

# 基于物元模型的苏南地区土地生态安全评价

刘雯波<sup>1</sup>, 郑华伟<sup>2</sup>, 刘友兆<sup>1</sup>

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

**摘 要:** 运用物元模型对江苏省苏南地区 5 个城市的土地生态安全进行了评价, 结合区域特征分析苏南 5 市的土地生态安全随时间变化的趋势及其影响因素的区域差异, 进而从总体上评价了苏南 5 市的土地生态安全动态变化。结果表明: (1) 经济因素是促进苏南 5 市土地生态安全的主导因素, 抑制因素表现出明显的区域差异, 农药的使用严重威胁无锡、常州、苏州和镇江市的土地生态安全; 工业废气排放显著抑制南京市土地生态安全, 工业废水排放对苏州和无锡地区带来一定影响; 人口密度对苏南 5 市的影响也不尽相同。(2) 总体来说, 苏南 5 市的土地生态安全从 2003 年到 2009 年以稳步发展和跳跃式发展两种方式向较高等级转化, 南京、常州和镇江地区的土地生态安全存在进一步优化的空间。

**关键词:** 土地生态安全; 物元模型; 苏南地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0175-06

中图分类号: F321.1

## Evaluation on Ecological Security of Land in Southern Jiangsu Province Based on Matter-element Model

LIU Wen-bo<sup>1</sup>, ZHENG Hua-wei<sup>2</sup>, LIU You-zhao<sup>1</sup>

(1. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China;

2. College of Rural Development, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** The article evaluates the ecological security of land for five cities in Southern Jiangsu Province by matter-element model to present the trends of the ecological security and the regional differences of their influencing factors. The results show that: (1) The main factors promoting the ecological security of the land are economic factors while the negative factors vary from regions to regions; the use of pesticides brings great threats to Wuxi, Changzhou, Suzhou and Zhenjiang City; the industrial waste gas decreases the ecological security in Nanjing City; the industrial waste water has negative effects on Suzhou and Wuxi City and the high population density brings different threats to all five cities. (2) Generally, the ecological security of the land in the five cities were improved to higher levels from 2003 to 2009 either steadily or rapidly, and there is much chance and space for the situation in Nanjing, Changzhou and Zhenjiang City to be improved.

**Keywords:** land ecological security; the matter-element model; Southern Jiangsu Province

土地是人类赖以生存和发展的基础, 国土资源的多少和优劣是决定一个区域和国家社会经济发展以及安全程度的重要因素。随着社会经济和人口的快速增长, 人类活动对环境的压力不断增大, 人地矛盾加剧, 土地资源尤其是耕地资源锐减、土壤污染、土地沙化、水土流失严重等问题十分突出, 对区域发展、社会进步带来的威胁越来越大。2010 年中国北方沙漠化土地达  $3.76 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 其中重度沙漠化和严重沙漠化土地之和占 43.37%<sup>[1]</sup>。根据 2010 年公布的遥感调查, 全国现有土壤侵蚀面积达到  $3.57 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 37.2%<sup>[2]</sup>。土地生态安全问题成为了理论和实际都亟待解决的重要问题。

改善和解决土地生态安全问题的重要前提是进行土地生态安全评价。土地生态安全评价是土地生态安全研究的重要内容, 也是土地利用安全格局构建和土地利用模式优化的基础<sup>[3]</sup>。近年来学界对土地生态安全评价进行了大量的研究。研究对象可分为两类, 以干旱区<sup>[4]</sup>、农牧交错区<sup>[5]</sup>、三峡库区<sup>[6]</sup>和湖区<sup>[7]</sup>为主的典型生态区, 以及受人类活动影响显著的行政区<sup>[8-10]</sup>。相比于自然因素的不确定, 人类活动对土地生态安全的影响更值得关注, 但是已有的此类研究多集中在对省域<sup>[10-11]</sup>、市域<sup>[12-14]</sup>、县域<sup>[15]</sup>和镇域<sup>[16]</sup>单个行政级别的研究。虽然个别研究关注城市群<sup>[8,17]</sup>的土地生态安全问题, 但大多只是单一年份的

收稿日期: 2013-01-09

修回日期: 2013-02-07

资助项目: 江苏省国土资源科技项目“经济发达地区建设性、管控性耕地保护机制研究”(201003)

作者简介: 刘雯波(1987—), 女(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源可持续利用。E-mail: cntslwb@163.com。

通信作者: 刘友兆(1959—), 男(汉族), 江苏省涟水县人, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地利用与评价。E-mail: yzliu@njau.edu.cn。

研究,缺乏对土地生态安全的动态性的考虑。从研究方法来看,综合指数评价法可以将分散的信息通过模型集成,再进行综合值的分级,来评价区域土地资源生态安全的综合水平<sup>[18-19]</sup>,但该方法无法识别单指标的生态安全状态水平,也会遗漏指标间的一些分异信息。此外,城市土地生态安全受到自然、经济、社会多方面因素的影响,因素之间存在着相互作用,具有不确定性和模糊性<sup>[10]</sup>,已有的方法无法从作用结果中反推出各个因素的作用大小。在这方面,物元分析法通过对每个评价指标进行分级区间界定,运用关联函数计算得到单指标的生态安全状态,再通过模型集成得到多指标的综合生态安全水平的算法有效地克服了以往算法的不足,使得结果更加客观和科学。同时,物元分析模型能够解决这种不相容问题,并以定量的数值表示评价结果,从而客观反应土地生态安全综合水平<sup>[8,20]</sup>。综上所述,以典型的经济发达城市群为对象,进行多个年份的土地生态安全动态变化研究尚不多见。因此,本研究在对上述现象与理论关注的基础上,采用物元模型对江苏省苏南地区,包括南京、苏州、无锡、常州和镇江在内的 5 个城市,进行土地生态安全评价,不仅结合区域特征,对比了土地生态安全影响因素的区域差异,提出针对性的对策建议,还从总体上分析该区域土地生态安全随时间变化的趋势及其影响因素,以期为我国区域土地资源的生态安全评价提供一定的理论和实践基础。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

江苏省苏南地区位于我国东南沿海长江三角洲中心地段,地跨东经 118°22′—121°20′,北纬 30°47′—32°37′,包括南京、无锡、常州、苏州和镇江 5 市,共 45 个县(市、区),土地面积 2.20×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,2 178 万人。属于亚热带季风气候,温暖湿润,热量丰富,雨量充沛,无霜期长,地形以平原为主。2003 年该地区的地区生产总值为 7 821.58 亿元,二、三产业比重分别为 58.26%和 38.23%,财政总收入达 1 236.72 亿元,农作物播种面积 1.42×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,化肥使用量达 5.68×10<sup>5</sup> t。2009 年地区生产总值达 21 154.19 亿元,第二、第三产业比重分别为 55.4%和 42.1%。其中,苏州和无锡市的地区生产总值在全国重点城市中位列前十。财政总收入达 5 345.01 亿元。农作物播种面积 1.26×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,化肥使用量达 4.05×10<sup>5</sup> t。随着经济快速发展,城市区域面积逐渐扩大,大片的生态用地改为建设用地;不合理的土地利用和过度开垦采伐和农药化肥的不合理使用,造成水土流失较为严重、生物多样性减少、耕地污染加剧、土地生态功能减弱等一系列的影响和冲击,严重影响和制约了社会经

济发展的质量。因此,科学评价土地生态安全状况,及时了解该区域土地生态安全状态及变化趋势,对指导土地持续利用行为,改善和维护区域土地生态安全,促进苏南地区国家自主创新示范区建设具有重要意义。

### 1.2 研究方法<sup>[7-9]</sup>

1.2.1 确定土地生态安全物元 土地生态安全  $N$ , 土地生态安全特征  $c$  和特征量值  $v$  共同构成土地生态安全物元。假设土地生态安全  $N$  有多个特征,它以  $n$  个特征  $c_1, c_2, \dots, c_n$  和相应的量值  $v_1, v_2, \dots, v_n$  描述,则表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $R$ —— $n$  维土地生态安全物元,简记  $R=(N, c, v)$ 。

1.2.2 确定土地生态安全的经典域与节域物元矩阵 土地生态安全的经典域物元矩阵可表示为:

$$R_{0j} = (N_{0j}, c_i, v_{0ji}) = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & v_{0j1} \\ & c_2 & v_{0j1} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{0jn} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & \langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{0j2}, b_{0j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{0jn}, b_{0jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $R_{0j}$ ——称为经典域物元;  $N_{0j}$ ——表示所划分土地生态安全的第  $j$  个评价等级 ( $j=1, 2, \dots, m$ );  $c_i$ ——第  $i$  个评价指标; 区间  $\langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle$  为  $c_i$  对应评价等级  $j$  的量值范围,即经典域。

土地生态安全的节域物元矩阵表示为:

$$R_p = (N_p, c_i, v_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $R_p$ ——称为节域物元;  $v_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$  为节域物元关于特征  $c_i$  的量值范围;  $p$ ——土地生态安全评价等级的全体,显然有  $\langle a_{o1}, b_{o1} \rangle \in \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle (i=1, 2, \dots, n)$ 。

1.2.3 确定待评物元 把待评对象  $N_x$  的物元表示为  $R_x$ :

$$R_x = \begin{bmatrix} N_x & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2.4 确定关联函数及关联度 令有界区间  $X = [a, b]$  的模式定义为:

$$|X_0| = |b - a| \quad (5)$$

某一点  $X$  到区间  $X_0 = [a, b]$  的距离为:

$$\rho(X, X_0) = |X - \frac{1}{2}(a+b)| - \frac{1}{2}(b-a) \quad (6)$$

则土地生态安全指标关联函数  $K(x)$  的定义为:

$$K(x_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(x, x_0)}{|x_0|} & (x \in X_0) \\ \frac{\rho(x, x_p)}{\rho(x, x_p) - \rho(x, x_0)} & (x \notin X_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\rho(x, x_0)$ ——点  $X$  与有限区间  $X_0 = [a, b]$  的距离;  $\rho(x, x_p)$ ——点  $X$  与有限区间  $X_p = [a_p, b_p]$  的距离;  $X, X_0, X_p$ ——待评土地生态安全物元的量值、经典域物元的量值范围和节域物元的量值范围。

1.2.5 计算综合关联度并确定评价等级 待评对象  $N_x$  关于等级  $j$  的综合关联度  $K_j(N_x)$  为:

$$K_j(N_x) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_j(x_i) \quad (8)$$

式中:  $K_j(N_x)$ ——待评对象  $N_x$  关于等级  $j$  的综合关联度;  $K_j(x_i)$ ——待评对象  $N_x$  的第  $i$  个指标关于等级  $j$  的单指标关联度 ( $j=1, 2, \dots, n$ );  $\omega_i$ ——各评价指标的权重。

若  $K_{ij} = \max[K_j(x_i)]$ , 其中  $j=1, 2, \dots, n$ , 则待评对象第  $i$  指标属于土地生态安全标准等级  $j$ ; 若  $K_{ji} = \max[K_j(N_x)]$ , 其中  $j=1, 2, \dots, n$ , 则待评对象  $N_x$

属于土地生态安全标准等级  $j$ 。

### 1.3 数据来源及处理

采用的 16 项评价指标分为原始指标和构建指标两大类。原始指标如第三产业占 GDP 的比例 (%) 等数据通过查阅 2004、2007 和 2010 年的江苏统计年鉴、中国城市统计年鉴、南京统计年鉴、无锡统计年鉴、苏州统计年鉴、常州统计年鉴和镇江统计年鉴直接获得, 通过原始指标计算得出单位耕地用电量 ( $10^4$  kW/hm<sup>2</sup>) 等构建指标。

## 2 土地生态安全评价指标体系的构建

### 2.1 指标体系的构建

城市土地生态系统是多层次、多因素的复合系统, 具有经济生态性、自然生态性和社会生态性多方面特征<sup>[12]</sup>。土地的经济生态性主要指土地的投入产出情况, 包括国民经济结构、财政收入和人民收入情况<sup>[12]</sup>; 自然生态性主要通过农业、工业可能带来的土地污染以及绿化情况反映, 社会生态性考察社会群体对土地生态所带来的影响, 主要以人口影响为主。基于苏南 5 市的经济、自然、社会特征, 借鉴相关研究成果, 考虑到对土地的经济、自然和社会生态安全可能产生影响的人类活动, 结合指标数据的可得性, 选择 16 个评价指标构建土地生态安全的评价指标体系 (表 1)。

表 1 土地生态安全评价标准值

目标	因素	评价指标	权重	安全	较安全	临界安全	不安全
经济		$C_1$ 第三产业占 GDP 的比例/%	0.054	>60	>40	>30	>0
		$C_2$ 单位土地面积 GDP/(万元·km <sup>-2</sup> )	0.063	>8 000	>6 000	>3 500	>0
		$C_3$ 单位土地面积财政收入/(万元·km <sup>-2</sup> )	0.059	>1 600	>900	>300	>0
		$C_4$ 农民人均纯收入/元	0.070	>10 000	>8 000	>6 000	>4 000
		$C_5$ 城镇居民年人均可支配收入/元	0.056	>25 000	>20 000	>15 000	>9 000
土地生态安全	自然	$C_6$ 单位耕地用电量/( $10^4$ kW·hm <sup>-2</sup> )	0.069	>20	>15	>10	>0
		$C_7$ 单位耕地化肥施用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	0.08	<200	<400	<600	<800
		$C_8$ 单位耕地农药施用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	0.054	<10	<15	<20	<40
		$C_9$ 单位土地面积二氧化硫排放量/( $10^4$ t·km <sup>-2</sup> )	0.054	<10	<15	<20	<30
		$C_{10}$ 单位土地面积工业废水排放量/( $10^4$ t·km <sup>-2</sup> )	0.068	<4	<8	<10	<12
		$C_{11}$ 建成区绿化覆盖率/%	0.069	>45	>40	>30	>0
		$C_{12}$ 城镇生活污水处理率/%	0.054	>90	>85	>65	>40
	$C_{13}$ 生活垃圾无害化处理率/%	0.052	>90	>80	>75	>70	
社会		$C_{14}$ 人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	0.066	<650	<750	<800	<1 000
		$C_{15}$ 人口自然增长率/%	0.058	<0	<1	<1.5	<2.5
		$C_{16}$ 城镇登记失业率/%	0.074	<2.5	<3	<3.5	<4.5

### 2.2 评价指标权重的确定

采用熵值法进行指标权重的赋值 (表 1)。传统 AHP 法等确定评价指标权重的方法往往比较主观, 容易造成评价结果由于人的主观因素而形成偏差。因此, 引入熵值法确定权重系数<sup>[21-22]</sup>。

### 2.3 土地生态安全评价经典域及节域的确定

根据城市土地生态安全的可拓性, 将其划分为 4 个等级: 安全, 较安全, 临界安全, 不安全。根据物元模型的公式, 建立经典域矩阵,  $P = \{\text{安全} \rightarrow \text{较安全} \rightarrow \text{临界安全} \rightarrow \text{不安全}\}$ ,  $R_1 = \{\text{安全}\}$ ,  $R_2 = \{\text{较安全}\}$ ,  $R_3 =$

= {临界安全}, R<sub>4</sub> = {不安全}。

在经典域和节域的确定过程中,评价指标标准值的确定非常重要。首先参考国家环境保护部颁发的《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》,并结合各个地区“生态市建设规划纲要”确定标准值,其次对于没有国家、地方相关规定的指标,在借鉴大量相关研究的基础上,结合国内外同类评价通常采用的标准和区域背景值,综合确定了苏南 5 市土地生态安全评价标准值(表 1),从而确定了经典域和节域。

苏南 5 市土地生态安全评价的经典域物元矩阵 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> 分别为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & \langle 60, 80 \rangle \\ & c_2 & \langle 8\ 000, 11\ 000 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{16} & \langle 0, 2.5 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & \langle 40, 60 \rangle \\ & c_2 & \langle 6\ 000, 8\ 000 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{16} & \langle 2.5, 3 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & \langle 30, 40 \rangle \\ & c_2 & \langle 3\ 500, 6\ 000 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{16} & \langle 3, 3.5 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & \langle 0, 30 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 3\ 500 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{16} & \langle 3.5, 4.5 \rangle \end{bmatrix}$$

由此,苏南 5 市土地生态安全的节域矩阵 R<sub>p</sub> 可表示为

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle 0, 80 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 11\ 000 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 2\ 400 \rangle \\ & c_4 & \langle 4\ 000, 14\ 000 \rangle \\ & c_5 & \langle 4\ 000, 28\ 000 \rangle \\ & c_6 & \langle 0, 25 \rangle \\ & c_7 & \langle 0, 800 \rangle \\ & c_8 & \langle 0, 40 \rangle \\ & c_9 & \langle 5, 30 \rangle \\ & c_{10} & \langle 0, 12 \rangle \\ & c_{11} & \langle 0, 50 \rangle \\ & c_{12} & \langle 40, 100 \rangle \\ & c_{13} & \langle 70, 700 \rangle \\ & c_{14} & \langle 600, 1\ 000 \rangle \\ & c_{15} & \langle 0.5, 2.5 \rangle \\ & c_{16} & \langle 0, 4.5 \rangle \end{bmatrix}$$

式中: R<sub>p</sub>——节域矩阵; p——评价事物名称; c<sub>1-16</sub>——16 个评价指标。

### 3 苏南地区土地生态安全综合分析

#### 3.1 苏南地区土地生态安全区域差异分析

表 2 列出了南京市 2003 年各评价指标对应 4 个等级的关联度、多指标综合关联度计算结果,以及 2003, 2006 和 2009 年的土地生态安全等级。以南京市为例,对评价结果进行详细分析。

根据单个指标提供的分异信息,单位土地面积 GDP(万元/km<sup>2</sup>)、单位土地面积财政收入(万元/km<sup>2</sup>)、农民人均纯收入(元)、城镇居民年人均可支配收入(元)、单位耕地化肥施用量(kg/hm<sup>2</sup>)、单位耕地农药施用量(kg/hm<sup>2</sup>)和城镇登记失业率(%)几项指标的安全等级呈现不同程度的提高,对南京市土地生态安全起到促进作用;生活垃圾无害化处理率(%)和人口自然增长率(%)则从 2003 年的较安全等级降低为 2009 年的不安全等级,尤其是生活垃圾无害化处理率(%)在 2006 年已经上升到安全等级,由此可见南京市需加强生活垃圾的处理。《南京市生态市建设规划纲要》指出在 2015 年将该指标提升到 80% 以上,到 2020 年达到 85% 以上。第三产业占 GDP 的比例(%)、单位耕地用电量(10<sup>4</sup> kW/hm<sup>2</sup>)、单位土地面积二氧化硫排放量(10<sup>4</sup> t/km<sup>2</sup>)、单位土地面积工业废水排放量(10<sup>4</sup> t/km<sup>2</sup>)和人口密度(人/km<sup>2</sup>)这几项指标的安全等级在研究期内保持不变,但是只有第三产业占 GDP 的比例(%)和单位土地面积工业废水排放量(10<sup>4</sup> t/km<sup>2</sup>)一直保持在较安全等级,其余指标一直处于不安全状态,可见南京市的耕地用电量、工业废水排放量和较高的人口密度长期以来给土地安全施加了较大压力。此外,建成区绿化覆盖率(%)和城镇生活污水处理率(%)的安全等级出现了波动,提高城市绿化水平和城镇生活污水处理水平显然将对南京市土地生态安全起到促进作用。

按照相同的方法计算出无锡、常州、苏州和镇江市研究期内的土地生态安全等级,对苏南 5 市土地生态安全的促进和抑制因素进行分析。

(1) 促进土地生态安全的主要为经济因素,包括单位土地面积 GDP(万元/km<sup>2</sup>)、单位土地面积财政收入(万元/km<sup>2</sup>)、农民人均纯收入(元)、城镇居民年人均可支配收入(元);此外,城镇登记失业率(%)也对该区域土地生态安全具有促进作用。除南京之外的四个城市建成区绿化水平普遍较高,促进了土地生态安全。第三产业占 GDP 的比例(%)、单位耕地化肥施用量(kg/hm<sup>2</sup>)和城镇生活污水处理率(%)对苏南 5 市的

土地生态安全虽然具有促进作用,但是作用力度较小,反映在生态安全等级上则是临界安全状态。

(2) 抑制土地生态安全的因素在各个城市不尽相同。① 在农业方面,耕地用电量是导致南京、常州和镇江在研究期内土地生态不安全的重要因素,然而却有助于提高无锡和苏州市的土地生态安全。这反映出苏州、无锡市作为江苏省经济发展排名前两位的地区,农业现代化水平比其他地区更高。再者,单位耕地农药施用量是促进南京土地生态安全的因素,却是造成其它 4 个城市土地生态不安全的主要因素之一。可见,苏南作为经济发达地区,存在农药使用量

偏高的问题,可能会带来土壤的污染。② 在工业方面,南京市的单位土地面积二氧化硫排放量一直处于不安全等级,该指标却对苏州和镇江地区的土地生态安全做出了贡献。工业废水的排放显著抑制了常州地区土地生态安全水平,对苏州和无锡市的影响表现出不稳定性,但在南京和镇江地区该指标一直保持在较安全和安全的等级。③ 人口密度带来的影响也不尽相同。该因素对南京、无锡和常州市的土地生态安全带来较大压力,而苏州和镇江市受到的影响较小。此外,南京和无锡市的人口自然增长率也对土地生态安全具有抑制作用。

表 2 南京市 2003,2006,2009 年土地生态安全评价结果

关联度	2003 年				等级	2006 年等级	2009 年等级
	安全	较安全	临界安全	不安全			
$k_j(c_1)$	-0.016	0.012	-0.006	-0.016	较安全	较安全	较安全
$k_j(c_2)$	-0.044	-0.038	-0.020	0.020	不安全	临界安全	较安全
$k_j(c_3)$	-0.040	-0.026	0.021	-0.017	临界安全	较安全	安全
$k_j(c_4)$	-0.059	-0.054	-0.038	0.032	不安全	临界安全	较安全
$k_j(c_5)$	-0.052	-0.050	-0.045	0.011	不安全	临界安全	安全
$k_j(c_6)$	-0.067	-0.068	-0.065	0.004	不安全	不安全	不安全
$k_j(c_7)$	-0.060	-0.050	-0.021	0.021	不安全	临界安全	较安全
$k_j(c_8)$	-0.019	-0.012	-0.002	0.002	不安全	临界安全	较安全
$k_j(c_9)$	-0.031	-0.023	-0.008	0.008	不安全	不安全	不安全
$k_j(c_{10})$	-0.029	0.010	-0.008	-0.025	较安全	较安全	较安全
$k_j(c_{11})$	-0.013	0.021	-0.024	-0.047	较安全	安全	较安全
$k_j(c_{12})$	-0.031	-0.029	-0.009	0.009	不安全	临界安全	不安全
$k_j(c_{13})$	-0.016	0.021	-0.012	-0.020	较安全	安全	不安全
$k_j(c_{14})$	-0.041	-0.032	-0.023	0.023	不安全	不安全	不安全
$k_j(c_{15})$	-0.007	0.005	-0.036	-0.041	较安全	不安全	不安全
$k_j(c_{16})$	-0.063	-0.059	-0.052	0.022	不安全	较安全	较安全

### 3.2 苏南地区土地生态安全总体分析

将苏南 5 市 2003,2006 和 2009 年的评价指标数

值代入物元模型,得到 5 个城市 3 a 的土地生态安全等级(表 3)。

表 3 苏南 5 市 2003,2006 和 2009 年土地生态安全评价结果

年份	南京市	无锡市	常州市	苏州市	镇江市
2003	向不安全转化	向不安全转化	向不安全转化	向临界安全转化	向不安全转化
2006	向临界安全转化	向不安全转化	向不安全转化	向临界安全转化	向不安全转化
2009	向较安全转化	向安全转化	向较安全转化	向安全转化	向较安全转化

由表 3 分析苏南各市的土地生态安全的变化趋势,可以得出:(1) 从时间上来看,以 2003 年为基期,该年度只有苏州市的土地生态安全情况较好,处于“向临界安全转化”的状态,其它 4 个城市处于“向不安全转化”的状态。到了 2009 年,苏南 5 市的土地生态安全都有不同程度的提升,无锡和苏州表现为“向安全转化”,而南京、常州和镇江市向较安全等级转化。(2) 从程度上来看,南京和苏州市的土地生态安

全呈现稳步良性变化的态势,2006 和 2009 年分别提高一个等级,而无锡、常州和镇江市则呈现跳跃式的变化,猛然由“向不安全转化”向更高等级转化,尤其是无锡市,从“向不安全转化”到“向安全转化”,变化程度剧烈。总体来说,苏州市具备较好的土地生态安全基础,并稳步良性发展,这和该市注重生态建设密切相关。2009 年该市实施了 204 项主要污染物减排项目,二氧化硫减排  $5.03 \times 10^4$  t,培育循环经济试点

企业 100 家,并建成了 44 个环境优美镇和 435 个省级生态村。因此,苏州市今后要继续保持这种态势,南京、常州和镇江市的土地生态安全则还有进一步优化的空间。

#### 4 结论

苏南 5 市的土地生态安全从 2003 年到 2009 年均表现出向较高等级转化的态势,其中南京和苏州市的土地生态安全稳步发展,无锡、常州和镇江市呈现跳跃式的发展趋势。

经济因素是促进研究区土地生态安全的主导因素,抑制因素表现出明显的区域差异。农药的使用对无锡、常州、苏州和镇江市的土地生态安全带来较大威胁;工业废气排放显著抑制了南京的土地生态安全,工业废水排放对苏州和无锡市带来一定影响,而镇江市则基本不受这两方面因素影响;人口密度的影响在苏南 5 市也不尽相同。在经济方面,苏南地区一方面要保持较高的土地经济效益,另一方面需进一步优化产业结构,提高第三产业比重。在自然环境方面,特别要注意农药的合理利用;控制工业废水、废气的排放,尤其是苏州、无锡和南京地区;保持现有生活污水、垃圾的无害化处理水平和绿化水平,并进一步提高。此外,控制城市扩张速度,控制人口自然增长率,维持合理的人口密度,并注重保持较低的失业率,都有助于提高城市土地生态安全等级。

土地生态安全评价是一项复杂的系统工程,物元模型在该领域的应用也处于尝试阶段。在今后的研究中,评价指标的选取,经典域和值域的确定等问题都有待进一步深入探讨。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王涛,宋翔,颜长珍,等.近 35 年来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J].中国沙漠,2011,31(6):1351-1356.
- [2] 刘宁.深入贯彻水土保持法 推动中国特色水土保持生态建设迈上新台阶[J].中国水利,2011(12):17.
- [3] 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.
- [4] 潘竟虎,石塔基,刘英英.干旱区县域土地利用规划环境影响的生态安全评价:以张掖市甘州区为例[J].水土保持通报,2012,32(1):248-254.
- [5] 谢花林.基于 GIS 的典型农牧交错区土地利用生态安全评价[J].生态学杂志,2008,27(1):135-139.
- [6] 张军以,苏维词,张凤太.基于 PSR 模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J].中国环境科学,2011,31(6):1039-1044.
- [7] 余敦,高群,欧阳龙华.鄱阳湖生态经济区土地生态安全警情研究[J].长江流域资源与环境,2012,21(6):678-683.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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,2007,2(3):1-6.
- [12] 罗文斌,吴次芳,汪友结,等.基于物元分析的城市土地生态水平评价:以浙江省杭州市为例[J].中国土地科学,2008,22(12):31-38.
- [13] 李佩武,李贵,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.
- [14] 李静,李子君,吕建树.聊城市土地生态安全评价[J].水土保持通报,2011,31(2):198-202.
- [15] 曲衍波,齐伟,商冉,等.基于 GIS 的山区县域土地生态安全评价[J].中国土地科学,2008,22(4):38-44.
- [16] 付伟章,曲衍波,齐伟,等.东部小城镇土地生态安全评价方法及应用:以山东省大汶口镇为例[J].农业现代化研究,2006,27(3):202-205.
- [17] 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.
- [18] 刘勇,刘友兆,徐萍.区域土地资源生态安全评价:以浙江嘉兴市为例[J].资源科学,2004,26(3):69-76.
- [19] 高桂芹,韩美.区域土地资源生态安全评价:以山东省枣庄市中区为例[J].水土保持研究,2005,12(5):271-273.
- [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] 罗文斌,吴次芳.中国农村土地整理绩效区域差异及其影响机理分析[J].中国土地科学,2012,26(6):35-42.
- [22] 郑华伟,张锐,杨兴典,等.基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价及障碍因子诊断[J].长江流域资源与环境,2012,21(9):1099-1105.