

# 基于改进灰靶模型的土地生态安全评价

——以江苏省徐州市为例

侯玉乐<sup>1</sup>, 李钢<sup>1</sup>, 渠俊峰<sup>1,2</sup>, 王坤<sup>1</sup>, 刘姝<sup>1</sup>, 葛梦玉<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 低碳能源研究院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 尝试引入灰靶理论进行土地生态安全评价, 以解决目前土地生态安全评价中参照标准的适用局限性。同时, 为消除传统灰靶模型等权的不合理影响, 引入指标权重对传统灰靶模型进行改进, 建立了基于熵权的改进后灰靶评价模型, 并将其应用于徐州市土地生态安全评价。结果表明: 2003—2012 年, 徐州市土地生态安全综合靶心度值由 0.665 3 上升为 0.943 5, 安全等级由不安全级提升到理想安全级, 其土地生态安全整体处于变好的趋势; 但土地社会生态安全一直在临界安全级附近波动, 存在安全风险。与综合指数法相比, 改进后灰靶评价模型得到的靶心度值的变化趋势与其基本一致, 两者的安全等级变化完全吻合。表明改进后的灰靶评价模型能够用于土地生态安全评价, 并能避免参照标准的适用上存在局限性这一问题, 具有一定的应用价值。

**关键词:** 土地生态安全; 灰靶模型; 靶心度; 徐州市

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0285-06

## Evaluation of Land Eco-security Based on Improved Grey Target Model

—A Case of Xuzhou City, Jiangsu Province

HOU Yule<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, QU Junfeng<sup>1,2</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>, LIU Shu<sup>1</sup>, GE Mengyu<sup>1</sup>

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Low Carbon Energy Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the limitations of evaluation standards in application, grey target theory was introduced to evaluate land eco-security. To eliminate the unreasonable influence of equal-weighted in traditional grey target model, index weights were introduced to improve the traditional gray target model. Then, an improved gray target model based on entropy weight was proposed and used to evaluate land eco-security of Xuzhou City. The results show that, from 2003 to 2012, integrated approaching degree of land eco-security increased from 0.665 3 to 0.943 5 and security level shifted from unsafe to ideal security level. The land eco-security presents the good trend. But the social eco-security has been fluctuated around the critical safety level and exists security risk. Compared with the comprehensive index method, the improved grey target model has similar trends about approaching degrees and safety levels. The improved grey target model for evaluation of land eco-security is feasible, and can avoid the limitations of land eco-security evaluation standards and has a certain application value.

**Keywords:** land eco-security; grey target model; approaching degree; Xuzhou City

土地生态安全研究源于近年来兴起的“生态安全”研究, 并已成为土地可持续利用研究的热门课题<sup>[1]</sup>。一般认为, 土地生态安全是指在一定的时空范围内, 土地生态系统能够保持自身结构、功能不受或少受威胁的状态并能为人类的生存和发展提供相

应数量和质量的服务, 从而达到土地自然、社会和经济复合体的持续协调发展<sup>[2-3]</sup>。近年来, 随着人口增长、城市发展以及土地利用强度的不断加强, 水土流失、土壤污染、草场退化等土地生态问题日益突出, 区域土地生态系统遭受了极大的破坏与冲击。因此, 研

究土地生态安全对于缓解人地矛盾,促进人口、资源、环境与社会经济协调发展具有重要意义<sup>[4]</sup>。

土地生态安全评价是土地生态安全研究的重要组成部分<sup>[5]</sup>。科学的土地生态安全评价能够为土地利用规划与管理、土地生态安全预测和预警、资源优化配置等提供重要依据,极具理论与现实意义<sup>[2,6]</sup>。目前,国外土地生态安全评价是以 Costanza 开展的生态系统健康(Ecosystem Health)基本理论和评估研究为代表,注重土地生态健康、可持续利用评价方面的研究<sup>[7]</sup>;国内对于土地生态安全评价也进行了大量研究,主要集中于评价指标体系、评价方法、评价标准和生态安全等级划分等方面。其中,评价方法和评价参照标准是重点和关键环节<sup>[5]</sup>。在评价方法上,综合指数评价法的应用最为广泛,而模糊数学法<sup>[6]</sup>、物元分析模型<sup>[1-2,8]</sup>、主成分分析法<sup>[9]</sup>、正态云模型<sup>[10]</sup>等方法不断被引入土地生态安全评价中并取得了一些效果。然而当前的多数评价方法中,评价参照标准的选择仍是一个难点。由于没有统一的评价参照标准,所以当前研究中评价标准的选取多来源于国际公认值、相关行业标准、全国(或省内)平均值、专家经验判定、理论最佳值、已有相关研究成果等。而土地生态系统较为复杂,包含因素众多并存在不确定性,是一个典型的灰色系统,并且由于人文、经济、社会条件以及本底环境的不同,生态安全状况及影响因素存在动态性及区域差异性,故当前的评价中选取的参照标准在适用性上存在一定的局限。

灰靶理论(Grey Target Theory)由我国华中科技大学的邓聚龙教授提出,是一种处理模式序列的灰关联分析理论,能够进行模式识别、分级与优选<sup>[11]</sup>。该方法已成功应用于水资源紧缺度评价<sup>[12]</sup>、土地资源可持续性评价<sup>[13]</sup>等方面,而将灰靶理论应用于土地生态安全评价的研究较少。基于此,笔者引入灰靶理论,并对传统灰靶模型的等权不合理问题加以改进,以改进后的灰靶模型对徐州市 2003—2012 年的土地生态安全状况进行评价,并采用综合指数法对评价结果进行加以对比、验证,对区域土地生态安全评价方法作一种尝试与探索,以期该类问题的研究提供一定的参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

徐州市位于江苏省西北部,东经 116°22′—118°40′,北纬 33°43′—34°58′,总面积 11 258 km<sup>2</sup>,其中市区面积 963 km<sup>2</sup>。位居长江流域和黄河流域气候过渡区,地处苏、鲁、豫、皖四省交界,是淮海经济圈的重要

中心城市,全国重要水陆交通枢纽和东西、南北经济联系的重要“十字路口”。徐州是全国基础能源供应基地之一,已有 120 多年的煤炭开采历史,对区域乃至全国经济的发展起到了很大的推进和带动作用。然而,长时间的开采也对徐州市的土地造成了大面积破坏,地表塌陷严重,土地生态安全受到了一定的威胁。近些年,徐州市大力推进生态文明建设,开展了土地整治、采煤塌陷地治理与复垦、生态恢复等项目,一定程度上改善了区域生态环境和农业生产条件。2003—2012 年,徐州市原煤年产量下降了 556 万 t,城市人均绿地面积提高了 9.12 m<sup>2</sup>,农田旱涝保收率提高了 13.98%,农民人均纯收入提高了 7 157 元。徐州市 2012 年末人口密度达到 879 人/km<sup>2</sup>,人口自然增长率 15.05%,城镇失业率 2.39%,过快的人口增长也给本区域土地生态系统的安全带来了压力。

### 1.2 指标选取及数据来源

从土地生态安全的概念出发可知,其评价指标体系是一个融合人口、经济、资源、环境和社会等诸多方面的复合系统,其指标的选择不仅考虑土地自然环境现状,还要反映对土地生态安全有重要影响的经济、社会因素以及人类活动的影响<sup>[14]</sup>。因此,本文基于自然—经济—社会框架模型构建评价指标体系,借鉴相关研究成果并充分考虑徐州市自然条件、社会经济情况以及数据的易获得性和可操作性,重点选取与土地生态安全状况密切相关的 18 个指标构建评价指标体系(表 1)。其中,土地自然生态安全主要包括城市人均绿地面积、农田旱涝保收率、自然灾害成灾率等 5 个指标,用以衡量地区自然环境条件对土地生态安全的影响;土地经济生态安全主要包括单位耕地农药施用量、第三产业占 GDP 比重、人均 GDP、单位耕地化肥施用量、原煤产量等 8 个指标,用以表征地区经济生产状况对土地生态安全的影响;土地社会生态安全主要包括城镇化率、人口密度、人口自然增长率等 5 个指标,用来反映地区社会生活条件对土地生态安全的影响。评价指标的原始数据来源于 2004—2013 年的《徐州统计年鉴》。

## 2 研究方法

### 2.1 灰靶评价模型

灰靶理论(Grey Target Theory)是处理模式序列的灰色关联分析理论,其原理是在没有标准模式的条件下设定一个灰靶,并在灰靶中找到靶心设为标准模式;然后将待评模式与标准模式进行比较,以此识别模式接近靶心的程度,简称靶心度;最后依据靶心度等级划分标准进行模式分级,确定评估等级。用此

模型进行土地生态安全评价,能够从已有的待评模式序列中找到标准模式,能够更准确、合理地反映研究区域的土地生态安全状况。灰靶评价模型的详细步骤将在后文的评价过程阐述,此处仅对该模型中的缺陷和改进加以说明。传统灰靶模型的核心步骤是靶心度的计算,其公式如下:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma[x_0(B_k), x_i(B_k)] \quad (1)$$

式中: $\gamma(x_0, x_i)$ 为待评模式  $X_i$  的靶心度; $\gamma[x_0(B_k), x_i(B_k)]$ 代表  $B_k$  指标的靶心系数; $n$ 代表模式中的指标个数。

从公式(1)可以看出,最终求得的靶心度是相应模式中各评价指标对应靶心系数的算术平均值。若将式中  $1/n$  看作指标权重,靶心度  $\gamma(x_0, x_i)$  即为各评价指标对应靶心系数的等权叠加。等权也就意味着各评价指标对靶心度影响程度相同,显然是不合理的。因此,笔者尝试将指标权重引入靶心度求解,将其进行加权改进。改进后的靶心度计算公式如下:

$$\gamma(x_0, x_i) = \sum_{k=1}^n \omega_k \gamma[x_0(B_k), x_i(B_k)] \quad (2)$$

式中: $\gamma(x_0, x_i)$ 为待评模式  $X_i$  的靶心度; $\gamma(x_0(B_k), x_i(B_k))$ 代表  $B_k$  指标的靶心系数; $\omega_k$  则为指标权重。

## 2.2 权重的确定

权重的确定方法通常包括主观赋权法和客观赋权法两类。主观赋权法由于不能充分考虑各指标提供的信息量,容易使评价结果产生主观偏差。同时,由于土地生态安全评价研究的复杂性,使得其评价指标反映的信息量也相当复杂,难以进行主观量化。而运用熵权法(客观赋权法)确定评价指标权重减少了评价过程中人为主观性的干扰,能够更客观地反映各评价指标对区域土地生态安全状况的贡献率<sup>[15]</sup>,故本文采用熵权法计算各指标的权重。

## 2.3 综合指数法

应用目前土地生态安全评价中最常用的综合指数法来对改进后灰靶评价模型的评价结果进行验证,其主要过程为:

### (1) 指标标准化

对正向指标:

$$Y_{ik} = (X_{ik} - \min X_k) / (\max X_k - \min X_k) \quad (3)$$

对逆向指标:

$$Y_{ik} = (\max X_k - X_{ik}) / (\max X_k - \min X_k) \quad (4)$$

式中: $Y_{ik}$ 为指标原始值的标准化值; $X_{ik}$ 为第  $i$  年的第  $k$  个指标的原始值; $\min X_k$ 为第  $k$  个指标的最小值; $\max X_k$ 为第  $k$  个指标的最大值。

### (2) 计算生态安全综合指数

$$Z = \sum_{k=1}^n \omega_k \times Y_{ik} \quad (5)$$

式中: $Z$ 为生态安全综合指数; $\omega_k$ 为  $k$  指标的权重系数; $Y_{ik}$ 为第  $i$  年第  $k$  指标的标准化值; $n$ 为指标个数。

## 3 土地生态安全评价

### 3.1 构建标准模式

首先,每一个评价年份为一个待评模式,则设 2003—2012 年的待评模式为  $X_1—X_{10}$ 。对土地生态安全而言,指标  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{13}, B_{16}, B_{18}$  为正向指标,具有极大值特性,故此指标序列的标准模式为  $X_0(B_k) = \max\{X_1(B_k), X_2(B_k), X_3(B_k), \dots, X_{10}(B_k)\}$ ,其中  $k=1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 13, 16, 18$ ;  $B_5, B_{10}, B_{11}, B_{12}, B_{14}, B_{15}, B_{17}$  为逆向指标,具有极小值特性,故此指标序列的标准模式应为  $X_0(B_k) = \min\{X_1(B_k), X_2(B_k), X_3(B_k), \dots, X_{10}(B_k)\}$ ,其中  $k=5, 10, 11, 12, 14, 15, 17$ 。

综上,最终的标准模式序列为  $X_0 = \{X_0(B_1), X_0(B_2), X_0(B_3), \dots, X_0(B_{18})\} = \{1.33, 71.32, 16.09, 31.9, 42.38, 46.877, 6.457, 41.5, 10.762, 2.016, 18.50, 1050.40, 10.09, 807, 5.68, 56.7, 2.39, 100\}$ 。

### 3.2 进行灰靶变换

令  $T$  为灰靶变换,靶心  $x_0 = TX_0 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$ ,则待评模式  $X_1$  中 18 个指标进行灰靶变换可得:

$$\begin{aligned} x_1(B_1) &= TX_1(B_1) = \frac{\min\{X_1(B_1), X_0(B_1)\}}{\max\{X_1(B_1), X_0(B_1)\}} = \frac{\min(1.33, 1.33)}{\max(1.33, 1.33)} = 1; \\ x_1(B_2) &= TX_1(B_2) = \frac{\min\{X_1(B_2), X_0(B_2)\}}{\max\{X_1(B_2), X_0(B_2)\}} = \frac{\min(56.15, 71.32)}{\max(56.15, 71.32)} = 0.7873; \\ &\vdots \\ x_1(B_{18}) &= TX_1(B_{18}) = \frac{\min\{X_1(B_{18}), X_0(B_{18})\}}{\max\{X_1(B_{18}), X_0(B_{18})\}} = \frac{\min(92.38, 100)}{\max(92.38, 100)} = 0.9238; \end{aligned}$$

则有  $x_1 = [x_1(B_1), x_1(B_2), x_1(B_3), \dots, x_1(B_{18})] = (1, 0.7873, 0.4332, 0.6167, 0.8674, 0.2005, 0.6997, 0.8410, 0.3350, 0.7838, 0.7799, 1, 0.6729, 1, 1, 0.7125, 0.5558, 0.9238)$ 。

同理,对待评模式  $X_2—X_{10}$  进行灰靶变化得到  $x_2—x_{10}$ ,最终可得由  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10})$  组成的矩阵。

### 3.3 确定灰关联差异信息空间

令差异信息集  $\Delta = \{\Delta_{0i}(B_k) | i \in I = \{1, 2, 3, \dots, 10\}, k \in K = \{1, 2, 3, \dots, 18\}\}$ ,其中  $\Delta_{0i}(B_k) = |x_0(B_k) - x_i(B_k)|$ ,表示  $B_k$  指标下待评模式  $X_i$  与标准模式  $X_0$  的差异信息。则待评模式  $X_1$  的差异信息为  $\Delta_{01}(B_k) = [\Delta_{01}(B_1), \Delta_{01}(B_2), \Delta_{01}(B_3), \dots, \Delta_{01}(B_{18})] = (0, 0.2127, 0.5668, 0.3824, 0.1326, 0.7995, 0.3003, 0.1590, 0.6650, 0.2126, 0.2201, 0, 0.3271,$

0, 0, 0.2875, 0.4442, 0.0762)。

同理可求得待评模式  $X_2-X_{10}$  的差异信息, 得到由  $(\Delta_{01}, \Delta_{02}, \Delta_{03}, \dots, \Delta_{10})$  组成的矩阵。最终可得:  $\Delta_{0i}(\max)=0.7995, \Delta_{0i}(\min)=0$ 。

### 3.4 计算靶心系数

$$\gamma[x_0(B_k), x_i(B_k)] = \frac{\min_i \Delta_{0i}(B_k) + 0.5 \max_i \Delta_{0i}(B_k)}{\Delta_{0i}(B_k) + 0.5 \max_i \Delta_{0i}(B_k)} = \frac{0.39975}{\Delta_{0i}(B_k) + 0.39975}$$

则待评模式  $X_1$  中各指标靶心系数为:  $\gamma[x_0(B_1), x_1(B_1)]=1; \gamma[x_0(B_2), x_1(B_2)]=0.6527; \dots; \gamma[x_0(B_{18}), x_1(B_{18})]=0.8399$ 。同理可分别求出待评模式  $X_2-X_{10}$  中各指标的靶心系数, 得到由靶心系数  $\gamma[x_0(B_k), x_i(B_k)]$  组成的矩阵。

### 3.5 确定指标权重

运用熵权法计算所得的各指标权重见表 1。

表 1 土地生态安全评价指标体系及权重

目标层	准则层	指标层	指标性质	权重
土地生态安全评价	土地自然生态安全 (A <sub>1</sub> )	B <sub>1</sub> 人均耕地面积(hm <sup>2</sup> /人)	+	0.0409
		B <sub>2</sub> 农田旱涝保收率(%)	+	0.0506
		B <sub>3</sub> 城市人均绿地(m <sup>2</sup> /人)	+	0.0617
		B <sub>4</sub> 森林覆盖率(%)	+	0.0310
		B <sub>5</sub> 自然灾害成灾率(%)	-	0.0555
	土地经济生态安全 (A <sub>2</sub> )	B <sub>6</sub> 人均 GDP(10 <sup>4</sup> 元/人)	+	0.0680
		B <sub>7</sub> 单位面积粮食产量(kg/hm <sup>2</sup> )	+	0.0248
		B <sub>8</sub> 第三产业占 GDP 比重(%)	+	0.0883
		B <sub>9</sub> 农民人均纯收入(元/人)	+	0.0695
		B <sub>10</sub> 原煤产量(10 <sup>4</sup> t/a)	-	0.0376
		B <sub>11</sub> 单位耕地农药施用量(kg/hm <sup>2</sup> )	-	0.0960
		B <sub>12</sub> 单位耕地化肥施用量(kg/hm <sup>2</sup> )	-	0.0625
		B <sub>13</sub> 农业机械化水平(kW/hm <sup>2</sup> )	+	0.0586
	土地社会生态安全 (A <sub>3</sub> )	B <sub>14</sub> 人口密度(人/km <sup>2</sup> )	-	0.0436
		B <sub>15</sub> 人口自然增长率(‰)	-	0.0495
		B <sub>16</sub> 城镇化率(%)	+	0.0578
		B <sub>17</sub> 城镇失业登记率(%)	-	0.0353
		B <sub>18</sub> 工业固体废物综合利用率(%)	+	0.0688

注:“+”代表正向指标, 即指标值越大, 安全性越高;“-”代表逆向指标, 即指标值越大, 安全性越低。

### 3.6 计算靶心度

将得到的靶心系数以及权重值代入公式(2), 从而计算各个待评模式的综合靶心度, 即 2003—2012 年的综合靶心度值分别为  $\gamma(x_0, x_1)=0.6653; \gamma(x_0, x_2)=0.6395; \gamma(x_0, x_3)=0.6424; \dots; \gamma(x_0, x_{10})=0.9435$

(表 2)。

同理, 按照上述的方法对准则层的土地自然生态安全 A<sub>1</sub>, 土地经济生态安全 A<sub>2</sub>, 土地社会生态安全 A<sub>3</sub> 分别组成的灰模式进行评价, 得到各准则层的靶心度值。

表 2 徐州市土地生态安全评价结果

年份	$\gamma(A_1)$	等级	$\gamma(A_2)$	等级	$\gamma(A_3)$	等级	$\gamma(A_{1-3})$	等级
2003	0.5898	V	0.6079	IV	0.7568	III	0.6653	IV
2004	0.5501	V	0.6206	IV	0.6507	IV	0.6395	IV
2005	0.5554	V	0.6111	IV	0.6773	IV	0.6424	IV
2006	0.6130	IV	0.6176	IV	0.6636	IV	0.6560	IV
2007	0.6676	IV	0.6355	IV	0.8147	II	0.7122	III
2008	0.6975	IV	0.6837	IV	0.7942	III	0.7386	III
2009	0.7418	III	0.7189	III	0.7375	III	0.7507	III
2010	0.7760	III	0.7861	III	0.7796	III	0.8009	II
2011	0.8745	II	0.8751	II	0.8126	II	0.8726	II
2012	0.9882	I	0.9872	I	0.7849	III	0.9435	I

注:  $\gamma(A_1), \gamma(A_2), \gamma(A_3)$  分别代表各个准则层的靶心度值,  $\gamma(A_{1-3})$  代表综合靶心度值。

## 4 结果与分析

### 4.1 灰靶评价分析

由表 2 可知,  $\gamma$  的取值范围主要集中在 0.5~0.9, 按照等分取整原则进行等级划分, 最终将徐州市 2003—2012 年的土地生态安全情况分为 5 个等级。分别为理想安全(I 级)  $\gamma > 0.9$ , 较安全(II 级)  $0.8 \leq \gamma < 0.9$ , 临界安全(III 级)  $0.7 \leq \gamma < 0.8$ , 不安全(IV 级)  $0.6 \leq \gamma < 0.7$ , 极不安全(V 级)  $\gamma < 0.6$ , 具体的土地生态安全综合评价等级与各准则层评价等级结果见表 2。徐州市 2003—2012 年的土地生态安全靶心度值的变化情况见图 1。

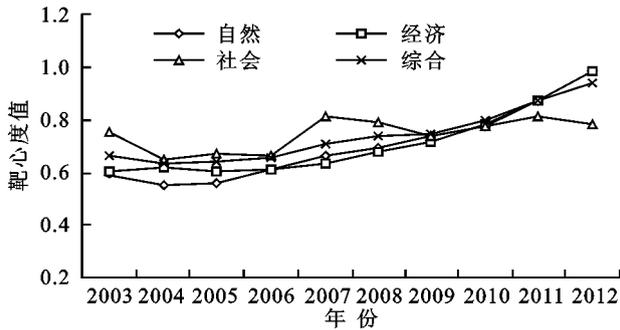


图 1 徐州市 2003—2012 年土地生态安全变化

(1) 土地生态安全趋势分析。10 a 来徐州市的土地生态安全状况处于日趋转好的态势。其综合靶心度值由 2003 年的 0.665 3 上升到 2012 年的 0.943 5, 安全等级由不安全(IV)级别提升到理想安全(I)级别, 表明在 2003—2012 年这一评价区间内, 徐州市土地生态系统受到的冲击与损毁日益变小。其主要原因在于: 一方面, 徐州市地处黄淮平原, 是江苏省重要的粮食生产基地, 本身优越的农业生产条件加上近年来土地整治项目的大力推进, 使得人均耕地面积、农民人均纯收入、农田旱涝保收率、单位面积粮食产量及农业机械化水平不断提高, 促进了土地生态系统的可持续性。张俊凤等<sup>[13]</sup>对江苏省土地整治可持续性评价中得到的徐州属于高度可持续等级的结果也证实了这一点; 另一方面, 徐州市成功创建国家园林城市并提出将于 2015 年建成国家生态市, 近年来大规模开展生态建设、深入实施生态修复、严格实施生态保护, 提高了森林覆盖率和城市人均绿地面积, 对土地生态安全起到了重要作用。除此之外, 从表 2 和图 1 可以看出, 综合靶心度值在 2003—2009 年期间上升较为平缓; 2009—2012 年上升较快, 年上升值均超过 0.05。这一现象的出现主要是由于徐州市从 2009 年开始大力推进采煤塌陷地复垦治理和生态修复工作, 重点开展了潘安湖生态治理工程和铜山区塌陷地复垦项目, 在 2009—2012 年期间, 共实施完成复垦治理总面积 2 600 hm<sup>2</sup>, 新增耕

地 1 600 hm<sup>2</sup>, 实施采煤塌陷地环境修复规模近 3 300 hm<sup>2</sup>, 极大地改善了区域生态环境。

(2) 准则层分析。2003—2012 年期间, 土地自然生态安全的靶心度值从 0.589 8 上升至 0.988 2, 安全等级由极不安全(V)级别提升到理想安全(I)级别; 土地经济生态安全的靶心度值由 0.607 9 变为 0.987 2, 安全等级由不安全(IV)级别提升到理想安全(I)级别。从表 2 及图 1 中可以看出, 其总体变化趋势均与综合靶心度值的变化趋势相同, 尤其是从 2009 年开始, 三者的变化趋势基本完全吻合。主要原因在于, 组成土地自然生态安全和经济生态安全的多数指标(如人均耕地面积、农田旱涝保收率、森林覆盖率、城市人均绿地、自然灾害成灾率、单位面积粮食产量、农民人均纯收入、农业机械化水平)都受到土地整治、生态建设以及塌陷地复垦的驱动, 故呈现高度吻合性。而土地社会生态安全的靶心度值变化趋势呈稳定波动状态, 而这一变化主要受到工业固体废弃物综合利用率、人口自然增长率以及城镇失业登记率的波动影响。等级变化表现为“降、升、降、升、降”, 2003 年与 2012 年均临界安全(III)级别, 其安全形势不容乐观, 存在变为不安全(IV)级别的风险。因此, 政府要在工企业监管、就业保障等方面加大投入力度, 从而保障土地的社会生态安全。

### 4.2 综合指数评价分析

根据以上综合指数评价法的过程, 将各指标量值代入式(3), (4), (5)计算出各年份的土地生态安全综合指数。依据综合指数评价中最常用的土地生态安全等级划分标准<sup>[16]</sup>, 将徐州市 2003—2012 年土地生态安全综合指数进行等级划分, 并与改进后的灰靶评价模型的结果进行对比(表 3)。由表 3 可知, 用综合指数法得到的生态安全值的变化趋势与利用改进后灰靶评价模型得到的靶心度值的变化趋势基本一致, 两者的安全等级变化完全吻合, 表明改进后的灰靶模型可以用于土地生态安全评价。

表 3 等级评定结果对比

年份	灰靶评价模型		综合指数评价法	
	$\gamma(A_{1-3})$	等级	Z	等级
2003	0.6653	IV	0.2670	IV
2004	0.6395	IV	0.2310	IV
2005	0.6424	IV	0.2669	IV
2006	0.6560	IV	0.2765	IV
2007	0.7122	III	0.4304	III
2008	0.7386	III	0.5244	III
2009	0.7507	III	0.5506	III
2010	0.8009	II	0.6407	II
2011	0.8726	II	0.7908	II
2012	0.9435	I	0.8188	I

## 5 结论

(1) 针对土地生态安全评价中选取的参照标准在适用性上存在一定的局限这一问题,笔者引入灰靶理论,可以在没有标准模式的情况下,从待评模式的已有数据中选择最接近目标值的数据设置靶心,并通过靶心度的计算与分级来识别土地生态安全状况及变化情况。同时引入熵权法确定指标权重,对传统灰靶模型的等权不合理问题加以改进,保证了评价结果的客观性与可比性。

(2) 徐州市土地生态安全评价结果表明:在2003—2012年,其土地生态安全状态整体上呈日益变好的态势;土地自然生态安全和土地经济生态安全亦呈逐年上升状态,并在2009年之后与总体趋势基本完全吻合。其主要原因在于,徐州市近年来大力推进土地整治、生态建设、塌陷地治理与生态修复等项目,并取得了良好的效果。而土地社会生态安全一直在临界安全(Ⅲ)级别附近波动,存在变为不安全(Ⅳ)级别的风险,安全形势不容乐观。因此,当地政府今后要在工企业监管、就业保障等方面加大投入力度,合理控制人口密度与增长速度,缓解人地矛盾,从而保障土地的社会生态安全。

(3) 基于与综合指数法的对比,改进后的灰靶模型可以用于土地生态安全评价。在应用改进后的灰靶模型进行土地生态安全评价时,其靶心的设定来源于待评模式的已有数据,具有较好的可参比性;通过待评模式与标准模式的靶心度识别,能够较为客观、准确地反映评价期内土地生态安全的变化情况,避免了评价参照标准在适用上存在局限性这一问题。

### 参考文献:

[1] 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.  
[2] 余健,房莉,仓定帮,等.熵权模糊物元模型在土地生态安全

评价中的应用[J].农业工程学报,2012,28(5):260-266.  
[3] 张军以,苏维词,张婕.2000—2009年重庆市土地资源生态安全评价及趋势分析[J].地域研究与开发,2011,30(4):127-131.  
[4] 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.  
[5] 吴未,谢嗣频.中国土地生态安全评价研究进展与展望[J].河北农业科学,2010,14(5):99-102.  
[6] 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.  
[7] 许国平.中国土地资源安全评价研究进展及展望[J].水土保持研究,2012,19(2):276-279.  
[8] 赵宏波,马延吉.基于变权—物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究:以吉林省为例[J].生态学报,2014,34(16):4720-4733.  
[9] 孙奇奇,宋戈,齐美玲.基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J].水土保持研究,2012,19(1):234-238.  
[10] 叶达,吴克宁,刘需珈.半干旱区农业开发土地资源生态安全评价:以宁夏孙家滩国家农业科技园区为例[J].环境科学学报,2016,36(3):1099-1105.  
[11] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:171-181.  
[12] 李红,周波.基于改进后灰靶模型的四川省水资源紧缺度评价[J].四川大学学报:工程科学版,2012,44(1):43-49.  
[13] 张俊凤,花盛,刘友兆,等.基于改进灰靶模型的土地整治可持续性评价研究:以江苏省为例[J].长江流域资源与环境,2014,23(2):153-160.  
[14] 郑荣宝,刘毅华,董玉祥,等.基于主体功能区划的广州市土地资源安全评价[J].地理学报,2009,64(6):654-664.  
[15] 贾艳红,赵军,南忠仁,等.熵权法在草原生态安全评价研究中的应用:以甘肃牧区为例[J].干旱区资源与环境,2007,21(1):17-21.  
[16] 王亮,卞正富.基于灾变理论的盐城市土地生态安全评价研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(2):231-236.