

# 基于熵值法和灰色预测模型的耕地生态安全诊断

郑华伟<sup>1,2</sup>, 夏梦蕾<sup>1</sup>, 张锐<sup>2</sup>, 刘友兆<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学 农村发展学院, 江苏 南京 210095; 2. 南京农业大学 公共管理学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** [目的] 弥补已有耕地生态安全诊断中指标体系及评价方法的不足, 分析耕地生态安全水平。[方法] 在界定耕地生态安全内涵的基础上, 构建了基于 PSR 模型的评价指标体系, 采用熵值法和灰色预测模型, 对四川省耕地生态安全水平进行了诊断。[结果] 1999—2013 年四川省耕地生态安全水平总体不断提高, 耕地生态安全等级经历了“临界安全—较安全”的演变历程, 但 2013 年“较安全”水平不高; 压力指数总体上呈现下降趋势, 状态指数呈现波动下降趋势, 响应指数呈现上升趋势; 单位耕地化肥负荷、人均耕地面积、单位耕地农药负荷、土地垦殖率、水土流失程度等是耕地生态安全等级提升的关键制约因素; 2014—2018 年四川省耕地生态安全水平呈现稳步上升趋势。[结论] 基于 PSR 模型的评价指标体系能更准确地反映耕地生态安全各要素之间的关系; 熵值法和灰色预测模型能有效挖掘耕地生态安全存在的问题, 适用于耕地生态安全评价。

**关键词:** 耕地生态安全; 灰色预测模型; 熵值法; PSR 模型; 四川省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0284-06

中图分类号: F301

**文献参数:** 郑华伟, 夏梦蕾, 张锐, 等. 基于熵值法和灰色预测模型的耕地生态安全诊断[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 284-289. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.049

## Diagnosis on Ecological Security of Cultivated Land Based on Entropy Method and Grey Prediction Model

ZHENG Huawei<sup>1,2</sup>, XIA Menglei<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, LIU Youzhao<sup>2</sup>

(1. College of Rural Development, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China;

2. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** [Objective] To compensate for the defects in the evaluation index system and the used methods in the diagnosis on the cultivated land ecological security in order to analyze the ecological security level of cultivated land. [Methods] On the basis of defining the cultivated land ecological security, the evaluation index system for cultivated land ecological security was developed using the PSR (pressure-state-response) model, and then an empirical analysis was conducted in Sichuan Province by entropy method and grey prediction model. [Results] The ecological security of cultivated land in Sichuan Province was gradually improved from critically safe to safer level from 1999 to 2013, but the level of “safer” was not high in 2013. The pressure index and status index generally showed a downward trend, while the response indexes showed an upward trend. Crucial constraints on the improvement of cultivated land ecological security include fertilizer load per unit of cultivated land, cultivated land per capita, pesticides load per unit of cultivated land, land reclamation rate and soil erosion. The ecological security level of cultivated land in Sichuan Province would show a steady upward trend from 2014 to 2018. [Conclusion] These methods are suitable in the evaluation of cultivated land ecological security because the evaluation index system based on the PSR model can accurately reflect the relationship among various elements of the cultivated land ecological security, while the entropy method and grey prediction model can detect the problems in the cultivated land ecological security.

**Keywords:** ecological security of cultivated land; grey prediction model; entropy method; PSR model; Sichuan Province

收稿日期: 2015-10-30

修回日期: 2015-12-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“农村土地整治生态风险管控研究”(71403130); 江苏省国土资源科技项目(201320); 南京农业大学中央高校基本科研业务费人文社会科学研究基金面上项目(SK2014008); 南京农业大学人文社会科学重大招标项目(SKZD201302)

第一作者: 郑华伟(1985—), 男(汉族), 江苏省涟水县人, 博士, 讲师, 主要从事土地利用与乡村发展教学和研究。E-mail: huaweizheng2008@163.com。

耕地资源作为最宝贵的自然资源之一,是非常重要的农业生产资料,经过人类长期的干预,耕地生态系统逐渐演变成成为具有高度耦合性的社会—经济—生态复合系统<sup>[1-3]</sup>。伴随着经济社会的快速发展,工业化、城镇化和现代化建设进程快速推进,导致土地生态环境日趋恶化、土地污染负荷加重、土地质量下降等一系列问题,耕地资源的稀缺性增强,耕地生态安全问题日渐凸显<sup>[3-5]</sup>。因此,开展耕地生态安全水平诊断研究,优化耕地生态安全的改善路径,对于加强农村生态文明建设,保障中国粮食安全,维护国家生态安全,促进社会经济可持续发展具有重要的理论意义和现实意义<sup>[2,6]</sup>。

国外学者主要将耕地生态安全与可持续利用相结合进行系统研究,Rasul 和 Thapa 从农业生态环境、社会经济方面构建了评价指标体系,分析了孟加拉的耕地可持续利用与生态状况<sup>[7]</sup>;Mark 等<sup>[8]</sup>运用磷肥厂附近的耕地土壤与蔬菜样本中天然放射性评估化肥厂对周围环境的潜在放射性影响。在国内,专家学者关于耕地生态安全的研究主要集中在内涵<sup>[2,9-10]</sup>,评价<sup>[3,11-13]</sup>,影响因素<sup>[11]</sup>,调控对策<sup>[12-13]</sup>等。从总体上来说,耕地生态安全水平诊断研究目前处于起步阶段,定性研究相对较多、定量分析较少;耕地生态安全评价是对耕地生态系统的全面诊断,包括耕地资源负荷、经济社会发展、耕地产出水平、生态环境质量、政策管理水平等方面的内容,但现有的耕地生态安全评价指标多集中于资源与环境状况,很少综合考虑人类活动、社会经济等对耕地生态安全诊断的作用。从研究方法上看,已有的研究主要采用层次分析法、综合评价法、物元分析法等,上述方法均以某个区域或多个区域一年或多年数据为基础,进行综合评价或研究方法优化比较分析,缺少对耕地生态安全动态发展的研究<sup>[14]</sup>。此外,耕地生态安全评价指标权重的确定多采用德尔菲法、层次分析法等,此类方法虽因研究较为成熟而被广泛应用,但评价指标权重的赋予多带有主观因素,常常因选取专家的不同而差异较大,使分析结果趋于不稳定<sup>[2]</sup>。

灰色预测模型 GM(1,1)对研究对象的信息量要求较小,预测模型精度较高,是比较理想的预测方法<sup>[4]</sup>。熵值法根据评价指标的离散程度,用信息熵测算评价指标的权重,能够克服一些主观赋值法所带来的结果不稳定现象<sup>[2]</sup>。鉴于此,本研究拟构建基于 PSR(pressure-state-response)模型的耕地生态安全评价指标体系,建立基于灰色预测模型和改进熵值法的耕地生态安全评价模型,并以四川省为例进行实证研究,开展耕地生态安全状况的未来变化趋势预测,

以期改善耕地生态系统状况、提高耕地生态安全水平、促进耕地资源可持续利用提供一定的参考依据。

## 1 区域概况与数据来源

四川省地处长江上游,东与重庆市接壤,南与云南、贵州省相连,西邻西藏自治区,北接青海、甘肃、陕西省。辖区东西长约 1 075 km,南北宽约 921 km,幅员面积  $4.85 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,为中国第 5 大省区。四川省自然资源丰富,光热条件好,是中国重要的农业经济区和粮食主产区,承担着国家粮食安全重任<sup>[15]</sup>。然而随着经济社会的快速发展,建设用地面积不断增加,耕地资源不断减少,耕地生态功能下降,土壤污染加剧,耕地生态系统安全状况亟待改善。

耕地生态安全评价指标数据主要来源于《四川农村统计年鉴(2000—2014)》《四川统计年鉴(2000—2014)》《中国统计年鉴(2000—2014)》《中国农村统计年鉴(2000—2014)》《中国农业年鉴(2000—2014)》和四川省土地利用变更调查数据等。

## 2 研究方法

### 2.1 指标体系构建

耕地生态系统是人类在长期的使用中使耕地资源在自身组织功能的作用下形成的人工生态系统,该系统不仅提供人类稳定的农产品,而且形成了一种新的生物生存环境,促进了生物多样性的存续与发展,同时还具有生态环境保护等功能<sup>[16]</sup>。耕地生态安全是指在一定的时间和空间尺度内,耕地生态系统处于保持自身正常功能结构和满足社会经济可持续发展需要的状态<sup>[10,12-13]</sup>。耕地生态安全评价是以耕地生态系统为评价对象,对一定时间、一定区域的自然生态要素、社会经济要素进行综合评价,它本质上是一种诊断评价<sup>[15]</sup>。

PSR 概念模型是由联合国 OECD 和 UNEP 提出的<sup>[17]</sup>,该模型以因果关系为基础,主要目的是诊断生态系统的持续性,剖析生态系统内在的因果关系,构建人类活动与生态环境影响的因果链,得到较为普遍的认可与应用<sup>[18-19]</sup>。因此,本文借鉴 PSR 概念模型作为耕地生态安全评价指标体系的基本框架:人口增长、经济社会发展给耕地生态系统带来一定的压力(P);人类不断利用土地资源,通过社会经济活动向耕地生态系统排放污染,改变了耕地生态系统结构与功能(S);压力之下,耕地生态系统在原有状态基础上做出调整,同时反馈于社会经济的发展过程;人类对耕地生态系统的反馈进一步做出响应(R),进行政

策调整、环境保护等,改善耕地生态系统状态,使之保持良好的结构与功能,进而实现可持续发展。

根据耕地生态安全评价指标体系的基本框架,遵

循科学性原则、可比性原则、可获取性原则、系统性原则等<sup>[15,18]</sup>,在参考现有研究成果的基础上<sup>[3,7,11-13]</sup>,构

建基于 PSR 模型的评价指标体系(表 1)。

表 1 耕地生态安全评价指标体系及权重

| 目标层    | 准则层 | 指标层                                    | 评价函数             | 权重      |
|--------|-----|--|------------------|---------|
| 耕地生态安全 | 压力  | 人口密度 $x_1/(人 \cdot km^{-2})$           | 总人口除以土地总面积       | 0.058 5 |
|        |     | 人口自然增长率 $x_2/\%$                       | —                | 0.051 2 |
|        |     | 城市化水平 $x_3/\%$                         | 非农业人口除以总人口       | 0.059 2 |
|        |     | 单位耕地化肥负荷 $x_4/(kg \cdot hm^{-2})$      | 化肥施用量除以耕地面积      | 0.060 9 |
|        |     | 人均耕地面积 $x_5(hm^2/人)$                   | 耕地面积除以总人口        | 0.055 4 |
|        |     | 单位耕地农药负荷 $x_6/(kg \cdot hm^{-2})$      | 农药施用量除以耕地面积      | 0.061 4 |
|        | 状态  | 人均水资源量 $x_7(m^3/人)$                    | —                | 0.051 8 |
|        |     | 土地垦殖率 $x_8/\%$                         | 耕地面积除以土地总面积      | 0.054 2 |
|        |     | 耕地粮食单产 $x_9/(kg \cdot hm^{-2})$        | 粮食总产除以耕地面积       | 0.078 0 |
|        |     | 灾害指数 $x_{10}/\%$                       | 成灾面积除以农作物播种面积    | 0.055 9 |
|        |     | 水土流失程度 $x_{11}/\%$                     | 水土流失面积除以土地总面积    | 0.062 7 |
|        |     | 森林覆盖率 $x_{12}/\%$                      | —                | 0.059 5 |
|        | 响应  | 农民人均纯收入 $x_{13}(元/人)$                  | —                | 0.054 5 |
|        |     | 有效灌溉面积比 $x_{14}/\%$                    | 有效灌溉面积除以耕地面积     | 0.068 0 |
|        |     | 单位耕地农业机械动力 $x_{15}/(kW \cdot hm^{-2})$ | 农业机械动力除以耕地面积     | 0.056 7 |
|        |     | 教育投资强度 $x_{16}/\%$                     | 教育投资量除以财政支出总量    | 0.055 2 |
|        |     | 水土流失治理率 $x_{17}/\%$                    | 水土流失治理面积除以水土流失面积 | 0.056 9 |

## 2.2 评价模型建立

2.2.1 标准化处理 本研究采用极差法对耕地生态安全评价指标数据进行标准化处理<sup>[5]</sup>,计算公式具体如下:

正向作用指标:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \min X_j) / (\max X_j - \min X_j) \quad (1)$$

负向作用指标:

$$X'_{ij} = (\max X_j - X_{ij}) / (\max X_j - \min X_j) \quad (2)$$

式中: $X_{ij}$ 和 $X'_{ij}$ ——第 $i$ 年第 $j$ 项指标的原始值和标准化值; $\min X_j, \max X_j$ ——耕地生态安全诊断中第 $j$ 项评价指标的标准最小值、标准最大值(表 2)。标准值(安全值、不安全值)的确定主要参考国家、行业或国际相关标准及各种规划指标(如单位耕地化肥负荷、人均耕地面积、单位耕地农药负荷、灾害指数、人口自然增长率等),科学研究的判定标准(如城市化水平、森林覆盖率等),研究区域本底背景值(如水土流失治理率、单位耕地农业机械动力、耕地粮食单产、土地垦殖率、水土流失程度、农民人均纯收入、有效灌溉面积比等)<sup>[10,15,20]</sup>。

2.2.2 指标权重确定 对于耕地生态安全水平,不同评价指标的影响程度存在一定的差异,为了体现这种差异性,需要对评价指标赋以一定的权重,本研究采用改进的熵值法来确定耕地生态安全评价指标权重(表 1),主要步骤如下<sup>[15,21]</sup>:

(1) 评价指标标准化处理。由于耕地生态安全水平诊断中不同的评价指标具有不一样的量纲和单位,为了消除量纲和单位的差异所带来的不可公度性,需要对评价指标数据开展标准化变换<sup>[15]</sup>:

$$X''_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_j) / s_j \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

式中: $X''_{ij}$ ——标准化后的指标值; $\bar{X}_j$ ——第 $j$ 项指标的均值; $s_j$ ——第 $j$ 项指标的标准差。

(2) 为了清除负数,进行坐标平移:

$$X'''_{ij} = H + X''_{ij}$$

式中: $X'''_{ij}$ ——平移后的指标值; $H$ ——指标平移的幅度。

(3) 计算第 $j$ 项指标下的 $i$ 个样本值的比重 $P_{ij}$ :

$$P_{ij} = X'''_{ij} / \sum_{i=1}^m X'''_{ij}。$$

(4) 计算第 $j$ 项指标的熵值: $e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij})$ ,其中 $k > 0, \ln$ 为自然对数, $e_j > 0$ 。如果 $X'''_{ij}$ 对于给定的 $j$ 全部相等,那么 $P_{ij} = X'''_{ij} / \sum_{i=1}^m X'''_{ij} = 1/m$ ,此时 $e_j$

取极大值,即 $e_j = -k \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \ln \frac{1}{m} = k \ln m$ 。若设 $k = 1/\ln m, e_j = 1$ ,则 $0 \leq e_j \leq 1$ 。

(5) 计算第 $j$ 项指标的差异性系数 $g_j: g_j = 1 - e_j$

(6) 定义第 $j$ 项指标的权重 $\omega_{ij}: \omega_{ij} = g_j / \sum_{i=1}^m g_j, j=1,2,\dots,n$ 。

表 2 耕地生态安全评价指标标准值

| 目标层    | 准则层 | 指标层  | 标准值   |       |
|--------|-----|--|-------|-------|
|        |     |  | 安全值   | 不安全值  |
| 耕地生态安全 | 压力  | 人口密度 $x_1 / (\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$           | 150   | 800   |
|        |     | 人口自然增长率 $x_2 / \%$                                     | 2     | 25    |
|        |     | 城市化水平 $x_3 / \%$                                       | 70    | 10    |
|        |     | 单位耕地化肥负荷 $x_4 / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$      | 225   | 800   |
|        |     | 人均耕地面积 $x_5 / (\text{hm}^2 / \text{人})$                | 0.100 | 0.053 |
|        |     | 单位耕地农药负荷 $x_6 / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$      | 3     | 24    |
|        | 状态  | 人均水资源量 $x_7 / (\text{m}^3 / \text{人})$                 | 3 900 | 1 200 |
|        |     | 土地垦殖率 $x_8 / \%$                                       | 30    | 10    |
|        |     | 耕地粮食单产 $x_9 / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$        | 9 000 | 2 000 |
|        |     | 灾害指数 $x_{10} / \%$                                     | 0.65  | 35    |
|        |     | 水土流失程度 $x_{11} / \%$                                   | 15    | 60    |
|        |     | 森林覆盖率 $x_{12} / \%$                                    | 40    | 10    |
|        | 响应  | 农民人均纯收入 $x_{13} / (\text{元} / \text{人})$               | 8 000 | 1 500 |
|        |     | 有效灌溉面积比 $x_{14} / \%$                                  | 75    | 40    |
|        |     | 单位耕地农业机械动力 $x_{15} / (\text{kW} \cdot \text{hm}^{-2})$ | 10    | 2     |
|        |     | 教育投资强度 $x_{16} / \%$                                   | 30    | 5     |
|        |     | 水土流失治理率 $x_{17} / \%$                                  | 60    | 10    |

2.2.3 计算综合指数 本研究采用综合指数模型对耕地生态安全水平进行评价,综合指数模型<sup>[2,5]</sup>的表达式为:

$$F = \sum_{i=1}^3 \omega_i \cdot \left( \sum_{j=1}^n X'_{ij} \cdot \omega_{ij} \right) \quad (4)$$

式中: $F$ ——耕地生态安全综合指数; $\omega_i$ ——第  $i$  子系统(压力、状态、响应)权重; $\omega_{ij}$ ——第  $i$  子系统第  $j$  项指标( $x_1$ — $x_{17}$ )权重; $n$ ——第  $i$  子系统所包含的指标数。 $F$  越接近 0,表示耕地生态安全水平越低。

在借鉴国内外生态系统安全等级划分的基础上,将耕地生态安全水平级别分为 5 个等级,具体包括安全、较安全、临界安全、较不安全和不安全(表 3)。

表 3 耕地生态安全分级标准

| 综合指数 | 0.8~1.0 | 0.6~0.8 | 0.4~0.6 | 0.2~0.4 | 0~0.2 |
|------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 等级   | 安全      | 较安全     | 临界安全    | 较不安全    | 不安全   |

## 2.3 灰色预测模型

灰色系统理论是由华中理工大学邓聚龙教授于 1982 年提出并加以发展的<sup>[4]</sup>,灰色预测模型是对灰色系统所做的预测,它是通过少量的、不完全的信息,建立数学模型并做出预测的一种预测方法<sup>[22-24]</sup>。灰色预测模型 GM(1,1)的建模步骤如下<sup>[14,23]</sup>:

(1) 收集原始数据形成数列  $x^{(0)}$ ,对原始数列作一次累加生成处理,得到一个新的数列  $x^{(1)}$ ;

(2) 将新数列  $x^{(1)}$  的变化趋势近似地用微分方程描述:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (5)$$

式中: $a, u$ ——辨识参数,辨识参数通过最小二乘法拟合得到。

(3) 建立矩阵  $\mathbf{B}, \mathbf{Y}_N$ , 计算:

$$\hat{a} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_N = [a, u]^T$$

(4) 得到预测模型:

$$x^{(1)}(t+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (6)$$

(5) 开展精度检验(残差检验、后验差检验),检验过程具体参见参考文献[23]。GM(1,1)模型的检验通过后验差检验即对残差分布的统计特性来判断效果,通过方差比  $C$  和小残差概率  $P$  的值来判断<sup>[4,24]</sup>(表 4)。若模型通过检验,利用灰色预测模型 GM(1,1)进行预测;否则,建立残差模型对其进行修正。

表 4 后验差检验判别参照表

| 检验指标      | 优     | 合格    | 勉强合格  | 不合格   |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 小残差概率 $P$ | >0.95 | >0.80 | >0.70 | <0.70 |
| 方差比 $C$   | <0.35 | <0.50 | <0.65 | >0.65 |

## 3 结果与分析

收集、整理四川省耕地生态安全诊断中评价指标的数据,运用改进的熵值法计算各评价指标的权重,在此基础上根据评价模型测算四川省耕地生态安全水平、分类指标水平(图 1)。

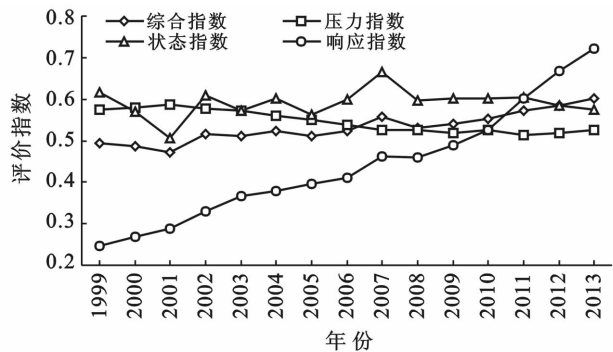


图1 四川省耕地生态安全评价结果

### 3.1 综合评价结果

从四川省耕地生态安全综合指数变化走势来看(图1),1999—2013年四川省耕地生态安全综合指数总体处于改善上升趋势,耕地生态系统安全状况将会得到进一步改善。四川省耕地生态安全综合指数由1999年的0.4941提高到2013年的0.6005,耕地生态安全不断好转,年均增长率达到1.5378%,表明耕地生态安全水平不断提高。根据耕地生态安全分级标准(表3),四川省耕地生态安全等级由1999年的“临界安全”转变为2013年的“较安全”。

从耕地生态安全评价指标来看,1999—2013年大部分指标发生水平等级跳跃,单位耕地农业机械动力、灾害指数、农民人均纯收入、有效灌溉面积比、水土流失治理率、耕地粮食单产等指标出现不同水平等级的上升趋势,说明以上评价指标对四川省耕地生态安全水平的提升有重要的贡献。研究发现:1999年以来四川省经济社会不断发展,农民收入水平持续提升,耕地生态保护意识逐步强化;持续开展农田基础设施建设,深入推进农村土地整治,加大中低产田改造力度,有效改善农业生产条件;逐步增加农业科技投入,加强农业技术推广普及,积极开展农民科技培训,有效提升耕地粮食单产水平;大力开展生态文明建设,加大生态环境保护建设的力度,有效加强水土流失治理,水土流失治理率不断增加,促进了耕地生态系统安全状况改善。

但2013年四川省耕地生态安全水平不高,有待于进一步改善四川省耕地生态系统安全状况;从评价指标来看,四川省耕地生态安全水平提升的障碍因素主要包括单位耕地化肥负荷、人均耕地面积、单位耕地农药负荷、土地垦殖率、水土流失程度等。研究发现,虽然四川省持续开展水土流失综合治理,但由于易水土流失区域较大,且存在反复的现象,目前四川省水土流失比例仍然较高,还需大力推进水土流失治理,有效保护土地资源。随着经济社会的快速发展,

四川省国内生产总值持续增长,但这种高速增长是以资源高消耗为代价的,建设用地面积不断增加,耕地面积不断减少,土地集约利用水平不高。与此同时,单位面积耕地农药施用量、单位面积耕地化肥施用量不断增加。

### 3.2 分类指标对比

四川省1999—2013年压力指数总体上呈现下降趋势,从1999年的0.5742下降到2013年的0.5253,表明四川省耕地生态系统压力现状有所恶化(负向指标,数值越小,生态压力相对越大)<sup>[2]</sup>,人类对耕地生态系统的干扰有所强化。根据曲线的形状可以将压力指数的变化分为5个阶段:第1阶段是1999—2001年压力指数处于上升趋势,年均增长率为1.2049%;第2阶段是2001—2009年压力指数处于下降趋势,年均递减率为1.4925%;第3阶段是2009—2010年压力指数处于上升趋势,年均增长率为1.5225%;第4阶段是2010—2011年压力指数处于下降趋势,年均递减率为2.2425%;第5阶段是2011—2013年压力指数处于上升趋势,年均增长率为1.1143%。由此可见,随着经济社会的持续发展,耕地生态系统的压力不断增加,但近年来压力有所缓解。状态指数呈波动下降趋势,2013年状态指数是1999年的0.9330倍,年均递减率为0.4784%。响应指数逐年增大,发展水平迅速提高,2013年响应指数是1999年的2.9178倍,年均增长率达到13.6985%,增长幅度较大。

### 3.3 模型预测结果

以图1中1999—2013年四川省耕地生态安全综合指数作为原始数据,构成数列 $x^{(0)}$ ,对原始数列作一次累加生成处理,得到一个新的数列 $x^{(1)}$ ,构造矩阵 $B, Y_N$ :

$$B = \begin{bmatrix} -0.7370 & 1 \\ -1.2156 & 1 \\ -1.7097 & 1 \\ -2.2240 & 1 \\ -2.7409 & 1 \\ -3.2572 & 1 \\ -3.7744 & 1 \\ -4.3135 & 1 \\ -4.8599 & 1 \\ -5.3954 & 1 \\ -5.9416 & 1 \\ -6.5042 & 1 \\ -7.0831 & 1 \\ -7.6759 & 1 \end{bmatrix} \quad Y_N = \begin{bmatrix} 0.4857 \\ 0.4714 \\ 0.5169 \\ 0.5116 \\ 0.5222 \\ 0.5103 \\ 0.5241 \\ 0.5578 \\ 0.5314 \\ 0.5397 \\ 0.5527 \\ 0.5725 \\ 0.5852 \\ 0.6005 \end{bmatrix}$$

根据公式  $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N = [a, u]^T$ , 求得  $\hat{a} = [-0.0153, 0.4715]^T$ , 将  $\hat{a}$  带入响应函数得到预测模型:  $x^{(1)}(t+1) = 31.2130e^{0.0153t} - 30.7189$ 。根据 GM(1,1) 模型的建立思路, 预测四川省 1999—2013 年耕地生态安全综合指数, 预测模型的平均相对误差百分比为 1.8704%, 不超过 5%, 说明预测模型精度高; 其次, 预测模型的方差比  $C=0.3316$ , 小残差概率  $p=1$ , 都落在模型精度检验精度“优”范围, 所以判断所建预测模型效果很好<sup>[24]</sup>。运用 GM(1,1) 模型对四川省 2014—2018 年耕地生态安全水平进行预测计算, 结果如图 2 所示。

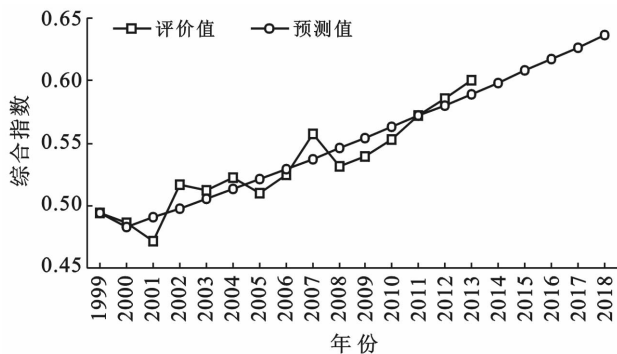


图 2 四川省耕地生态安全评价及预测

GM(1,1) 模型是基于灰色累加生成序列的方法上建立的, 在预测结果上表现出较强的规律性, 适合于短期内系统变动趋势关联度预测<sup>[14,22]</sup>。由图 2 可见, 1999—2013 年四川省耕地生态安全综合指数曲线与 GM(1,1) 模型预测综合指数曲线基本吻合, 2014—2018 年四川省耕地生态安全水平呈现稳步上升趋势, 年均增长率为 1.5952%。

## 4 结论与讨论

(1) 四川省 1999—2013 年耕地生态安全水平不断提高, 耕地生态安全等级经历了“临界安全—较安全”的演变历程, 但 2013 年“较安全”水平不高; 压力指数总体上呈现下降趋势, 状态指数呈现波动下降趋势, 响应指数呈现上升趋势; 单位耕地化肥负荷、人均耕地面积、单位耕地农药负荷、土地垦殖率、水土流失程度等是制约耕地生态系统安全状况改善的关键因素; 从耕地生态安全水平预测结果来看, 今后几年四川省耕地生态安全水平保持持续增长态势。

(2) 根据耕地生态安全的诊断结果, 进一步转变经济发展方式, 加强土地资源利用管控, 降低经济增长对土地资源的过度消耗; 大力发展绿色农业、低碳农业, 加快推进农业科技创新, 合理施用农药、化肥, 降低单位耕地化肥负荷、单位耕地农药负荷; 积极开

展农村土地整治, 加强高标准基本农田建设, 增加有效耕地面积, 提高人均耕地面积、土地垦殖率; 大力开展生态文明建设, 持续增加环境保护投入, 加大环境治理力度, 提高水土流失治理率, 降低水土流失程度, 持续提升耕地生态安全等级。

(3) 实证研究表明, PSR 模型以因果关系为基础, 综合考虑人类活动、社会经济、资源环境的相互关系, 能更准确地体现耕地生态系统、社会经济发展目标与管理决策的相互依存、相互制约的关系; 基于 PSR 模型的评价指标体系能够实现对耕地生态安全的诊断。

(4) 传统综合评价中, 缺少对耕地生态安全动态发展的研究, 而运用基于灰色预测模型和改进熵值法的耕地生态安全评价模型对耕地生态安全水平进行动态评价, 可以得到更客观、更全面的分析结果; 熵值法与灰色预测模型适用于耕地生态安全的动态评价。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王千, 金晓斌, 周寅康, 等. 河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 247-256.
- [2] 张锐, 刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(7): 945-951.
- [3] 王千, 金晓斌, 周寅康. 河北省耕地生态安全及空间聚集格局[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 338-344.
- [4] 孟展, 张锐, 刘友兆, 等. 基于熵值法和灰色预测模型的土地生态系统健康评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 226-231.
- [5] 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[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1520-1530.
- [6] 吴大放, 刘艳艳, 刘毅华, 等. 耕地生态安全评价研究展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 257-267.
- [7] Rasul G, Thapa G. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh[J]. World Development, 2003, 31(6): 1721-1741.
- [8] Mark C O, Kenneth K A, Felicitas U I. Natural radioactivity in cultivated land in the vicinity of a phosphate fertilizer plant in Nigeria[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2012(81): 1823-1826.
- [9] 乌云嘎, 聂艳, 罗毅, 等. 湖北省耕地生态安全时空演变特征研究[J]. 江汉大学学报: 自然科学版, 2015, 43(4): 317-322.
- [10] 谭木魁, 崔迪, 李雅楠. 基于物元可拓模型的湖北省耕地生态安全评价[J]. 中国房地产, 2015(24): 43-52.
- [11] 张冰洁, 宋戈. 松嫩高平原黑土区典型地域耕地生态安全评价及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 215-220.

### 3 讨论与结论

(1) 通过流程化的 GIS 数据处理方法,可以高效的把多源数据加入地理信息系统数据库,不仅实现了对库区基本地质条件和不良地质现象的解译分析,而且便于与其他平台进行数据的交换。

(2) 通过对库岸稳定性的影响因素分析,将研究区划分为独立的边坡单元,以此作为研究对象,计算其三维安全系数,作为库岸稳定评价的基本指标。

(3) 采用层次分析法,对库岸稳定评价的基本指标予以修正,以此建立了基于边坡单元的定量三维稳定性指标与定性指标相结合的库岸稳定性层次分析评价方法。

稳定性评价指标体系的建立包括评价指标的选择及指标量化两方面的内容,这两方面的选取均需要具有丰富的专业知识和现场经验,本文部分指标的选取和取值有待进一步的高榷。结合现场的情况来看,最后的稳定程度评价结果基本符合实际情况。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5336—2006 水电水利工程水库区工程地质勘察技术规程[S]. 2006.

[2] 地质矿产部编写组. 长江三峡工程库岸稳定性研究[M]. 北京:地质出版社,1988.

[3] Luino F. Sequence of instability processes triggered by heavy rainfall in the northern Italy [J]. *Geomorphology*, 2005,66(1):13-39.

[4] 仵彦卿. 地下水与地质灾害[J]. *地下空间与工程学报*, 1999,19(4):303-310.

[5] 马水山,雷俊荣,张保军,等. 滑坡体水岩作用机制与变形机理研究[J]. *长江科学院院报*,2005,22(5):37-39.

[6] 王思敬,马凤山,杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. *工程地质学报*,1996,4(3):1-9.

[7] 刘新喜,夏元友,张显书,等. 库水位下降对滑坡稳定性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*,2005,24(8):1439-1444.

[8] 朱冬林,任光明,聂德新,等. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. *水文地质工程地质*,2002,29(3):6-9.

[9] Lane P A, Griffiths D V. Assessment of Stability of Slopes under Drawdown Conditions [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(5):443-450.

[10] 孙宏才,田平,王莲芬. 网络层次分析法与决策科学[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

[11] 谢谟文,蔡美峰. 信息边坡工程学的理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2005.

[12] Janbu N. Slope stability computations[C]// *Embankment-Dam Eng.*, Publication of Wiley & Sons Incorporated, New York, 1973:47-86.

(上接第 289 页)

[12] 任平,洪步庭,周介铭. 长江上游农业主产区耕地生态安全评价与空间特征研究[J]. *中国人口·资源与环境*,2013,23(12):65-69.

[13] 赵文晖,杨伟州,王利香,等. 基于可拓优度评价模型的耕地生态安全评价[J]. *河南农业科学*,2015,44(2):60-65.

[14] 郭锐利,郑钦玉,刘娟,等. 基于熵值法和 GM(1,1)模型的重庆城市生态系统健康评价[J]. *中国环境科学*, 2012,32(6):1148-1152.

[15] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于熵权可拓物元模型的耕地生态安全评价[J]. *水土保持通报*,2013,33(4):149-154.

[16] 唐秀美,陈百明,路庆斌,等. 基于生态适宜性评价的耕地生态系统服务价值变化研究[J]. *中国农业资源与区划*,2011,32(6):39-42.

[17] Walz R. Development of Environmental Indicator Systems: Experiences from Germany[J]. *Environmental Management*, 2000,25(6):613-623.

[18] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于压力—状态—响应模型与集对分析的土地利用系统健康评价[J]. *水土保持通报*,2014,34(5):146-152.

[19] 谢花林,刘曲,姚冠荣,等. 基于 PSR 模型的区域土地利用可持续性水平测度[J]. *资源科学*,2015,37(3):449-457.

[20] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. *生态学报*,2013,33(16):5090-5100.

[21] 郑华伟,张俊凤,刘友兆. 基于熵权可拓物元模型的农村土地整理项目绩效评价[J]. *水土保持通报*,2014,34(6):193-200.

[22] 张锐,刘友兆,丑建立. 中国土地利用系统健康动态评价[J]. *水土保持通报*,2014,34(2):197-203.

[23] 周瑞平. GM(1,1)模型灰色预测法预测城市人口规模[J]. *内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版*,2005,34(1):81-83.

[24] 戴亚南,贺新光. 长株潭地区生态可持续性[J]. *生态学报*,2013,33(2):595-602.