

# 基于 DPSIR 模型的合肥市土地生态安全物元分析评价

卢涛, 王占岐, 魏超, 谭旭, 刘辉

(中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074)

**摘要:**为了探究承接产业转移示范区的土地生态安全状况,在阐述土地生态安全概念的基础上,基于“驱动力—压力—状态—影响—响应”模型构建土地生态安全评价指标体系,商权法与层次分析法相结合测算各指标权重,运用物元分析法构建土地生态安全评价的综合评判模型,并以合肥市为例进行了实证研究。结果表明:2005—2009 年、2011 年合肥市土地生态安全级别为“不安全”,2010 年为“较不安全”,2012 年合肥市土地生态安全级别为“临界安全”;总体来看,2005—2012 年合肥市土地生态安全呈现从“不安全”到“临界安全”跃升的趋势。该结论可为承接产业转移的合肥市社会经济健康、持续发展提供理论依据。

**关键词:**土地;生态安全评价;DPSIR 模型;物元分析;合肥市

**中图分类号:**F301.24

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)04-0221-07

## Evaluation of Land Ecological Security of Hefei City Based on the DPSIR Model and Matter Element Analysis

LU Tao, WANG Zhanqi, WEI Chao, TAN Xu, LIU Hui

(School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to explore the land ecological security situation of industrial transfer demonstration region, on the basis of the concept of land security and driving-pressure-state-impact-response model, the land ecological security evaluation indicator system was established. Analytic hierarchy process(AHP)and quotient method were applied to determine the weight of indicators. Matter-element analysis method was used to build the comprehensive evaluation model of land ecological security evaluation, and Hefei City was taken as an example for the case study. Through analysis, we draw the following conclusions. The land ecological security level of Hefei from 2005 to 2009 and 2011 was insecurity, it was less security in 2010, and was critical security in 2012. Overall, the trend of land ecological security in Hefei city zoomed from insecurity to critical security. The conclusion could be used to provide theoretical basis for the social and economic sustainable development under the situation of industrial transformation in Hefei city.

**Keywords:** land; ecological security evaluation; DPSIR model; matter-element analysis; Hefei City

随着工业化城镇化步伐的加快、经济的快速发展,人类对土地资源的需求在不断增加,未利用土地所剩无几;然而,在已利用土地的开发利用中,由于人类对土地利用方式的不尽合理导致生态环境破坏、耕地减少、土地污染等现象存在。土地承受了巨大的人口压力、环境压力与资源压力,土地生态安全问题愈加突显<sup>[1]</sup>。

土地生态安全评价是当前土地生态安全研究的重要环节和主要方向,土地生态安全状态的准确把握对区域社会经济可持续发展、资源可持续利用、生态环境保护具有重要的意义<sup>[2]</sup>。由于土地受到自然、社

会、经济各方面因素的影响以及土地生态系统的复杂性,目前,土地生态安全的概念还没有明确的定义,一般认为,土地生态安全是指土地资源所处的生态环境处于一种不受或少受威胁与破坏的状态<sup>[3]</sup>。近年来,学者们关于土地生态安全领域的研究也在不断深入:马红莉等<sup>[4]</sup>基于物元分析模型,采用 PSR 模型建立土地生态安全评价指标体系,对青海省土地生态安全进行研究;张杨等<sup>[5]</sup>基于正态云模型,从自然子系统、经济子系统、社会子系统构建土地生态安全评价指标体系,并以湖北省为例,对区域土地生态安全状况进行了定量测度;黄海等<sup>[6]</sup>以重庆市合川区为例,采用

生态足迹方法探讨了土地生态安全问题;裴婷婷等<sup>[7]</sup>运用 PSR 模型和层次分析法构建土地生态安全的评价指标体系,并对甘肃省白银市土地生态安全进行研究等。从已有研究文献中来看,目前在评价方法上引入了物元模型、正态云模型、生态足迹等研究方法,所构建的土地生态安全评价指标体系大多也是采用“自然—社会—经济”模型和“压力—状态—响应”模型(PSR 模型);虽然这两种模型应用比较广泛,但是在实际应用中,还存在一些不足:PSR 模型通过构建环境指标体系来间接反映人类对环境的影响,其对系统的结构表示还不够完整;“自然—社会—经济”模型对系统间相互作用过程的反映也不够全面<sup>[8]</sup>。相比之下,DPSIR 模型是 PSR 模型的发展与理论补充,弥补了指标维度的不足,已得到普遍认同。但是检索发现,目前 DPSIR 模型在土地生态安全评价领域研究的文献很少;靖宇等<sup>[9]</sup>基于 DPSIR 模型,运用综合指数方法对广东省佛冈县土地生态安全进行研究;江勇等<sup>[10]</sup>基于 DPSIR 模型,运用综合指数方法对河北永清县土地生态安全状况进行评价等,虽然在土地生态安全评价研究中引入了 DPSIR 模型,但是在评价方法上缺乏先进性。基于此背景,本文尝试将 DPSIR 模型与物元分析模型相结合,基于 DPSIR 模型构建土地生态安全评价指标体系,商权法与层次分析法(AHP)相结合测算各指标权重,并以皖江城市带承接产业转移示范区的合肥市为例,运用物元分析模型对 2005—2012 年合肥市土地生态安全状况进行定量分析评价,同时对单指标进行分析,以期承接产业转移示范区的合肥市社会经济健康、持续发展提供理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 DPSIR 模型

国际经济合作与发展组织(OECD)最先提出“压力—状态—响应”模型(PSR 模型);然后,联合国可持续发展委员会(UNCSD)提出驱动力—状态—响应(DSR)模型;在此基础上,欧洲环境署提出“驱动力—压力—状态—影响—响应”模型(DPSIR 模型)<sup>[10]</sup>。DPSIR 模型是从系统论的角度来表述引发生态环境问题的起源与结果关系的一条因果链,在 DPSIR 模型中,社会经济发展与人口的增长作为长期驱动力(D)对环境产生压力(P),压力又会造成生态环境状态(S)发生改变,从而对生态环境产生一系列的影响(I),这些影响又会使人们采取一系列的响应(R)措施来改善生态环境,以此来寻求人与自然和谐发展<sup>[11-12]</sup>。

### 1.2 物元模型

物元分析法由蔡文教授于 20 世纪 80 年代初创立,它能够有效地处理多因子间不相容的问题。由于土地生态安全评价涉及的指标较多,单方面将分散的指标信息通过模型加成,再根据已分的等级标准来确定评价结果容易丢失单指标的一些信息;而物元模型能够有效处理指标间不相容的问题,分析的结果也是以定量数值表示,因此,可以比较客观地反映事物的实际情况<sup>[13]</sup>。物元分析模型的构建主要有以下四个步骤<sup>[14-16]</sup>。

1.2.1 土地生态安全物元的建立 土地生态安全  $N$ ,其特征向量  $c$  和特征量值  $\beta$  共同构成土地生态安全物元,土地生态安全  $N$  的特征分别用  $c_1, c_2, \dots, c_n$  表示,相应的量值分别为  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ,则:

$$N = \begin{bmatrix} N & c_1 & \beta_1 \\ & c_2 & \beta_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \beta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}$$

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

1.2.2 土地生态安全经典域与节域的建立 土地生态安全经典域物元  $R_{op}$ ,则经典域物元矩阵:

$$R_{op} = (N_{op}, c_i, v_{opi}) = \begin{bmatrix} N_{op} & c_1 & v_{op1} \\ & c_2 & v_{op2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{opn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{op} & c_1 & (a_{op1}, b_{op1}) \\ & c_2 & (a_{op2}, b_{op2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{opn}, b_{opn}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

土地生态安全节域物元  $R_q$ ,则节域物元矩阵:

$$R_q = (N_q, c_i, v_{qi}) = \begin{bmatrix} N_q & c_1 & (a_{q1}, b_{q1}) \\ & c_2 & (a_{q2}, b_{q2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{qn}, b_{qn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $N_{op}$ ——土地生态安全的第  $p$  个评价等级 ( $p = 1, 2, \dots, n$ ); $c_i$ ——第  $i$  个评价指标; $\langle a_{opi}, b_{opi} \rangle$ —— $c_i$  对应评价等级  $p$  的量值取值区间,即经典域的取值区间; $v_{qi} = \langle a_{qi}, b_{qi} \rangle$ ——节域物元关于特征  $c_i$  的量值取值区间, $q$  表示土地生态安全评价等级的全体,则有  $\langle a_{opi}, b_{opi} \rangle \supset \langle a_{qi}, b_{qi} \rangle (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

1.2.3 待评物元和关联函数及关联度的建立 设  $R_x$  为待评对象  $N_x$  的物元,则:

$$R_x = \begin{bmatrix} N & c_1 & \beta_1 \\ & c_2 & \beta_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \beta_n \end{bmatrix}$$

令有界区间  $X_i = [m, n]$  的模式定义为:

$$|X_i| = |m - n| \quad (3)$$

某一点  $x$  到有界区间  $X_i = [m, n]$  的距离为:

$$p(x, X_i) = \left| x - \frac{1}{2}(m+n) \right| - \frac{1}{2}(n-m) \quad (4)$$

则关联函数  $K(x_i)$  可表示为:

$$K(x_i) = \begin{cases} \frac{-p(x, X_i)}{|X_i|} & x \in X_i \\ \frac{p(x, X_i)}{p(x, X_k) - p(x, X_i)} & x \notin X_i \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $p(x, X_i)$ ——点  $x$  与有界区间  $X_i = [m, n]$  的距离;  $p(x, X_k)$ ——点  $x$  与有界区间  $X_k = [m_k, n_k]$  的距离;  $x, X_i, X_k$ ——待评价土地生态安全物元的量值、经典域物元和节域物元的量值范围。

1.2.4 综合关联度的计算与评价等级的确定 设  $K_p(N_x)$  为  $N_x$  关于等级  $p$  的综合关联度, 则:

$$K_p(N_x) = \sum_{i=1}^n W_{ip} K_p(x_i) \quad (6)$$

式中:  $K_p(x_i)$ —— $N_x$  的第  $i$  个指标关于等级  $p$  的单指标关联度 ( $p = 1, 2, \dots, n$ );  $W_{ip}$ ——各评价指标的权重。

若  $K_{pi} = \max[K_p(x_i)]$ , ( $p = 1, 2, \dots, n$ ), 则待评价对象第  $i$  指标属于土地生态安全等级  $p$ ; 若  $K_{px} = \max[K_p(N_x)]$ , ( $p = 1, 2, \dots, n$ ), 则  $N_x$  属于土地生态安全等级  $p$ 。

关联度  $K_p(x_i)$  的数值在数轴上表示的是待评价对象隶属于某一标准的程度。物元模型将关联度从区间  $[0, 1]$  拓展到整个数轴, 能够揭示更多的分异信息。当  $K_p(x_i) \geq 1$  时, 说明待评价对象超过标准要求的上限, 数值越大就越易开发; 当  $0 \leq K_p(x_i) < 1$  时, 说明待评价对象符合标准要求, 数值越大越接近上限; 当  $-1 \leq K_p(x_i) < 0$  时, 说明待评价对象不符合标准要求, 但是具备转化条件; 当  $K_p(x_i) < -1$  时, 说明待评价对象不符合标准要求, 也不具备转化条件。

## 2 土地生态安全评价实证研究

### 2.1 研究区概况

合肥, 安徽省省会, 位于安徽省正中部, 长江、淮河之间, 是国家级皖江城市带承接产业转移示范区成员之一。土地面积达 1.14 万  $\text{km}^2$ , 常住人口达 755 万人, 占全省总人口的 12.6%。2013 年合肥市生产总值(GDP)4 672.9 亿元。合肥地处江淮丘陵, 总的地势是中部高, 南北低。合肥属亚热带湿润性季风气候, 全年气温冬寒夏热, 春秋温和, 属于暖温带向亚热带的过渡带气候类型, 年平均气温 15.7℃, 降雨量近 1 000 mm, 日照 2 100 多个小时。

### 2.2 数据来源与处理

本文研究数据来自于 2006—2013 年《合肥统计年鉴》、《安徽统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、合肥市环境质量状况公报和安徽省水资源公报。人口密度、森林覆盖率等指标数据可直接获取, 人均城市建设用地面积、人均耕地面积、空气污染指数等指标数据通过计算得出。其中, 空气污染指数是通过二氧化硫、二氧化氮以及可吸入颗粒物比重计算得出。

指标数据的标准化采用极差标准化法进行处理, 计算公式:

$$\text{正向指标: } M_{apq} = \frac{M_{pq} - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}}$$

$$\text{负向指标: } M_{apq} = \frac{M_{\max} - M_{pq}}{M_{\max} - M_{\min}}$$

式中:  $M_{apq}$ ——标准化后的值;  $M_{pq}$ ——第  $p$  个子系统第  $q$  个指标的实际值;  $M_{\max}$ ——第  $q$  个指标中最大值;  $M_{\min}$ ——第  $q$  个指标中最小值。

### 2.3 评价指标体系构建

土地生态安全评价模型以 DPSIR 模型为基础, 从驱动力、压力、状态、影响、响应五个部分构建评价指标体系, 每个部分又是由若干评价指标构成<sup>[9]</sup>。人口增长与社会经济发展作为驱动力给土地生态造成压力, 引起建设用地扩张、能源需求增加、耕地减少、森林破坏、土地污染等一系列问题, 这些问题又会对人类社会与生态环境产生影响, 从而引起人们对生态环境恶化做出响应, 并采取相关措施来改善土地生态环境, 使得土地生态健康、持续发展。本文考虑到合肥市作为皖江城市带承接产业转移示范区核心城市, 在承接产业转移、加快经济发展的同时对土地生态可能造成的影响, 同时根据指标的可操作性和科学性、研究数据的可获取性, 本文以土地生态安全为目标层, 驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个层次为准则层, 27 个具体指标具有承接产业转移区域特色的土地生态安全评价指标体系, 见表 1。

### 2.4 确定指标体系权重

权重确定有客观赋权法和主观赋权法<sup>[17]</sup>, 主观赋权法虽然体现了专家的知识 and 经验, 确定的指标权重也比较合理, 然而无法克服主观随意性的干扰; 由于指标权重的确定直接关系到研究的结果, 为了避免人为因素的干扰, 充分挖掘各指标原始数据信息, 本文把层次分析法(AHP)确定的权重  $W_1$  和熵权法确定的权重  $W_2$  相结合, 得到各指标权重  $W$ 。

$$W = aW_1 + (1-a)W_2 \quad 0 \leq a \leq 1$$

表 1 合肥市土地生态安全评价指标体系与权重

目标层	准则层	指标层	单位	指标性质	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W
土地生态安全	驱动力 D	D <sub>1</sub> 人口密度	人/km <sup>2</sup>	—	0.0274	0.0491	0.0382
		D <sub>2</sub> 人口自然增长率	‰	—	0.0217	0.0301	0.0259
		D <sub>3</sub> 人均 GDP	元/人	+	0.0345	0.0372	0.0358
	压力 P	P <sub>1</sub> 人均当地水资源量	m <sup>3</sup>	+	0.0297	0.0526	0.0411
		P <sub>2</sub> 人均城市建设用地面积	m <sup>2</sup>	—	0.0518	0.0319	0.0419
		P <sub>3</sub> 农药使用强度	kg/hm <sup>2</sup>	—	0.0297	0.0412	0.0354
		P <sub>4</sub> 化肥使用强度	kg/hm <sup>2</sup>	—	0.0297	0.0262	0.0280
		P <sub>5</sub> 城镇居民恩格尔系数	‰	—	0.0342	0.0390	0.0366
	状态 S	S <sub>1</sub> 万元 GDP 能耗	tce	—	0.0292	0.0326	0.0309
		S <sub>2</sub> 万元 GDP 水耗	m <sup>3</sup>	—	0.0367	0.0277	0.0322
		S <sub>3</sub> 森林覆盖率	‰	+	0.0463	0.0838	0.0651
		S <sub>4</sub> 建成区绿化覆盖率	‰	+	0.0463	0.0230	0.0347
		S <sub>5</sub> 人均住房面积	m <sup>2</sup> /人	+	0.0206	0.0755	0.0480
		S <sub>6</sub> 人均耕地面积	hm <sup>2</sup> /人	+	0.0520	0.0588	0.0554
	影响 I	I <sub>1</sub> 万元 GDP 工业烟尘排放强度	t/万元	—	0.0272	0.0368	0.0320
		I <sub>2</sub> 万元 GDP 固废排放强度	t/万元	—	0.0300	0.0180	0.0240
		I <sub>3</sub> 万元 GDP COD 排放强度	t/万元	—	0.0331	0.0323	0.0327
		I <sub>4</sub> 空气污染指数	—	—	0.0300	0.0244	0.0272
		I <sub>5</sub> 人均公共绿地面积	m <sup>2</sup> /人	+	0.0404	0.0438	0.0421
		I <sub>6</sub> 环保投资占 GDP 比例	‰	+	0.0446	0.0488	0.0467
		I <sub>7</sub> 第三产业占 GDP 比例	‰	+	0.0600	0.0273	0.0437
	响应 R	R <sub>1</sub> 工业废水排放达标率	‰	+	0.0401	0.0217	0.0309
		R <sub>2</sub> 工业用水重复利用率	‰	+	0.0505	0.0235	0.0370
		R <sub>3</sub> 城市生活污水处理率	‰	+	0.0318	0.0317	0.0318
		R <sub>4</sub> 城市生活垃圾无害化处理率	‰	+	0.0318	0.0177	0.0247
		R <sub>5</sub> 工业固体废弃物综合利用率	‰	+	0.0505	0.0285	0.0395
		R <sub>6</sub> 每万人拥有高等学历人数	人	+	0.0401	0.0368	0.0384

注：指标类型，“—”表示反向指标，即指标值越小越好的指标；“+”表示正向指标，即指标值越大越好的指标。

2.4.1 AHP 法确定指标权重 将土地生态安全指数作为最高的目标层,将驱动力、压力、状态、影响、响应作为准则层,选取的具体评价因子作为指标层,从而构建一个由三个层次所组成的土地生态安全评价指标体系结构模型。通过目标层——准则层以及准则层——指标层两级判断矩阵的构造、特征向量以及最大特征根的求解、一致性检验等计算得出各指标的权重 W<sub>1</sub><sup>[18]</sup>。

2.4.2 熵权法确定指标权重 熵权法是一种客观的赋权法,其权重系数的确定是根据数据序列变异程度,指标的熵值越小,该指标提供的信息量就越大,权重就越高;相反,权重就越低<sup>[19-20]</sup>。指标标准值占总标准化值的比重为 f<sub>pq</sub>,则:

$$f_{pq} = y_{pq} / \sum_{p=1}^n (y_{pq})$$

第 q 项指标的熵值 e<sub>q</sub>,则:

$$e_q = -k \sum_{p=1}^n (f_{pq} \ln f_{pq}) \quad (k = \frac{1}{\ln n}; \text{当 } f_{pq} = 0 \text{ 时,}$$

令 f<sub>pq</sub> ln f<sub>pq</sub> = 0)

第 q 项指标的熵权 W<sub>q</sub>,则:W<sub>q</sub> = (1 - e<sub>q</sub>) / ∑<sub>q=1</sub><sup>n</sup> (1

$$-e_q) (0 \leq W_q \leq 1, \sum_{q=1}^n W_q = 1)$$

式中:W<sub>q</sub>——第 q 项指标的熵权值,即权重;e<sub>q</sub>——第 q 项指标的熵值;n——研究期;q——指标个数。

根据本文指标体系的实际情况,赋权系数 a 取 0.5,结果见表 1。

2.5 土地生态安全评价经典域和节域的确定

由于物元模型的可拓性,可将土地生态安全物元模型划分为 N<sub>1</sub>,N<sub>2</sub>,N<sub>3</sub>,N<sub>4</sub>,N<sub>5</sub> 共 5 个等级,分别表述为“不安全”、“较不安全”、“临界安全”、“较安全”、“安全”。

根据安徽省平均水平、《生态县、生态市建设规划编制大纲(试行)》标准值、国际标准值、全国平均值及相关文献<sup>[14,21-23]</sup>讨论的结果来确定经典域。在此基础上建立合肥市土地生态安全评价经典域物元矩阵 R<sub>p</sub> 和节域物元矩阵 R<sub>q</sub>,见表 2。

3 结果与分析

将各指标数据输入模型,可得到相应的计算结果。以 2012 年 C<sub>1</sub> 人口密度指标(人/km<sup>2</sup>)为例,将 D<sub>1</sub> = 661.60 输入模型,得到该指标对应各评价等级

的关联度分别为:

$K_1(D_1)=0.017\ 6, K_2(D_1)=-0.020\ 6, K_3(D_1)=-0.028\ 6, K_4(D_1)=-0.030\ 4, K_5(D_1)=-0.030\ 9$ ,可判定该指标属于  $N_1$ ,即属于“不安全”水平,同理可得到其他指标的相关数值。由于本文研究数据较多,故只列出 2012 年各指标所对应各评价等级的关联度(表 3)。将得到的各指标所对

应各评价等级的关联度与其对应的权重(表 1)输入式(6),加权求和可得出综合关联度(表 4)。分别为  $K_1(N_{2\ 012})=-0.307\ 6, K_2(N_{2\ 012})=-0.346\ 9, K_3(N_{2\ 012})=-0.302\ 2, K_4(N_{2\ 012})=-0.321\ 3, K_5(N_{2\ 012})=-0.397\ 5$ ,可判定 2012 年合肥市土地生态安全级别为  $N_3$ ,即“临界安全”级别。同样的方法可求得合肥市 2005—2011 年土地生态安全级别。

表 2 经典域与节域取值范围

评价 指标	经典域取值空间					节域取值 区间
	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	
$D_1$	500~800	250~500	120~250	80~120	0~80	0~800
$D_2$	9.6~12.0	8~9.6	5~8	3~5	0~3	0~12
$D_3$	0~7600	7600~33000	33000~75000	75000~100000	100000~200000	0~200000
$P_1$	300~500	500~1000	1000~1500	1500~2000	2000~3000	300~3000
$P_2$	130~150	120~130	115~120	105~115	95~105	95~150
$P_3$	20~25	15~20	10~15	5~10	0~5	0~25
$P_4$	600~1000	450~600	350~450	250~350	0~250	0~1000
$P_6$	40~50	35~40	30~35	25~30	0~25	0~50
$S_1$	0.9~1.5	0.75~0.9	0.3~0.75	0.1~0.3	0~0.1	0~1.5
$S_2$	200~300	100~200	75~100	50~75	0~50	0~300
$S_3$	0~20	20~30	30~40	40~45	45~60	0~60
$S_4$	0~20	20~30	30~40	40~45	45~60	0~60
$S_5$	0~10	10~20	20~25	25~35	35~40	0~40
$S_6$	0~0.02	0.03~0.05	0.05~0.07	0.07~0.1	0.1~0.2	0~0.2
$I_1$	0.0015~0.008	0.00075~0.0015	0.0003~0.00075	0.0001~0.0003	0~0.0001	0~0.008
$I_2$	0.5~3	0.25~0.5	0.1~0.25	0.05~0.1	0~0.05	0~3
$I_3$	0.005~0.006	0.003~0.005	0.0025~0.003	0.0015~0.0025	0~0.0015	0~0.006
$I_4$	200~300	150~200	100~150	50~100	0~50	0~300
$I_5$	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	0~25
$I_6$	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	0~5
$I_7$	0~30	30~40	40~50	50~60	60~80	0~80
$R_1$	0~80	80~85	85~90	90~95	95~100	0~100
$R_2$	0~80	80~85	85~90	90~95	95~100	0~100
$R_3$	0~80	80~85	85~90	90~95	95~100	0~100
$R_4$	0~80	80~85	85~90	90~95	95~100	0~100
$R_5$	0~80	80~85	85~90	90~95	95~100	0~100
$R_6$	0~500	500~900	900~1200	1200~1500	1500~2000	0~2000

3.1 合肥市土地生态安全状况分析

从表 4 中可以看出,2005—2009 年、2011 年合肥市土地生态安全级别为“不安全”,2010 年为“较不安全”,2012 年为“临界安全”;虽然 2010—2012 年合肥市土地生态安全等级有所波动,但是总体来看,2005—2012 年合肥市土地生态安全呈现从“不安全”到“临界安全”跃升的趋势。2005—2012 年合肥市土地生态安全综合关联度处于-1 与 0 之间,说明合肥市土地生态安全评价不符合标准要求,但是具备转化的条件。 $K_5(N_{2009})>K_5(N_{2008})>K_5(N_{2007})>K_5(N_{2006})>K_5(N_{2005})$ 表明,虽然 2005—2009 年合肥市土地生态安全级别为“不安全”,但是土地生态安全程

度逐年提高。

2010 年的土地生态安全级别才开始出现好转,变为“较不安全”,但是还不够稳定。2011 年合肥市土地生态安全等级又转变为“不安全”,然而  $0>K_1(N_{2011})>K_3(N_{2011})$ ,且差距小,说明土地生态安全级别虽处于  $No_1$ ,但不完全符合  $No_1$  的标准,具备转化为  $No_3$  的条件,“不安全”水平不稳定。2012 年,合肥市土地生态安全等级又转变为“临界安全”,证实了 2011 年合肥市土地生态安全的不稳定性,虽然  $0>K_3(N_{2012})>K_1(N_{2012})$ ,且差距不大,说明虽然 2012 年合肥市土地生态安全级别为“临界安全”,但是同样不够稳定,有跌回“不安全”水平的可能。

表 3 土地生态安全评价指标关联度

关联度	2012 年						2005 年	2010 年
	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	等级	等级	等级年
$K_p(D_1)$	0.0176	-0.0206	-0.0286	-0.0304	-0.0309	不安全	不安全	不安全
$K_p(D_2)$	-0.0134	-0.0109	-0.0019	0.0047	-0.0068	较安全	较安全	临界安全
$K_p(D_3)$	-0.0166	-0.0103	0.0169	-0.0095	-0.0161	临界安全	较不安全	临界安全
$K_p(P_1)$	0.0187	-0.0187	-0.0347	-0.0374	-0.0385	不安全	较不安全	较不安全
$K_p(P_2)$	0.0053	-0.0053	-0.0175	-0.0209	-0.0256	不安全	较不安全	较不安全
$K_p(P_3)$	-0.0080	0.0146	-0.0104	-0.0187	-0.0229	较不安全	不安全	不安全
$K_p(P_4)$	0.0048	-0.0232	-0.0245	-0.0250	-0.0254	不安全	不安全	不安全
$K_p(P_5)$	-0.0098	-0.0018	0.0059	-0.0077	-0.0135	临界安全	不安全	较不安全
$K_p(S_1)$	-0.0103	-0.0061	0.0102	-0.0103	-0.0141	临界安全	不安全	较不安全
$K_p(S_2)$	-0.0200	-0.0078	0.0004	-0.0004	-0.0082	临界安全	较不安全	临界安全
$K_p(S_3)$	-0.0130	0.0215	-0.0072	-0.0216	-0.0265	较不安全	不安全	较不安全
$K_p(S_4)$	-0.0218	-0.0176	-0.0090	-0.0005	0.0005	安全	临界安全	临界安全
$K_p(S_5)$	-0.0304	-0.0216	-0.0128	0.0192	-0.0170	较安全	较不安全	较安全
$K_p(S_6)$	-0.0197	0.0102	-0.0061	-0.0202	-0.0307	较不安全	较不安全	较不安全
$K_p(I_1)$	0.0010	-0.0310	-0.0311	-0.0312	-0.0312	不安全	不安全	不安全
$K_p(I_2)$	0.0096	-0.0144	-0.0153	-0.0157	-0.0159	不安全	不安全	不安全
$K_p(I_3)$	-0.0222	-0.0152	-0.0118	0.0033	-0.0019	较安全	较不安全	安全
$K_p(I_4)$	-0.0139	-0.0094	-0.0005	0.0011	-0.0089	较安全	较安全	较安全
$K_p(I_5)$	-0.0152	-0.0049	0.0126	-0.0098	-0.0179	临界安全	较不安全	临界安全
$K_p(I_6)$	0.0220	-0.0248	-0.0357	-0.0394	-0.0412	不安全	不安全	不安全
$K_p(I_7)$	-0.0123	-0.0045	0.0179	-0.0062	-0.0134	临界安全	临界安全	临界安全
$K_p(R_1)$	-0.0255	-0.0237	-0.0201	-0.0093	0.0093	安全	安全	安全
$K_p(R_2)$	-0.0274	-0.0242	-0.0178	0.0015	-0.0014	较安全	临界安全	安全
$K_p(R_3)$	-0.0297	-0.0290	-0.0276	-0.0235	0.0083	安全	不安全	安全
$K_p(R_4)$	-0.0247	-0.0247	-0.0247	-0.0247	0.0000	安全	较安全	安全
$K_p(R_5)$	-0.0275	-0.0236	-0.0156	0.0083	-0.0058	安全	安全	安全
$K_p(R_6)$	-0.0250	-0.0201	-0.0132	0.0032	-0.0018	较安全	临界安全	临界安全

表 4 合肥市 2005—2012 年土地生态安全综合关联度

综合关联度	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	等级
$K_p(N_{2005})$	-0.1550	-0.2105	-0.3634	-0.4454	-0.5144	不安全
$K_p(N_{2006})$	-0.1842	-0.2784	-0.4119	-0.5256	-0.5109	不安全
$K_p(N_{2007})$	-0.2147	-0.3112	-0.3550	-0.4068	-0.4663	不安全
$K_p(N_{2008})$	-0.1572	-0.2960	-0.3440	-0.4672	-0.4646	不安全
$K_p(N_{2009})$	-0.2179	-0.3336	-0.3342	-0.4416	-0.4488	不安全
$K_p(N_{2010})$	-0.3298	-0.2946	-0.3009	-0.4086	-0.3807	较不安全
$K_p(N_{2011})$	-0.3008	-0.3197	-0.3118	-0.3037	-0.3978	不安全
$K_p(N_{2012})$	-0.3076	-0.3469	-0.3022	-0.3213	-0.3975	临界安全

3.2 各子系统土地生态安全状况分析

(1) 驱动力系统方面,其 2005 年和 2012 年“安全”等级的综合关联度分别为-0.064 6 和-0.053 8,说明土地生态安全等级总体上呈上升趋势,这主要与人均 GDP 提升有关。2005 年以来,合肥市经济快速发展,人均 GDP 由 2005 年的 20 560 元增长到 2012 年的 55 182 元,增长了 168.40%,这给合肥市土地生态安全提供强劲支撑。人口自然增长率徘徊在“临界安全”水平;而人口密度一直都处于“不安全”水平,成为制约驱动力生态安全水平提升的主要因素之一。

(2) 压力系统方面,除了 2010 年处于“较不安全”水平外,其余 7 a 都处于“不安全”水平。虽然城镇居民恩格尔系数由“不安全”水平上升到“临界安全”水平,但是近年来,合肥市社会经济的发展在驱动土地生态安全好转的同时,也带来了巨大压力:建设用地盲目扩张、化肥农药的大量使用造成土地污染、水资源污染与不合理利用等问题十分明显,一直都处于“临界安全”水平以下,这对土地生态安全造成重大压力。合肥市在承接产业转移、加速经济发展的同时,应重点减轻土地生态的压力。

(3) 状态系统方面,其“安全”等级的综合关联度由 2005 年的-0.145 6 上升到 2012 年的-0.096 0,除了 2011 年为“临界安全”水平外,其余年份均处于“较不安全”状态。其中,除了  $S_6$  一直处于“较不安全”水平外,其他几项指标的安全等级均有所提升,说明降低能耗水耗、增加森林覆盖率等方面对提升土地生态安全方面有重要意义。整体来讲,在压力系统的影响下,状态系统生态安全水平提升较缓慢,政府部门接下来应该重点控制建设用地规模,加大对耕地的投入,加大土地整治力度,增加耕地面积,提高耕地质量。

(4) 影响系统方面,虽然状态系统的生态安全状况好转,但是影响系统的生态安全水平较低,其 2005 年与 2012 年的综合关联度分别为-0.033 4 和-0.031 0,且这 8 a 来一直都处于“不安全”水平。从单指标来看, $I_1, I_2, I_6$  处于“不安全”水平; $I_5, I_7$  处于“临界安全”水平, $I_4$  处于“较安全”水平,这六项指标一直没得到提升,而  $I_3$  波动幅度较大。政府部门应加快转变经济发展方式,大力发展第三产业,减少“三废”排放量,增加环保资金投入,增加人均公共绿地。

(5) 响应系统方面,随着生态环境问题凸显,人们环保意识增强,保护土地生态环境也日益受到重视。正因为合肥市在治理环境问题方面采取了一定的措施,使得各类污染物处理水平有所提升,污染物的排放总量也有所控制,各项指标由“临界安全”水平向“安全”水平都有不同程度提升。

## 4 结论

(1) 基于 DPSIR 模型,从驱动力、压力、状态、影响、响应五个方面选取了 27 项具体指标构建合肥市土地生态安全评价指标体系,商权法与层次分析法(AHP)相结合测算各指标权重,运用物元分析方法对 2005—2012 年合肥市土地生态安全进行评价,研究结论较为准确地反映了合肥市土地生态安全的实际情况,基本达到了预期的目标,说明本文的研究思路与方法可行,对后续研究提供一定的借鉴。

(2) 研究结果表明:2005—2009 年合肥市土地生态安全级别为“不安全”;2010 年 1 月 21 日皖江城市带承接产业转移示范区规划批复后,由于积极参与泛长三角区域发展分工,加快推进皖江城市带承接产业转移示范区建设,加快生态环境建设,2010 年合肥市土地生态安全级别为“较不安全”;2011 年合肥市行政区域扩大,巢湖水域成为合肥市“内湖”后,土地生态安全级别又转变为“不安全”;2012 年合肥市土地生态安全再次跃升到“临界安全”状态。虽然 2005—2012 年合肥市土地生态安全有所波动,但是

总体来看,2005—2012 年合肥市土地生态安全呈现从“不安全”到“临界安全”跃升的趋势。其中,人均住房面积、万元 GDP COD 排放强度、城镇居民恩格尔系数、人均 GDP、万元 GDP 能耗、森林覆盖率、建成区绿化覆盖率、每万人拥有高等学历人数出现不同等级的上升趋势,说明以上指标对合肥市土地生态安全水平的提升有重要贡献;人口密度、人均城市建设用地面积、人均耕地面积、人均当地水资源量、化肥使用强度、农药使用强度、万元 GDP 工业烟尘排放强度、万元 GDP 固废排放强度、万元 GDP 水耗、环保投资占 GDP 比例是制约合肥市土地生态安全水平提升的因素,今后需要下大力度进行这方面工作;人口自然增长率、第三产业占 GDP 比例、工业用水重复利用率、工业废水排放达标率、空气污染指数、城市生活污水处理率、人均公共绿地面积、城市生活垃圾无害化处理率、工业固体废弃物综合利用率变化较小。今后,政府部门一方面要继续完善当前的各项有效政策,应用科学发展观指导社会经济发展和产业转型,巩固已取得的成果以维护好当前生态环境状况;一方面在承接产业转移、加快经济发展的同时,应合理控制人口规模,引导建设用地有序扩张,保护好耕地以增加耕地面积,保护水资源,引导农民合理使用农药和化肥,改进生产工艺技术,降低工业烟尘、固废排放强度,降低能源消耗,扩大就业,并不断提高环保投资比例。

(3) 评价指标体系的全面性以及评价方法的科学合理性直接影响评价结果。然而,由于数据的可获取性、数据的连续性以及其他一些因素的制约,本文所建立的评价指标体系不一定全面;另外,目前关于经典域与节域的界定等问题缺乏统一的标准。因此,构建全面而合理的评价指标体系以及经典域与节域的界定等问题还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 舒瑞琴, 何太蓉, 班荣舶. 重庆市土地资源生态安全研究[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2013, 30(5): 44-48.
- [3] 杨春红, 张正栋, 田楠楠, 等. 基于 PSR 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.
- [4] 马红莉, 盖艾鸿. 基于熵权物元模型的青海省土地生态安全评价[J]. 中国农学通报, 2014, 30(2): 208-214.
- [5] 张杨, 严金明, 江平, 等. 基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 252-258.
- [6] 黄海, 刘长城, 陈春. 基于生态足迹的土地生态安全评价研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 193-196.

> 枯枝落叶层,可见墨西哥柏人工林生态系统现存碳储量主要集中在土壤层中。

不同层次土壤碳储量差异均达到了显著水平,0—50 cm 土层的碳储量占总土壤碳储量的 79.14%,是 50—100 cm 土层碳储量的 3.79 倍,可见土壤的碳储量主要集中在土壤的表层,在垂直分布上基本表现为随着土壤深度的增加而降低,与前人的研究结果相似<sup>[13-14]</sup>,墨西哥柏林土壤的碳储量为 66 t/hm<sup>2</sup>,低于中国森林平均土壤碳储量(193.55 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[15]</sup>,远低于长白山阔叶红松林土壤的碳储量(238.9 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[16]</sup>,这是由于亚热带水热条件好,枯枝落叶分解速率较快,土壤呼吸速率较。

#### 参考文献:

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994,263(5144):185-190.
- [2] Sundquist E T. The Global Carbon Dioxide Budget[J]. Science,1993,259(5097):934-941.
- [3] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报:英文版,2001,43(9):967-973.
- [4] Pibumrung P, Gajasen N, Popan A. Profiles of carbon stocks in forest, reforestation and agricultural land, Northern Thailand[J]. Journal of Forestry Research, 2008,19(1):11-18.
- [5] Cheng T R, Feng J Y, Ma Q Y, et al. Carbon pool and allocation of forest vegetation in Xiaolong Mountains, Gansu Province[J]. Acta Ecological Sinica, 2008,28(1):33-34.
- [6] 林益明,何建源,杨志伟,等. 武夷山甜槠群落凋落物的产量及其动态[J]. 厦门大学学报:自然科学版,1999,38(2):356-361.
- [7] 陈仁华. 武夷山甜槠林群落养分循环的研究[J]. 江西农业大学学报,2005,27(2):195-198.
- [8] 方晰,田大伦,项文化,等. 不同密度湿地松人工林中碳的积累与分配[J]. 浙江林学院学报,2003,20(4):374-379.
- [9] 叶功富,郭瑞红,卢昌义,等. 不同生长发育阶段木麻黄林生态系统的碳贮量[J]. 海峡科学,2008,10(2):3-7.
- [10] 杨智杰. 杉木、木荷人工林碳吸存与碳平衡研究[D]. 福州:福建农林大学,2007.
- [11] 杨玉盛. 杉木观光木混交林凋落物和细根对地力作用研究[J]. 北京林业大学学报,2003,25(5):10-14.
- [12] 袁立敏,闫德仁,王熠青,等. 沙地樟子松人工林碳储量研究[J]. 内蒙古林业科技,2011,37(1):9-13.
- [13] Detwiler R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils [J]. Biogeochemistry, 1986,2(1):67-93.
- [14] 叶功富. 海岸带木麻黄人工林生态系统的碳吸存与碳平衡态[D]. 福建厦门:厦门大学,2008.
- [15] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [16] 杨丽韞,罗天祥,吴松涛. 长白山原始阔叶红松林不同演替阶段地下生物量与碳、氮贮量的比较[J]. 应用生态学报,2005,16(7):1195-1199.

(上接第 227 页)

- [7] 裴婷婷,陈英,赵亚南,等. 基于 PSR 模型的白银市土地生态安全评价[J]. 中国农学通报,2014,30(2):215-221.
- [8] 徐美,朱翔,李静芝. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的湖南省土地生态安全评价[J]. 冰川冻土,2012,34(5):1265-1272.
- [9] 靖宇,王红梅. 基于 DPSIR 模型的土地生态安全评价研究:以广东省佛冈县为例[J]. 国土资源科技管理,2011,28(1):15-21.
- [10] 江勇,付梅臣,杜春艳,等. 基于 DPSIR 模型的生态安全动态评价研究:以河北永清县为例[J]. 资源与产业,2011,13(1):61-65.
- [11] 曹琦,陈兴鹏,师满江. 基于 DPSIR 概念的城市水资源安全评价及调控[J]. 资源科学,2012,34(8):1591-1599.
- [12] 张继权,伊坤朋,王秀峰. 基于 DPSIR 的吉林省白山市生态安全评价[J]. 应用生态学报,2011,22(1):189-195.
- [13] 张升元,于婧,罗洋洋,等. 基于物元分析法的武汉市土地资源安全评价[J]. 湖北大学学报:自然科学版,2013,34(4):405-410.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [17] 陶晓燕,章仁俊,徐辉,等. 基于改进熵值法的城市可持续发展能力的评价[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(5):38-41.
- [18] 杨俊. 土地整治项目实施后效益评价研究[D]. 北京:中国地质大学,2012.
- [19] 王鹏,况福民,邓育武,等. 湘南红壤丘陵区土地生态安全动态评价:以衡阳市为例[J]. 水土保持研究,2013,20(3):243-248.
- [20] 王鹏,赵莹,田亚平. 基于 GIS 的衡阳市生态环境脆弱性研究[J]. 水土保持研究,2009,16(4):24-29.
- [21] 王耕,高红娟,高香玲,等. 基于隐患因素的矿业城市生态安全评价研究[J]. 资源科学,2010,34(2):33-40.
- [22] 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.
- [23] 陶晓燕. 资源枯竭型城市生态安全评价及趋势分析:以焦作市为例[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(2):53-59.