理论设计

1.1 指标体系的构建

压力—状态—响应(P-S-R)框架模型于 20 世纪 80 年代末提出, 能深刻地揭示人类活动、社会经济、生态环境之间的因果关系。将其应用于土地生态安全评价, 可以定量化地测度土地生态安全变化的起因、过程和机理, 结果更直观, 具有较强实用性、针对性。

基于 PSR 模型, 在参考相关研究成果的基础上^[36-39], 同时考虑区域土地利用现状、社会经济发展状态和生态环境特征, 遵循指标选取的系统性、差异性原则, 构建了土地生态安全评价指标体系(表 1)。目标层为区域土地生态安全。系统层为压力(P)、状态(S)、响应(R)3 个子系统, 压力(P)表征土地生态压力来源及作用, 状态(S)表征土地生态的变化程度, 响应(R)表征人类应对土地生态变化所做出的调控。准则层从社会、经济、环境 3 个方面选取指标。指标层共包含 30 项指标, 其中正向指标表示对土地生态安全具有正向作用, 其值越大越安全; 逆向指标表示对土地生态安全具有负向作用, 其值越大越不安全。

1.2 土地生态安全评价模型

1.2.1 评价指标权重的确定

利用投影寻踪模型计算指标权重。投影寻踪模型是基于降维的思想, 将高维指标投影为一维指标, 求得最佳投影向量作为指标权重。计算过程如下:

1)原始数据标准化

考虑到各指标数量级、正负性质不同, 采用极差标准化对其进行处理。

对于正向指标:

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad (1)$$

对于负向指标:

$$x'_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j) \quad (2)$$

2)构造投影函数

{ $x(i, j) | j = 1, 2, 3, \dots, n$ } 为 n 维标准化后的指标值, 利用一维投影向量 $a = [a(1), a(2), \dots, a(n)]$, 得到一维投影值 $Z(i)$:

$$Z(i) = \sum_{j=1}^n a(j) \times x'(i, j) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (3)$$

此时, 可构造投影函数 $Q(a)$:

$$Q(a) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m [Z(i) - \bar{Z}]^2} \quad (4)$$

3)投影指标函数优化

基于遗传算法求解最佳的投影向量 $a = [a(1), a(2), \dots, a(n)]$, 使得:

$$\max f = Q(a) \quad (5)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n a^2(j) = 1 \\ a(j) \in (-1, 1), j = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

求得的最佳投影向量 $a = [a(1), a(2), \dots, a(n)]$ 即为指标权重。

1.2.2 综合指数的计算

利用综合指数法计算 P、S、R 3 个子系统以及总系统的土地生态安全指数。

1)计算各子系统的指数

$$I_z = \sum_{j=1}^k a_z(j) x'_{ij} \quad (z = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中: $I_z (z = 1, 2, 3)$ 分别表示 P、S、R 子系统的指数, x'_{ij} 为 P、S、R 子系统的标准化指标值, $a_z(j)$ 为 P、S、R 子系统的投影向量。

2)计算土地生态安全综合指数 I_4

$$I_4 = \sum_{z=1}^3 I_z \quad (8)$$

1.2.3 影响因子诊断

采用主成分相关分析法对土地生态安全状况进行影响因子诊断。第 j 个评价指标与土地生态安全指数 $I_z (z = 1, 2, 3, 4)$ 之间的相关系数 $R(j)$ 为:

$$R(j) = \frac{\text{cov}(x'_j, I_z)}{\sqrt{D(x'_j)} \sqrt{D(I_z)}} = \frac{\sum_{i=1}^m (x'_{ij} - \bar{x}'_j) [I_z(i) - \bar{I}_z]}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x'_{ij} - \bar{x}'_j)^2} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [I_z(i) - \bar{I}_z]^2}} \quad (9)$$

1.2.4 空间差异性分析

采用空间差异系数对土地生态安全综合指数进行区域差异性分析。空间差异系数(CV)为:

$$CV = \frac{S(I_z)}{\bar{I}_z} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q [I_z(i) - \bar{I}_z]^2}}{\bar{I}_z} \times 100\% \quad (10)$$

表 1 土地生态安全评价指标体系
Table 1 Evaluation indexes of the land ecological security

目标层 Target layer	系统层 System layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	含义 Implication	性质 Property
区域土地生态安全 Regional land ecological security	压力(P) Pressure	社会压力 Social pressure	P1 人口密度 Population density (persons·km ⁻²)	区域总人口数/土地总面积, 表征单位土地人口压力 Total population / total land area. It represents pressure of population per unit area land.	逆 Negative
			P2 人口自然增长率 Natural growth rate of population (%)	人口出生率/人口死亡率, 表征人口增长压力 Birth rate / death rate. It represents the pressure of population growth.	逆 Negative
	经济压力 Economic pressure		P3 城镇化水平 Urbanization level (%)	城镇人口/总人口, 表征城镇化扩展压力 Urban population / total population. It represents the pressure of urbanization expansion.	逆 Negative
			P4 农业经济比重 Proportion of agricultural economy (%)	第一产业增加值/农用地面积×100%, 表征农业经济结构压力 Agricultural GDP / agricultural land area × 100%. It represents the pressure of economic structure of agriculture.	逆 Negative
			P5 工业化率 Industrialization rate (%)	工业增加值/GDP×100%, 表征工业化发展压力 Industrial added value / GDP × 100%. It represents the pressure of industrialization development.	逆 Negative
	环境压力 Environmental pressure		P6 GDP 增长率 GDP growth rate (%)	本年 GDP 增加值/上年 GDP 总量×100%, 表征经济增长压力 This year's GDP added value / last year's GDP × 100%. It represents the pressure of economic growth.	逆 Negative
			P7 单位面积播种地农药使用量 Pesticide input per cultivated land area (kg·hm ⁻²)	农药使用量/播种地面积, 表征农业土地污染方面的压力 Pesticide input / cultivated area. It represents the pressure of agricultural land pollution.	逆 Negative
			P8 单位播种地化肥施用量 Fertilizer input per cultivated land area (kg·hm ⁻²)	化肥施用量/播种地面积, 表征农业土地污染方面的压力 Fertilizer input / cultivated area. It represents the pressure of agricultural land pollution.	逆 Negative
	状态(S) Status		P9 单位土地工业三废负荷 Load of industrial wastes per land area (t·km ⁻²)	工业三废排放量/城市土地面积, 表征工业土地污染压力 Industrial waste emission / urban land area. It represents the pressure of industrial land pollution.	逆 Negative
			P10 自然灾害面积比重 Proportion of natural disaster area (%)	自然灾害面积/土地总面积×100%, 表征自然灾害的压力 Natural disaster area / total land area × 100%. It represents the pressure of natural disaster.	逆 Negative
			S1 人均耕地面积 Cultivated land area per person (hm ² ·person ⁻¹)	耕地面积/总人口, 表征耕地资源状况 Cultivated area / total population. It represents the status of cultivated land resource.	正 Positive
	经济状态 Economic state		S2 城市建设用地比重 Proportion of urban construction land (%)	城市建设用地面积/土地总面积×100%, 表征建设用地开发状况 Urban construction land area / total land area × 100%. It represents the status of construction land development.	逆 Negative
			S3 工业用地比重 Proportion of industrial land (%)	工业用地面积/土地总面积×100%, 表征工业用地使用状况 Industrial land area / total land area × 100%. It represents the status of industrial land use.	逆 Negative
			S4 单位播种地粮食产量 Grain yield per cultivated land area (kg·hm ⁻²)	粮食总产量/播种面积, 表征耕地产出状况 Total grain yield / cultivated land area. It represents the status of cultivated land yield.	正 Positive
			S5 经济密度 Economic density (10 ⁴ ·km ⁻²)	GDP 总量/土地总面积, 表征土地集约利用状况 Total GDP / total land area. It represents the status of intensive land-use.	正 Positive
S6 万元 GDP 能耗 GDP energy consumption [(standard coal)·(10 ⁴ 元) ⁻¹]			GDP 能耗/GDP 总量, 表征经济结构状况 GDP energy consumption / total GDP. It represents the status of economic structure.	逆 Negative	

http://www.ecoagri.ac.cn

续表 1

目标层 Target layer	系统层 System layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	含义 Implication	性质 Property
区域土地生态安全 Regional land ecological security	状态(S) Status	环境状态 Environmental status	S7 森林覆盖率 Forest coverage rate (%)	森林面积/土地总面积×100%。表征水土保持状况 Forest area / total land area × 100%. It represents the status of the conservation of water and soil.	正 Positive
			S8 城镇绿化水平 Urban greening level (%)	城镇绿化面积/城镇总面积×100%。表征城市土地生态建设状况 Urban green area / total urban area × 100%. It represents the status of the construction of urban land ecology.	正 Positive
	响应(R) Response	社会响应 Social response	S9 水土协调度 Coordination of water and soil (%)	水资源总量/耕地面积×100%。表征水土协调状况 Water resources / arable land area × 100%. It represents the status of the coordination of water and soil.	正 Positive
			S10 水土流失面积比例 Proportion of water loss and soil erosion area (%)	水土流失面积/土地总面积×100%。表征土地保持状况 Water loss and soil erosion area / total land area × 100%. It represents the status of the conservation of soil.	逆 Negative
			R1 耕地有效灌溉面积比例 Rate of effective irrigated cultivated land area (%)	有效灌溉面积/耕地面积×100%。表征耕地水资源保障水平 A available irrigated area / cultivated area × 100%. It represents the level of water resource security of cultivated land.	正 Positive
			R2 单位土地社会固定资产投资额 Investment in social fixed assets per land area (10 ⁴ ¥·km ⁻²)	社会固定资产投资额/区域土地总面积。表征单位土地社会投入水平 Investment in social fixed assets / total land area. It represents the level of social investment per land.	正 Positive
	经济响应 Ecological response	环境响应 Environmental response	R3 环保投资占 GDP 比重 Proportion of investment in environmental protection of GDP (%)	环保治理投资额/GDP×100%。表征土地生态维护力度 Investment in environmental protection / GDP × 100%. It represents the level of land ecological maintenance.	正 Positive
			R4 人均 GDP GDP per capita (¥·person ⁻¹)	GDP 总量/总人口数。表征经济发展水平 Total GDP / total population. It represents the level of economic development.	正 Positive
			R5 第三产业比重 Proportion of tertiary industry (%)	第三产业增加值/GDP×100%。表征产业结构优化水平 Added value of the tertiary industry / total GDP × 100%. It represents the level of industrial structure optimization.	正 Positive
			R6 绿色农业生产用地比重 Proportion of green agricultural production land (%)	绿色农业生产面积/土地总面积×100%。表征产业结构优化水平 Green agricultural production area / total land area × 100%. It represents the level of industrial structure optimization.	正 Positive
R7 生活垃圾无害化处理率 Harmless disposal rate of household garbage (%)			生活垃圾处理量/生活垃圾产生量×100%。表征土地生态维护水平 Household garbage disposal / household garbage production × 100%. It represents the level of land ecological maintenance.	正 Positive	
R8 工业固废处理比例 Proportion of industrial solid waste disposal (%)			工业固废处理量/工业固废产生量×100%。表征工业土地生态保护水平 Industrial solid waste treatment / industrial solid waste production × 100%. It represents the level of protection of industrial land ecology.	正 Positive	
			R9 造林面积比重 Proportion of afforestation area (%)	造林面积/土地总面积。表征土地生态加强水平 Afforestation area / total land area. It represents the level of land ecological enhancement.	正 Positive
			R10 水土流失治理率 Soil erosion control rate (%)	水土流失治理面积/水土流失面积×100%。表征土地生态治理水平 Soil erosion control area / soil erosion area × 100%. It represents the level of land ecological management.	正 Positive

http://www.ecoagri.ac.cn

1.3 土地生态安全预测模型

利用马尔可夫模型对土地生态安全指数进行中短期预测。马尔可夫预测法通过初始状态向量以及状态转移矩阵预测下一个状态。计算方法和步骤如下所示:

1) 确定状态向量矩阵

某研究区第 i 年的土地生态安全指数为 $I_z (z=1, 2, 3, 4)$, 则历年土地生态安全状态向量矩阵 I 可以表示为:

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{h1} & I_{h2} & \dots & I_{h4} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2) 构建转移矩阵

利用最小二乘原理构建转移矩阵:

$$T = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (12)$$

式中:

$$X = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{(h-1)1} & I_{(h-1)2} & I_{(h-1)3} & I_{(h-1)4} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Y = \begin{bmatrix} I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} & I_{34} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{h1} & I_{h2} & I_{h3} & I_{h4} \end{bmatrix} \quad (14)$$

3) 预测

第 i 年土地生态安全指数向量为 $I_z^{(0)} = [I_{i1} \ I_{i2} \ I_{i3} \ I_{i4}]$, 则今后第 k 年的土地生态安全指数 $I_z^{(k)}$ 为:

$$I_z^{(k)} = I_z^{(0)} \times T^k \quad (15)$$

4) 模型检验

用于进行模型检验的初始状态向量 $I_z^{(0)} = [I_{i1} \ I_{i2} \ I_{i3} \ I_{i4}]$, 则土地生态安全指数预测值为 $\hat{I}_z^{(0)} = I_z^{(0)}$, $\hat{I}_z^{(k)} = I_z^{(0)} \times T^k$, 对模型进行以下误差检测:

$$\text{残差: } C_z = I_z - \hat{I}_z \quad (16)$$

$$\text{相对误差: } \varepsilon_z = \frac{C_z}{I_z} \times 100\% \quad (17)$$

$$\text{平均相对误差: } \text{avg}_z(i) = \frac{1}{h-1} \sum_{i=2}^h |\varepsilon_z(i)| \quad (18)$$

$$\text{精度: } V_z(i) = [1 - \text{avg}_z(i)] \times 100\% \quad (19)$$

1.4 土地生态安全预警等级体系

目前国内外关于土地生态安全等级划分尚没有统一的标准。在借鉴已有研究成果基础上^[40-43], 结合区域土地生态安全状况, 将其划分为 5 个等级(表 2)。根据土地生态安全综合指数, 对比土地生态安全预警等级, 对区域土地生态安全状况进行实时预警。

2 系统模块设计与功能实现

2.1 系统功能模块

该系统主要有 3 个模块, 分别为土地生态安全评价、土地生态安全预测和成果输出。系统详细结构如图 1。

1) 土地生态安全评价模块。该模块包含“指标体系数据加载”“计算指标权重”“计算土地生态安全指数”“划分土地生态安全等级”和“评价结果分析”5 个子功能。用户通过自动导入或手动录入的方式将 PSR 指标体系数据加载到系统中。首先, 系统通过投影寻踪模型自动计算评价指标的权重, 并用综合指数法计算土地生态安全指数。其次, 系统对比土地生态安全预警等级体系, 自动划分安全状态和预警等级并进行警报。最后, 系统分别通过主成分相关分析法, 对土地生态安全的主要影响因素进行诊断; 通过计算空间差异系数, 对土地生态安全的区域差异性进行分析; 通过聚类分析法, 对土地生态安全的空间格局进行分析。

2) 土地生态安全预测模块。该模块包含“土地生态安全指数预测”“划分土地生态安全等级”“预测结果分析”和“模型检验”4 个子功能。首先, 系统基于土地生态安全评价模块计算的生态安全指数, 通过马尔可夫预测模型对其进行中短期预测。其次, 系统对比土地生态安全等级划分标准, 对预测指数自动划分安全等级并进行预警。最后, 系统对预测模型进行误差分析和检验。

3) 成果输出模块。对计算成果进行保存或打印输出。

2.2 关键技术与算法实现

1) 利用 MATLAB GUI 的 imread 函数加载图片, 为系统定制主、副界面。

```

jm=axes('units','normalized','position',[0,0,1,1]);
uistack(jm,'down');
zjm=imread('系统主界面.jpg');
fjm=imread('系统副界面.jpg');

```

2) 利用 MATLAB GUI 的 uimenu 函数为系统定制菜单项。

表 2 土地生态安全预警等级体系
Table 2 Classification system of land ecological security warning

序号 Order	综合安全指数 Comprehensive safety index	安全状态 Security state	预警等级 Warning level	警情 Warning situation
1	>0.90	安全级 Security	无警 No warning	土地生态系统处于理想状态, 结构完整, 功能完善; 生态环境基本未受干扰, 没有生态灾害; 生态自我恢复能力强, 人地关系和谐 The land ecosystem is in an ideal state with complete structure and perfect function. The ecological environment is basically undisturbed and there is no ecological disaster. The ecological self-recovery ability is strong, the relationship between man and land is harmonious.
2	(0.80, 0.90]	较安全级 Less security	轻警 Slight warning	土地生态系统破坏较小, 结构基本完整, 功能较为完善; 生态环境良好, 生态灾害较少; 生态可以自我恢复, 人地关系较为和谐 The damage of land ecosystem is small, the structure is basically complete, the function is relatively perfect with good ecological environment, less ecological disasters. Ecology can restore itself, and the relationship between man and land is relatively harmonious.
3	(0.60, 0.80]	敏感级 Sensitivity	中警 Moderate warning	土地生态系统中度破坏, 结构相对不完整, 尚能维持基本功能; 生态环境受到一定破坏, 生态灾害偶有发生; 生态恢复较为困难, 人地关系受到一定影响 The land ecosystem is moderately damaged, the structure is relatively incomplete, and the basic function can be maintained. The ecological environment is damaged to some extent, and ecological disasters happen occasionally. Ecological restoration is difficult, and the relationship between man and land is affected.
4	(0.40, 0.60]	风险级 Risk	重警 Severe warning	土地生态系统破坏明显, 结构破损, 功能退化; 生态环境脆弱, 生态灾害经常发生; 生态恢复难度大, 人地关系受到威胁 The land ecosystem is destroyed obviously, the structure is damaged, the function is degraded. Ecological environment is fragile and ecological disasters often occur. Ecological restoration is difficult, and the relationship between man and land is threatened.
5	0.40	恶化级 Deterioration	巨警 Super-severe warning	土地生态系统破坏严重, 结构破碎, 功能丧失; 生态环境很脆弱, 生态灾害频发; 生态极难恢复, 人地关系失衡 Land ecosystem is destroyed seriously, structure is broken, function is lost. The ecological environment is fragile and ecological disasters occur frequently. Ecological recovery is extremely difficult, the relationship between man and land is imbalanced

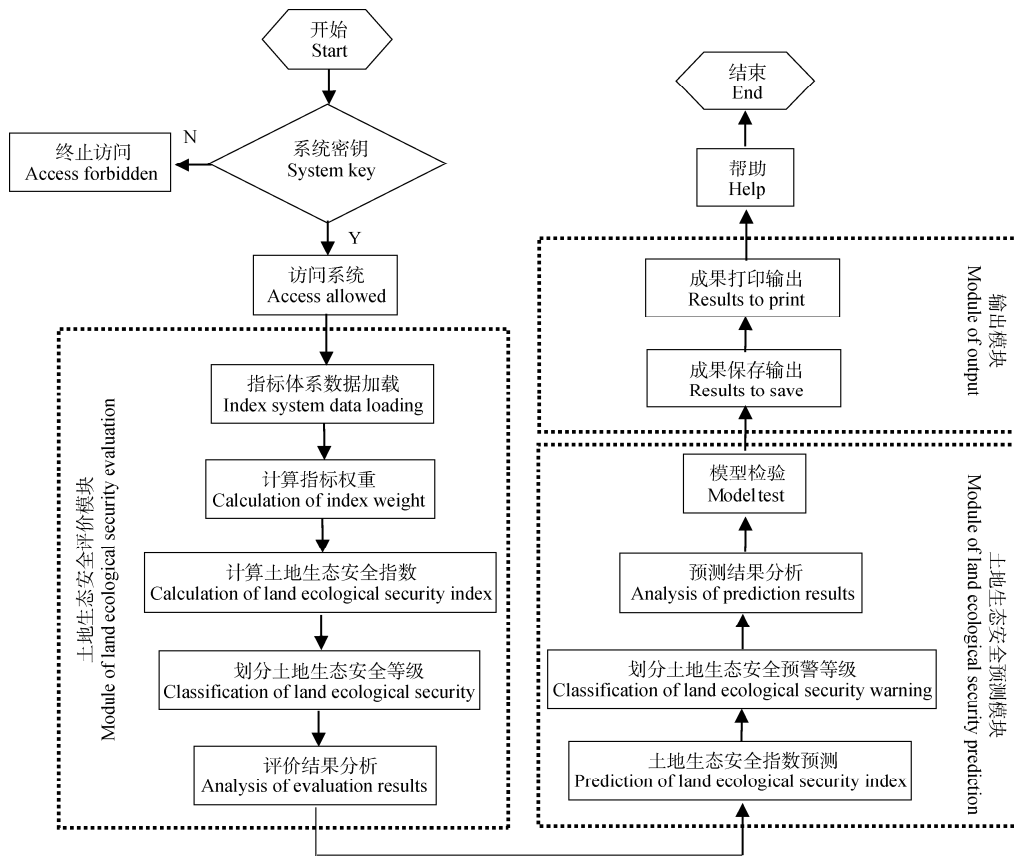


图 1 土地生态安全预警系统组织结构

Fig. 1 Organization structure of land ecological security warning system

<http://www.ecoagri.ac.cn>

```
ui1=uienu(h,'土地生态安全评价');
```

3)利用 MATLAB GUI 的 uigetfile 函数实现 EXCEL 原始数据自动加载与编辑。

```
[fName,pName,index]=uigetfile('*.xls','加载原始数据','河北省PSR指标体系原始数据表.xls');
```

4)利用 MATLAB GUI 的 plot 函数绘制曲线图、柱状图等图件。

```
sxt1=plot(x,y,'r+');
q1=title('土地生态安全指数变化曲线图');
xlabel('时间');
ylabel('土地生态安全指数');
```

5)利用 MATLAB GUI 的 visible 参数实现不同功能模块界面的任意刷新与切换。

```
position=get(gca,'position')
if position==[0.15,0.05,0.7,0.45] |
position==[0.15,0.64,0.7,0.2]
set(allchild(gca),'visible','off');
end
set(allchild(gcf),'visible','off');
set(findall(gcf,'type','uimenu'),'visible','on');
```

6)利用 MATLAB GUI 的 uiputfile 函数对系统均匀性结果进行保存或打印输出。

```
[fname,pname,index]=uiputfile('*.xls','另存为','土地生态安全指数表.xls');
printpreview(gcf);
```

3 河北省土地生态安全预警实例研究

3.1 研究区概况

河北省地处华北,漳河以北,东临渤海,内环京津。地势自东南向西北升高,地貌类型多样。冬季寒冷少雪,夏季炎热多雨,属温带大陆性季风气候。截至 2018 年,河北省下辖 11 个地级市,全省面积 18.88 万 km²。总人口 7 556.30 万人,生产总值 36 010.3 亿元,人均 GDP 为 47 772 元。随着城镇化的不断推进,建设用地需求不断增加,土地利用强度不断提高,对土地生态安全产生了深刻影响。

3.2 研究区域划分与数据来源

按行政界线划分研究区域,以河北省 11 个地级市作为评价单元。

数据主要来源于《中国城市统计年鉴》(2011—2019 年)、《中国环境年鉴》(2011—2019 年)、《河北省经济统计年鉴》(2011—2019 年)、《河北农村统计年鉴》(2011—2019 年)、《河北省国民经济和社会发展统计公报》(2010—2018 年)等。

3.3 土地生态安全评价

3.3.1 土地生态安全评价结果

利用开发的土地生态安全预警系统对河北省 2010—2018 年土地生态安全状况进行评价。计算的

指标权重如表 3,土地生态安全水平如表 4 所示。

表 4 显示 2010—2018 年,河北省土地生态安全压力指数在 0.420 和 0.549 之间呈波动性变化,且维持在较高水平。状态指数和响应指数呈逐年增长态势,且增长迅速。土地生态安全综合指数呈不断增长趋势,由 2010 年的 0.300 上升到 2018 年的 0.611,年均增长率为 12.92%。土地生态安全状态由“恶化级”经“风险级”转变至“敏感级”,土地生态预警等级由“巨警”经“重警”转变至“中警”,但至 2018 年,土地生态安全状态尚处于“敏感级”,预警等级为“中警”,土地生态安全总体水平仍然较低。

3.3.2 土地生态安全影响因子诊断

利用开发的土地生态安全预警系统计算土地生态安全综合指数与各评价指标之间的主成分相关性系数,并绘制相关性雷达图。由图 2 可知,与土地生态安全综合指数负相关性偏大的指标主要有 P1、P5、P7、P9、S2、S3、S6,河北省土地生态安全主要限制因子是人口密度、工业化率、单位播种面积农药负荷、单位土地工业三废负荷、城市建设用地比重、工业用地比重和万元 GDP 能耗等。随着人口的急剧增加,工业化、城镇化进程不断推进,耕地面积持续减少,建设用地规模不断扩大,包括邯郸市在内的多个城市第二产业占据很大比重,万元 GDP 能耗大,工业三废污染严重。另外,农业为提高产量,大量农药化肥的施用,造成水土污染,极大地影响了农业土地生态安全水平。因此,对于河北省来说,积极调整产业结构,大力发展绿色农业和第三产业应为迫切改善的方向。

与土地生态安全综合指数呈正相关较高的因素有 S4、S8、R1、R3、R7、R9、R10,在过去的 9 年里,河北省努力加大耕地保护力度,改善耕地环境质量,单位播种面积粮食产量有效增加;积极加强城市绿化建设和居民生活环境保护,环保治理投资增长显著;积极开展植树造林工程,加大水土流失治理力度,土地生态环境得到有效改善。

3.3.3 土地生态安全区域差异性分析

利用开发的土地生态安全预警系统计算 2010—2018 年河北省土地生态安全空间差异系数。由图 3 可知,2010—2018 年河北省土地生态安全综合指数的空间差异系数整体呈不断降低趋势,2015—2017 年相对平稳,至 2018 年为 32.54%。说明河北省各市土地生态安全区域差异性在不断缩小,近年趋于平稳,但各市之间的差异性仍然不能忽视。子系统层面,土地生态安全压力指数的空间差异系数一直维持在较高水平,只呈小范围波动性变化,至

表 3 河北省土地生态安全评价指标权重
Table 3 Evaluation index weight of land ecological security in Hebei Province

指标 Index	权重 Weight	指标 Index	权重 Weight	指标 Index	权重 Weight
人口密度 Population density	-0.079	人均耕地面积 Cultivated land area per person	-0.077	耕地有效灌溉面积比例 Rate of effective irrigated cultivated area	0.079
人口自然增长率 Natural growth rate of population	0.035	城市建设用地比重 Proportion of urban construction land	0.067	单位土地社会固定资产投资额 Investment in social fixed assets per unit land area	0.025
城镇化水平 Urbanization level	0.082	工业用地比重 Proportion of industrial land	0.031	环保治理投资占 GDP 比重 Proportion of investment in environmental protection in GDP	0.078
农业经济比重 Proportion of agricultural economy	-0.048	单位播种地粮食产量 Grain yield per unit cultivated land area	0.080	人均 GDP GDP per capita	0.083
工业化率 Industrialization rate	-0.073	经济密度 Economical density	0.079	第三产业比重 Proportion of tertiary industry	0.041
GDP 增长率 GDP growth rate	0.052	万元 GDP 能耗 GDP energy consumption	0.070	绿色农业生产用地比重 Proportion of green agricultural production land	0.066
单位播种面积农药使用量 Pesticide input per unit cultivated land area	-0.049	森林覆盖率 Forest coverage rate	0.082	生活垃圾无害化处理率 Harmless disposal rate of household garbage	0.084
单位播种面积化肥施用量 Fertilizer input per unit cultivated land area	-0.083	城镇绿化水平 Urban greening level	0.074	工业固废处理比例 Proportion of industrial solid waste disposal	0.068
单位土地工业三废负荷 Load of industrial wastes per unit land area	-0.050	水土协调度 Coordination of water and soil	0.080	造林面积比重 Proportion of afforestation area	0.082
自然灾害面积比重 Proportion of natural disaster area	-0.034	水土流失面积比例 Proportion of water loss and soil erosion area	0.083	水土流失治理率 Soil erosion control rate	0.075

表 4 2010—2018 年河北省土地生态安全状况
Table 4 Land ecological security situation of Hebei Province from 2010 to 2018

年份 Year	压力指数 Pressure index	状态指数 Status index	响应指数 Response index	综合指数 Comprehensive index	安全状态 Security state	预警等级 Warning level
2010	0.420	0.209	0.262	0.300	恶化级 Deterioration	巨警 Super-severe warning
2011	0.462	0.253	0.286	0.336	恶化级 Deterioration	巨警 Super-severe warning
2012	0.462	0.303	0.334	0.371	恶化级 Deterioration	巨警 Super-severe warning
2013	0.485	0.374	0.427	0.438	风险级 Risk	重警 Severe warning
2014	0.430	0.430	0.541	0.483	风险级 Risk	重警 Severe warning
2015	0.446	0.537	0.509	0.508	风险级 Risk	重警 Severe warning
2016	0.549	0.609	0.535	0.574	风险级 Risk	重警 Severe warning
2017	0.532	0.652	0.622	0.617	敏感级 Sensitivity	中警 Moderate warning
2018	0.468	0.687	0.631	0.611	敏感级 Sensitivity	中警 Moderate warning

2018 年为 43.60%，说明河北省各市土地生态系统所面临的压力相差各异。状态和响应指数的空间差异系数均呈现不断降低的趋势，2015 年以后趋于平稳，至 2018 年均均在 30% 以下，说明面对土地生态压力，各市在自然、经济、社会各方面均做出了积极响应。

3.3.4 土地生态安全空间格局分析

利用开发的土地生态安全预警系统对 2018 年河北省 11 个地级市的土地生态安全状况进行评价，并进行空间聚类。由图 4 可知，总体来看，2018 年河北省大部分地级市土地生态安全状态处于敏感级，

预警等级为“中警”，即土地生态安全等级较低，敏感性高。

张家口市、秦皇岛市土地生态安全状态处于“较安全级”，预警等级为“轻警”。其中，张家口市人口相对较少，人均耕地面积、人均水资源量较大，建设用地所占比重较低，土地生态压力较小。秦皇岛市人口密度较小，积极发展第三产业，工业废水排放达标率高，环保投入力度大，森林覆盖率高，土地生态环境良好。

承德市、廊坊市、唐山市、保定市、石家庄市、沧州市、邢台市土地生态安全状态处于“敏感级”，预

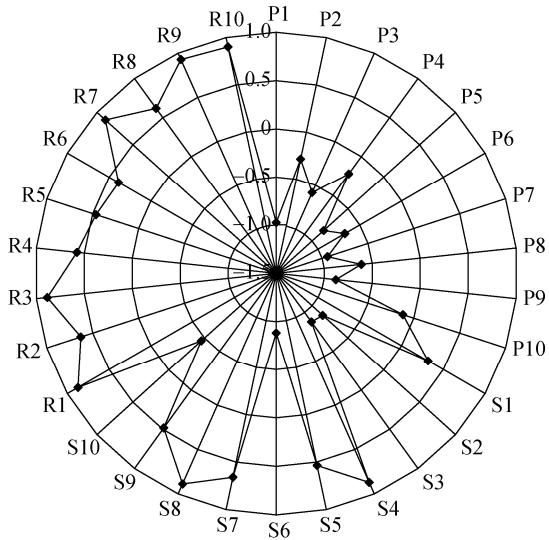


图 2 河北省土地生态安全综合指数与各评价指标相关性
 Fig. 2 Correlation between land ecological security index and each evaluation index in Hebei Province
 各评价指标名称见表 1。The names of the indexes are shown in the table 1.

警等级为“中警”。以上地区是河北省工业发达区，交通便利，吸引大量工业企业投资设厂，导致大量工业三废排放，土地质量急剧下降。人口密度大，对水、粮食等资源的需求量巨大，土地承载力大。此外，以上地区也是粮食主产区，农药化肥使用量偏

大，土地生态安全度低。

衡水市、邯郸市土地生态安全状态处于“风险级”，预警等级为“重警”。衡水市人均耕地面积少，且单位耕地化肥农药使用量超标，加之经济快速发展，建设用地需求量大，影响了该市土地生态安全水平。邯郸市为河北省传统工业城市，具有丰富煤炭资源，第二产业占据非常大的比重，存在大量高污染、高能耗企业和工厂，工业三废排放量大，对土地生态安全造成极大压力。

3.4 土地生态安全预测

3.4.1 土地生态安全预测结果

利用开发的土地生态安全预警系统对河北省土地生态安全状况进行中短期预测。由表 5 可知，2019—2025 年，河北省土地生态安全综合指数将呈稳步上升趋势，到 2025 年为 0.834，土地生态安全状态达到“较安全级”，预警等级为“轻警”。说明今后几年河北省土地生态朝着良性方向发展的潜力较大。在城镇化加速推进的同时，随着产业结构的不断升级，更加科学的土地利用规划的实施，土地节约和集约利用程度的提高，人们环保理念的不断增强，生态环保项目的实施，河北省土地生态状况有望得到进一步改善和提升。

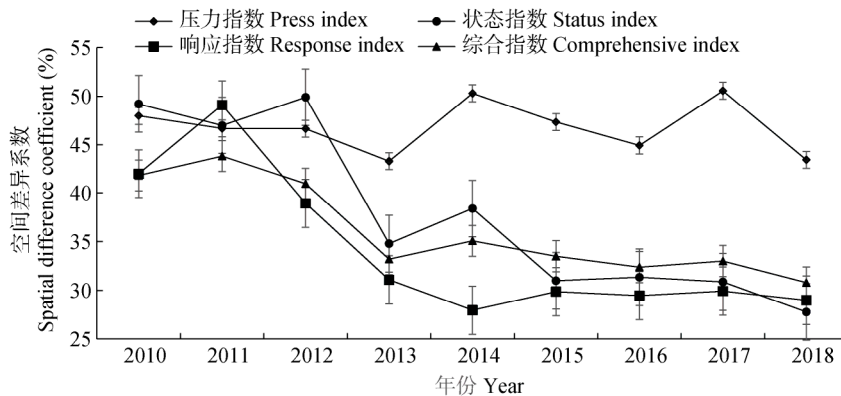


图 3 河北省土地生态安全指数空间差异性
 Fig. 3 Space difference of land ecological security index in Hebei Province

3.4.2 模型检验

对预测模型进行误差分析和检验，如表 6 所示。经检验，马尔可夫模型所预测的土地生态安全综合指数的平均相对误差为-0.006，精度达到 99.40%，精度较高，预测结果较准确，可信度高。

4 结论与讨论

4.1 结论

1)本研究将土地生态安全相关理论和方法与计算机技术进行了有机结合，形成了土地生态安全评价、预测和预警的完整体系。综合应用数据库技术、

数学模型和 MATLAB GUI 编程技术开发了土地生态安全预警系统，实现了对土地生态安全状况的定量化、可视化、自动化的评价和预测及实时预警。该系统将复杂的数学模型封装后置，操作界面简便友好，通过简单的操作提高了土地生态安全评价和预警的效率。将专家的理论知识与土地管理人员经验相结合，提高了土地管理人员对土地生态变化的有效把控和辅助决策能力。在技术上，为区域土地生态安全评价和实时预警提供了技术平台；在实践中，为社会经济的可持续发展和土地资源的合理利用提供了决策依据。

<http://www.ecoagri.ac.cn>

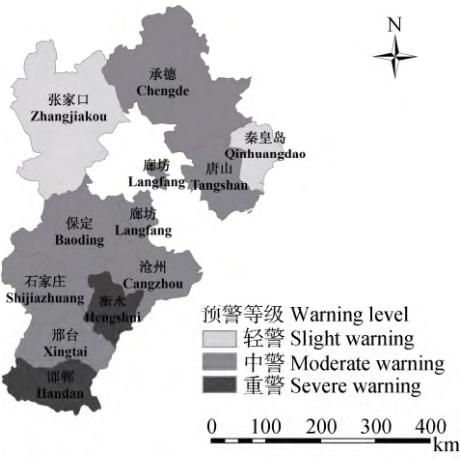


图 4 2018 年河北省土地生态安全空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of land ecological security of cities in Hebei Province in 2018

2)应用该系统对河北省土地生态安全状况进行实证研究。评价结果表明,2010—2018 年,河北省土地生态安全指数呈不断增长态势,由 0.300 上升到 0.611;土地生态安全状态由“恶化级”转变为“敏感级”,预警等级由“巨警”转变为“中警”,但土地生态安全总体水平仍然较低。从障碍因子来看,河北省土地生态安全主要制约因素是人口密度、工业化率、单位播种面积农药负荷、单位土地工业三废负荷、城市建设用地比重、工业用地比重和万元 GDP 能耗

等。从空间格局来看,河北省各地级市土地生态安全区域差异性在不断缩小,近年趋于平稳。至 2018 年,土地生态安全空间差异系数为 32.54%,各市之间的差异性仍然不能忽视;大部分地级市土地生态安全状态处于“敏感级”,预警等级为“中警”,土地生态安全水平有待进一步提高。预测结果表明,2019—2025 年,河北省土地生态安全指数呈稳步上升趋势,至 2025 年为 0.834,达到“较安全级”,预警等级为“轻警”,今后几年河北省土地生态系统保持良好的态势。

4.2 问题与展望

4.2.1 进一步完善评价指标体系,建立动态预警系统

本文基于 PSR 模型构建了土地生态安全评价指标体系,政府土地利用政策、土地法规等难以量化的指标未加考虑,今后需要进一步将一些定性的指标进行有效的量化,以建立更科学的评价指标体系。本文在选取评价指标时仅考虑了不同土地利用类型的数量特征对土地生态安全的影响,但等量的耕地、园地、林地等不同土地利用类型的生态服务价值是不同的,其生态安全性是有差异的。谢高地等^[44]参考 Costanza 的生态服务价值估算理论,并结合中国土地生态系统的特点,制定了中国陆地生态系统单位面积生态服务价值表,这将为不同土地利

表 5 2019—2025 年河北省土地生态安全预测结果

Table 5 Prediction results of land ecological security in Hebei Province from 2019 to 2025

年份 Year	压力指数 Press index	状态指数 Status index	响应指数 Response index	综合指数 Comprehensive index	安全状态 Security state	预警等级 Warning level
2019	0.566	0.758	0.618	0.659	敏感级 Sensitivity	中警 Moderate warning
2020	0.568	0.784	0.693	0.697	敏感级 Sensitivity	中警 Moderate warning
2021	0.525	0.824	0.750	0.719	敏感级 Sensitivity	中警 Moderate warning
2022	0.548	0.887	0.753	0.747	敏感级 Sensitivity	中警 Moderate warning
2023	0.586	0.934	0.774	0.782	较安全级 Less security	轻警 Slight warning
2024	0.582	0.968	0.823	0.811	较安全级 Less security	轻警 Slight warning
2025	0.574	1.010	0.855	0.834	较安全级 Less security	轻警 Slight warning

表 6 河北省土地生态安全预测误差分析

Table 6 Error analysis of prediction about land ecological security in Hebei Province

年份 Year	综合指数原始值 Original value of comprehensive index	综合指数预测值 Predicted value of comprehensive index	残差 Residual	相对误差 Relative error
2010	0.300	0.300	0.000	0.000
2011	0.336	0.357	-0.021	-0.061
2012	0.371	0.397	-0.026	-0.070
2013	0.438	0.432	0.006	0.013
2014	0.483	0.475	0.008	0.016
2015	0.508	0.518	-0.010	-0.019
2016	0.574	0.553	0.021	0.037
2017	0.617	0.587	0.030	0.048
2018	0.611	0.624	-0.013	-0.021

<http://www.ecoagri.ac.cn>

用类型的生态服务价值的估算提供参考。因此, 以后的研究将对不同土地利用类型的生态服务价值进行量化, 将其作为表征生态状态的指标, 进一步完善 PSR 评价指标体系。另外, 土地生态系统所面临的压力和所处状态以及人类应对土地生态变化所做出的调控措施均处于动态变化之中, 土地生态安全预警是一个动态过程。因此, 评价指标数据库应该定期更新, 以提高指标的兼容性和灵活适应性。

4.2.2 进一步融入多种建模方法, 建立集成式预警系统

本文分别采用投影寻踪模型和马尔科夫预测模型对土地生态安全状况进行评价和预测, 指标赋权方式为客观赋权, 评价和预测模型相对单一。由于土地生态安全受到土地生态系统内部和外部多种因素的影响, 诸多因素具有各自的特点和动态机制, 需要选用不同的建模方法。另外, 在不同情况下, 不同方法均有优劣, 应当结合实际情况及数据本身而选择最适宜的方法。因此, 可以尝试应用多种方法进行土地生态安全的比较研究。国内外也有相关方面的研究, 周迎雪等^[45]分别运用物元模型、TOPSIS 模型和综合指数模型对 2013 年山东半岛经济区 7 市的土地生态安全水平进行对比评价。因此, 本研究接下来将选用不同的评价模型和预测模型, 将客观赋权与主观赋权相结合, 将更多的建模方法和专家知识融入到预警系统中, 建立集成式预警系统, 实现多模型对比和优化选择, 以提高土地生态安全评价、预测和预警的精度。

4.2.3 进一步融合其他信息技术, 建立完整的预警平台

本文开发的预警系统实质是预警信息处理子系统, 对于生态数据如何采集和应对存在的风险如何处理没有进行深入的研究。一个完整的土地生态安全预警平台应该是包含多源生态数据采集子系统、动态监测及预警子系统以及预警对策子系统在内的基于网络的应用和管理信息系统。数据采集子系统是利用遥感、实地测量等手段获取不同尺度、不同生态层面的基础数据; 动态监测及预警子系统通过多种模型对土地生态安全状态及其动态演替过程进行评价和预测, 并预报警情等级; 预警对策子系统根据警情等级发出警报和提供辅助决策, 提醒有关部门积极采取有效措施, 予以控制和防范。孙凡等^[46]详细阐述了重庆市生态安全监测和预警平台构建的原理和方法。因此, 本研究接下来将尝试融合 3S 等技术手段进一步开发多源生态数据采集子系统和预

警对策子系统, 并通过互联网实现信息传输和共享, 以构建完整的土地生态安全预警平台。

参考文献 References

- [1] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8-20
CHEN X, ZHOU C H. Review of the studies on ecological security[J]. Progress in Geography, 2005, 24(6): 8-20
- [2] COSTANZA R. Ecosystem health and ecological engineering[J]. Ecological Engineering, 2012, 45(8): 24-29
- [3] 李昊, 李世平, 银敏华. 中国土地生态安全研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 50-56
LI H, LI S P, YIN M H. Research progress and prospect of land ecological security in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(9): 50-56
- [4] HUGHEY K F D, CULLEN R, KERR G N, et al. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment[J]. Journal of environmental management, 2004, 70(1): 85-93
- [5] 杨春红, 张正栋, 田楠楠, 等. 基于 P-S-R 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209-214
YANG C H, ZHANG Z D, TIAN N N, et al. Evaluation on land ecological security in Shantou based on P-S-R model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 209-214
- [6] 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
ZHANG X H, LEI G P, YUAN L, et al. Evaluation on ecological security of land based on entropy weight and matter-element model: A case study of Heilongjiang Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2009, 19(1): 88-93
- [7] 黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 316-322
HUANG H L, LUO W B, WU C F, et al. Evaluation of land eco-security based on matter element analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 316-322
- [8] AGYEMANG I, MCDONALD A, CARVER S. Application of the DPSIR framework to environmental degradation assessment in northern Ghana[J]. Natural Resources Forum, 2007, 31(3): 212-225
- [9] 卢涛, 王占岐, 魏超, 等. 基于 DPSIR 模型的合肥市土地生态安全物元分析评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 221-227
LU T, WANG Z Q, WEI C, et al. Evaluation of land ecological security of Hefei City based on the DPSIR model and matter element analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(4): 221-227
- [10] 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(5): 77-85
ZHANG H B, LIU L M. Main progress and prospects of land resource ecological security research[J]. Progress in Geography, 2006(5): 77-85
- [11] 韩美, 高桂芹. 山东省枣庄市中区土地资源生态安全评

- 价[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 161-164
HAN M, GAO G Q. Evaluation of ecological security of land resources in central district of Zaozhuang City, Shandong Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15 (3): 161-164
- [12] 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, 15(1): 234-238
SUN Q Q, SONG G, QI M L. Analysis of and ecological safety evaluation of Harbin City based on principal component analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 15(1): 234-238
- [13] 李红丹, 郭海峰, 任家强, 等. 基于熵值法的桓仁山区生态友好型土地利用评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(S2): 111-114
LI H D, GUO H F, REN J Q, et al. Evaluation on eco-friendly land use in Huanren mountainous area with entropy-based method[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(S2): 111-114
- [14] 李红霞, 李霖, 赵忠君, 等. 投影寻踪法的土地生态安全评价[J]. 测绘科学, 2011, 36(6): 67-69
LI H X, LI L, ZHAO Z J, et al. Assessment of land ecological security based on projection pursuit method[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(6): 67-69
- [15] 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
SUN D L, ZHANG F T. Dynamic evolution of land ecological security based on DPSIR-grey correlation model in Chongqing City[J]. Bulletin of Soil Water Conservation, 2016, 36(5): 191-197
- [16] 李佩武, 李贵才, 张金花, 等. 深圳城市生态安全评价与预测[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 245-252
LI P W, LI G C, ZHANG J H, et al. Ecological security assessment and prediction for Shenzhen[J]. Progress in Geography, 2009, 28(2): 245-252
- [17] 张凤太, 王腊春, 苏维词. 基于物元分析-DPSIR 概念模型的重庆土地生态安全评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3126-3134
ZHANG F T, WANG L C, SU W C. Evaluation of land ecological security in Chongqing based on the matter-element analysis-DPSIR model[J]. China Environment Science, 2016, 36(10): 3126-3134
- [18] 刘宝涛, 王鑫淼, 刘帅, 等. 基于正态云模型的吉林省耕地生态安全诊断[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(3): 119-124
LIU B T, WANG X M, LIU S, et al. Diagnosis on cultivated land ecological security in Jilin Province based on normal cloud model[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(3): 119-124
- [19] 陈章. 基于生态足迹的土地生态安全综合评价模型构建及应用[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019
CHEN Z. Construction and application of model for evaluating land ecological security based on ecological footprint[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019
- [20] 李钊, 张永福, 张景路. 干旱区绿洲县域土地利用规划中土地生态安全预测——以新疆阿瓦提县为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 148-151
LI Z, ZHANG Y F, ZHANG J L. Forecast of the land ecological security at county level in the arid oasis based on planning of land utilization — A case Study of Awati in Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6): 148-151
- [21] 魏衍英. 扬州市土地生态安全评价及趋势预测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014
WEI Y Y. Research on land ecological security assessment and prediction of Yangzhou[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014
- [22] 陈英, 孔喆, 路正, 等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 264-270
CHEN Y, KONG Z, LU Z, et al. Land ecological security early-warning based on RBF neural network — A case of Zhangye in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 264-270
- [23] 李悦, 张合兵, 张小虎, 等. 基于熵值法和灰色预测模型的城市土地生态安全评价[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 242-247
LI Y, ZHANG H B, ZHANG X H, et al. Evaluation on ecological security of urban land based on entropy method and grey prediction model[J]. Environment Science & Technology, 2015, 38(12): 242-247
- [24] 孙丕苓, 杨海娟, 刘庆果. 南水北调重要水源地的土地生态安全动态研究——以陕西省商洛市为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1520-1530
SUN P L, YANG H J, LIU Q G. Study on dynamic security of land ecology in water source area of south-to-north water diversion project: A case study of Shangluo City, Shaanxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(9): 1520-1530
- [25] 刘欣, 葛京凤, 冯现辉. 河北太行山区土地资源生态安全研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007(5): 68-74
LIU X, GE J F, FENG X H. Study on ecological security of land resources in Taihang Mountain, Hebei[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007(5): 68-74
- [26] 李春燕, 南灵. 陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J]. 中国土地科学, 2015, 29(4): 72-81
LI C Y, NAN L. Dynamic evaluation and diagnosis of obstacle factors on land eco-security in Shaanxi Province[J]. China Land Sciences, 2015, 29(4): 72-81
- [27] 王磊, 郭灿, 李慧明. 基于 PSR-TOPSIS 模型的宁夏回族自治区土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 154-159
WANG L, GUO C, LI H M. Evaluation of land security in Ningxia Hui Autonomous Region based on PSR-TOPSIS model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 154-159
- [28] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 等. 基于 RS 和 GIS 的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 928-935
LYU J S, WU Q Y, ZHANG Z L, et al. Land use change and ecological security assessment in Jining City based on RS and GIS[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 928-935

- [29] FENG Y J, YANG Q Q, TONG X H, et al. Evaluating land ecological security and examining its relationships with driving factors using GIS and generalized additive model[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1469–1479
- [30] LIU C X, WU X L, WANG L. Analysis on land ecological security change and affect factors using RS and GWR in the Danjiangkou Reservoir Area, China[J]. *Applied Geography*, 2019, 105: 1–14
- [31] 庄伟, 廖和平, 杨伟, 等. 城郊土地生态安全预警系统设计与关键技术研究——以重庆市长生桥镇为例[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(2): 117–123
ZHUANG W, LIAO H P, YANG W, et al. Research of the design of an early warning system for land ecological security of suburb areas and its key technology — A case study of Changshengqiao Town in Chongqing[J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2014, 36(2): 117–123
- [32] 张旭东, 王传全, 迟道才, 等. 基于 Matlab GUI 的滴灌毛管优化设计程序研究[J]. *节水灌溉*, 2016(9): 166–168
ZHANG X D, WANG C Q, CHI D C, et al. Optimal design program of drip-irrigation tape based on Matlab GUI[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(9): 166–168
- [33] 朱飞宇, 徐志宇, 黄国辉. 基于 Matlab GUI 的三容水箱液位实时监控系统设计[J]. *实验室研究与探索*, 2017, 36(9): 83–86
ZHU F Y, XU Z Y, HUANG G H. A design for the real-time liquid level monitoring system based on Matlab GUI[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2017, 36(9): 83–86
- [34] 于文涛, 徐传波, 王秋实. 基于 Matlab GUI 的机车车轴强度的初步评价系统[J]. *中国工程机械学报*, 2018, 16(1): 69–74
YU W T, XU C B, WANG Q S. A preliminary evaluation system of locomotive axles based on Matlab GUI[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2018, 16(1): 69–74
- [35] 张成, 尚国珩, 黄芳芳, 等. 基于 MATLAB GUI 的生态压力预警系统设计与实现[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(5): 200–205
ZHANG C, SHANG G B, HUANG F F. Design and implementation of the ecological pressure warning system based on MATLAB GUI[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(5): 200–205
- [36] 魏兴萍. 基于 PSR 模型的三峡库区重庆段生态安全动态评价[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1095–1099
WEI X P. Ecological safety evaluation of Three Gorges Reservoir Area in Chongqing with the pressure-state-response model[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1095–1099
- [37] YE H, MA Y, DONG L M. Land ecological security assessment for Bai Autonomous Prefecture of Dali based using PSR model with data in 2009 as case[J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 2172–2177
- [38] 何新, 姜广辉, 张瑞娟, 等. 基于 PSR 模型的土地生态系统健康时空变化分析——以北京市平谷区为例[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(12): 2057–2068
HE X, JIANG G H, ZHANG R J, et al. Temporal and spatial variation of land ecosystem health based on the pressure-state-response model: A case study of Pinggu District, Beijing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(12): 2057–2068
- [39] LI S. Evaluation on urban land ecological security based on the PSR model and matter-element analysis: A case study of Zhuhai, Guangdong, China[J]. *Journal of Landscape Research*, 2019, 11(3): 82–88
- [40] 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
JIAO H, WANG Y. Land ecological security evaluation in JIAMUSI based on PSR model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(11): 29–36
- [41] 于淑会, 周向莉, 卿冀川, 等. 河北滨海盐碱土地生态安全评价[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(5): 778–786
YU S H, ZHOU X L, QING J C, et al. Evaluation of ecological security of coastal saline land in Hebei[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(5): 778–786
- [42] 任志远, 孙艺杰, 吴林筱. 1990—2012 年榆林市土地生态风险综合评价[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(5): 656–664
REN Z Y, SUN Y J, WU L X. Comprehensive evaluation of ecological risk of land during 1990–2012 in Yulin City[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(5): 656–664
- [43] 余文波, 蔡海生, 张莹, 等. 湖北省土地生态安全预警评价及调控[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(2): 189–196
YU W B, CAI H S, ZHANG Y, et al. Early-warning and regulation of land ecological security: A case study of Hubei Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(2): 189–196
- [44] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189–196
XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189–196
- [45] 周迎雪, 李贻学, 孙仪阳, 等. 基于不同评价模型的土地生态安全评价——以山东半岛蓝色经济区为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(S2): 207–210
ZHOU Y X, LI Y X, SUN Y Y, et al. Evaluation of land eco-security based on different evaluation model: A case in Shandong Peninsula Blue Economic Zone[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(S2): 207–210
- [46] 孙凡, 赵靖明, 张富华, 等. 重庆市生态质量监测评价及生态安全的预警系统构建研究[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(12): 81–86
SUN F, ZHAO J M, ZHANG F H, et al. Construction of ecological quality monitoring, evaluation, and ecological security early warning system for Chongqing City[J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2012, 34(12): 81–86