

# 基于熵权系数和集对分析法的土地生态安全评价

## ——以河北省为例

卓凤莉

(郑州升达经贸管理学院 国际贸易系, 郑州 451191)

**摘要:** 土地生态安全是当前区域可持续发展研究的重要领域和热点问题。研究土地生态安全对实现土地合理利用具有重要的理论和现实意义。构建了土地生态安全评价指标体系, 鉴于土地生态安全评价的模糊性和不确定性, 将集对分析理论和熵权法相结合构建土地生态安全评价模型, 并根据模型对河北省 2003—2010 年的土地生态安全状况进行了评价。总体上看, 2005—2008 年间土地生态安全状况出现了一定的反复, 但是 2009 年之后出现了好转。河北省的土地生态安全状况总体上不容乐观, 有待于进一步改善。

**关键词:** 土地生态; 安全评价; 熵权系数法; 集对分析法; 河北省  
**中图分类号:** F321.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-2363(2012)06-0111-04

### 0 引言

近年来, 生态安全成为全球环境变化研究的重要领域和热点问题。土地是制约整个国家或区域经济社会发展的根本性要素。土地生态安全, 是指土地生态系统在保持其结构与功能不受威胁或少受威胁的健康、平衡的状态的前提下, 能够为保障人类社会经济与农业的可持续发展提供稳定、均衡的自然资源, 从而维持土地自然、社会、经济复合体的长期协调发展<sup>[1]</sup>。

目前, 国内外关于土地生态安全的评价研究还处于起步和探索阶段, 且主要集中在评价指标体系的构建和评价方法的选择方面。近年来, 许多学者从不同角度、选择不同研究区域进行了土地质量指标体系及土地可持续评价指标体系的研究<sup>[2]</sup>。目前比较常见的土地生态安全评价方法包括: 综合指数评价法、土地承载力分析法、景观生态学方法等。集对分析法( set pair analysis, 简称 SPA) 是一种多因素统计方法, 能够将确定性分析和不确定性分析相结合, 为解决由模糊不确定、随机不确定、中介不确定、以及由不知道和信息不完全等情况引起的不确定性问题提供了一条新的途径。

### 1 评价指标体系的构建

#### 1.1 评价指标的选取

土地生态安全受到多种因素的影响, 确定土地生态安全评价指标是一项探索性很强、很复杂的工作, 迄今为止还没有一个明确的、统一的标准。本研究考虑河北省土地生态特点, 从自然因素、经济因素和社会因素三

方面确定了土地生态安全评价体系(表1)。

由于各个指标对土地生态安全影响的性质不相同, 因此, 本研究将其分为正向指标和负向指标两大类。人均耕地面积、森林覆盖率、水土协调度(有效灌溉面积占耕地面积的比重)、年降水量等指标的值越大, 表明土地生态安全的状况越好; 人均 GDP、农民人均纯收入、经济密度(单位土地面积内的 GDP)、第三产业比重、机耕程度(机耕面积占耕地面积的比重)的值越大, 表明维护和改善土地生态安全的能力越强。耕地面积比重(耕地面积与土地面积的比值)、单位面积耕地化肥负荷、单位面积耕地农药负荷、人口自然增长率、人口密度、城镇登记失业率的值越大, 对土地的压力越大, 土地生态安全状况越差。

#### 1.2 评价标准的确定

评价标准的制定是土地生态安全评价的关键环节, 至今为止还没有一个统一的评价标准<sup>[3-8]</sup>。本研究将土地生态安全划分为5级: 安全、较安全、临界安全、较不安全、不安全。参考前人的研究成果, 本研究确定了各项指标所对应的各个级别的分界点(表1)。

### 2 土地生态安全评价模型

#### 2.1 SPA 法简介

根据问题  $E$  的需要, 对由两个集合  $A$  和  $B$  组成的集对  $H = (A, B)$  的特性展开分析, 共得到  $N$  个特性, 其中  $S$  为  $A$  和  $B$  共同具有的特性数,  $P$  为  $A$  和  $B$  相互对立的特性数,  $F = N - S - P$  为两个集合既不共同具有、也不相互对立的特性数, 则两个集合的联系度可通过下式刻画:

$$\mu = S/N + (F/N)i + (P/N)j \quad (1)$$

令  $a = S/N, b = F/N, c = P/N$ , 则式(1)简写为:

$$\mu = a + bi + cj \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为联系度, 又称为同异反联系度, 用来刻画所要

收稿日期: 2012-07-16; 修回日期: 2012-09-25  
作者简介: 卓凤莉(1978-), 女, 河南新乡市人, 讲师, 硕士, 主要从事产业经济研究, (E-mail) high95561@126.com。

表 1 土地生态安全评价指标体系及指标分级标准

Tab. 1 Evaluation index system of land ecological security and grading standards of indexes

目标层	要素层	指标层	指标分级标准				
			安全	较安全	临界安全	较不安全	不安全
土地生态安全评价指标体系	自然因素	人均耕地面积/hm <sup>2</sup>	0.10	0.08	0.06	0.05	0.03
		耕地面积比重/%	13.0	13.6	20.0	30.0	40.0
		森林覆盖率/%	60	40	30	15	5
		水土协调度/%	95	90	80	70	60
		年降水量/mm	1 000	800	400	250	100
	经济因素	人均 GDP/万元	6.5	4.0	2.5	1.0	0.3
		农民人均纯收入/万元	0.40	0.30	0.25	0.20	0.10
		第三产业比重/%	65	50	40	30	20
		经济密度/(万元·km <sup>-2</sup> )	300	200	100	90	85
		机耕程度/%	90	75	48	35	25
		单位面积耕地化肥负荷/(kg·hm <sup>-2</sup> )	255	450	850	1 200	1 500
		单位面积耕地农药负荷(kg·hm <sup>-2</sup> )	0.15	0.60	1.00	1.50	3.00
	社会因素	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	80	150	350	500	800
		人口自然增长率/% <sub>o</sub>	1.2	2.4	4.0	4.5	5.5
		城镇登记失业率/%	2.5	3.0	3.5	4.5	5.5

研究的集对之间的同一、差异、对立联系; $a$ 为 $A$ 和 $B$ 在问题 $E$ 下的同一度,即 $A$ 和 $B$ 的同一程度; $b$ 表示差异度,即 $A$ 和 $B$ 的差异不确定程度; $c$ 为对立度,即 $A$ 和 $B$ 的对立程度; $a, b, c \in [0, 1]$ ,且满足归一化条件 $a + b + c = 1$ <sup>[9]</sup>;  $i$ 为差异度系数,  $i \in [-1, 1]$ ,  $i$ 取1和-1时,表示都是确定性的,而 $i$ 越接近0,系统的不确定性越大;  $j$ 为对立度系数,规定其值恒取-1。

形如式(2)的 $\mu$ 称为三元联系数,在实际运算中,根据不同的研究对象可以将式(2)做不同层次的展开,得到多元联系数。例如,形如式(3)的 $\mu_5$ 称为五元联系数:

$$\mu_5 = r_1 + r_2 i_1 + r_3 i_2 + r_4 i_3 + r_5 j \quad (3)$$

式中: $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 \in [0, 1]$ ,且 $r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 = 1$ ;  $i_1 \in [0, 1]$ ;  $i_2 \in [0, 0]$ 为中性标记,不作 $i_2 = 0$ 解;  $i_3 \in [-1, 0]$ ;  $j = -1$ 。显然, $\mu \in [-1, 1]$ 。

2.2 指标权重的确定

本研究使用熵权法计算指标权重系数,从而得到指标权重的集合 $W_i(W_1, W_2, \cdots, W_n)$ 。

2.3 土地生态安全评价模型的建立

设评价对象空间 $A = \{\text{土地生态安全评价指标}\}$ ,属性空间 $B = \{\text{土地生态安全评价等级}\}$ 。 $m(1 \leq m \leq 3)$ 代表要素层,  $mq(1 \leq m \leq 3, 1 \leq q \leq q_m, q_1 = 5, q_2 = 7, q_3 = 3)$ 代表第 $m$ 个要素层下第 $q$ 个指标(即表1中的指标层)。设 $I_m$ 代表要素层评价指标,  $I_{mq}$ 代表指标层评价指标,  $I_{mq}$ 的测量值为 $t_{mq}$ 。设评价等级为 $n$ 级,则有评价集 $B = \{B_1, B_2, \cdots, B_n\} = \{B_j\} (j = 1, 2, \cdots, n)$ ,  $B_j(j = 1, 2, \cdots, n)$ 是评价集 $B$ 中的第 $j$ 个评价等级,其中 $B_1, B_2, \cdots, B_n$ 构成属性空间 $B$ 的一个有序分割类,且 $B_1 > B_2 > \cdots > B_n$ 。基于以上假设,可以建立指标层、要素层及目标层的土地生态安全评价的 $n$ 元联系数,进而确定土地生

态安全评价等级。具体步骤如下:

2.3.1 指标层评价指标 $n$ 元联系数的确定。指标层评价指标 $I_{mq}$ 的 $n$ 元联系数为:

$$\mu_{mq} = r_{mq1} + r_{mq2} i_1 + r_{mq3} i_2 + \cdots + r_{mq l} i_{l-1} + \cdots + r_{mq(n-1)} i_{n-2} + r_{mqn} j \quad (4)$$

式中: $\mu_{mq}$ 为指标层评价指标 $I_{mq}$ 的 $n$ 元联系数;  $r_{mq1} \in [0, 1] (1 \leq m \leq 3, 1 \leq q \leq q_m, 1 \leq l \leq n)$ 为指标层评价指标 $I_{mq}$ 相对于评价等级 $B_l$ 的联系度分量。 $\mu_{mq}$ 的计算公式见表2。

2.3.2 要素层评价指标 $n$ 元联系数的确定。要素层评价指标 $I_m$ 的 $n$ 元联系数为:

$$\mu_m = r_{m1} + r_{m2} i_1 + r_{m3} i_2 + \cdots + r_{ml} i_{l-1} + \cdots + r_{m(n-1)} i_{n-2} + r_{mn} j \quad (5)$$

式中: $\mu_m$ 为要素层评价指标 $I_m$ 的 $n$ 元联系数;  $r_{ml} = \sum_{q=1}^{q_m} W_{mq} r_{mq l} (1 \leq l \leq n)$ 为要素层评价指标 $I_m$ 相对于评价等级 $B_l$ 的联系度分量;  $W_{mq}$ 为指标 $I_{mq}$ 在第 $m$ 个子系统中的权重。显然有 $r_{ml} \in [0, 1]$ ,且 $\sum_{l=1}^n r_{ml} = 1$ 。

2.3.3 目标层评价指标 $n$ 元联系数的确定。目标层的 $n$ 元联系数为:

$$\mu_n = r_1 + r_2 i_1 + r_3 i_2 + \cdots + r_{l l} i_{l-1} + \cdots + r_{n-1} i_{n-2} + r_n j \quad (6)$$

式中: $\mu_n$ 为目标层的 $n$ 元联系数;  $r_l = \sum_{m=1}^5 W_m r_{ml} (1 \leq l \leq n)$ 为目标层相对于评价等级 $B_l$ 的联系度分量;  $W_m$ 为指标 $I_m$ 在总评价系统中的权重<sup>[10]</sup>。

2.3.4 评价指标 $n$ 元联系数主值的确定。根据公式(6),由于 $\mu \in [-1, 1]$ ,按照“均分原则”,将 $[-1, 1]$ 区

表 2 二级指标  $I_{mq}$  的  $n$  元联系数的计算方法  
Tab.2 The  $n$ -dimensional connection degree formula of  $I_{mq}$

$n$ 元联系数 $\mu_{mq}$	正安全趋向性指标	负安全趋向性指标
$1 + 0i_1 + \cdots + 0i_{n-2} + 0j$	$t_{mq} \geq a_{mq1}$	$t_{mq} \leq a_{mq1}$
$\frac{ t_{mq} - a_{mq2} }{ a_{mq1} - a_{mq2} } + \frac{ t_{mq} - a_{mq1} }{ a_{mq1} - a_{mq2} } i_1 + 0i_2 + \cdots + 0j$	$a_{mq1} \geq t_{mq} \geq a_{mq2}$	$a_{mq1} \leq t_{mq} \leq a_{mq2}$
$0 + \cdots + \frac{ t_{mq} - a_{mq(s+1)} }{ a_{mqs} - a_{mq(s+1)} } i_{s-1} + \frac{ t_{mq} - a_{mqs} }{ a_{mqs} - a_{mq(s+1)} } i_s + \cdots + 0j$	$a_{mqs} \geq t_{mq} \geq a_{mq(s+1)}$	$a_{mqs} \leq t_{mq} \leq a_{mq(s+1)}$
$0 + \cdots + 0i_{n-3} + \frac{ t_{mq} - a_{mqn} }{ a_{mq(n-1)} - a_{mqn} } i_{n-2} + \frac{ t_{mq} - a_{mq(n-1)} }{ a_{mq(n-1)} - a_{mqn} } j$	$a_{mq(n-1)} \geq t_{mq} \geq a_{mqn}$	$a_{mq(n-1)} \leq t_{mq} \leq a_{mqn}$
$0 + 0i_1 + \cdots + 0i_{n-2} + 1j$	$t_{mq} \leq a_{mqn}$	$t_{mq} \geq a_{mqn}$

说明:表中  $a_{mq1}, a_{mq2}, \cdots, a_{mqs}, \cdots, a_{mqn}$  分别表示指标层评价指标对应于各个评价等级的区间范围的临界值。对于正向指标,有  $a_{mq1} \geq a_{mq2} \geq \cdots \geq a_{mqs} \geq a_{mqn}$ ;对于负向指标,有  $a_{mq1} \leq a_{mq2} \leq \cdots \leq a_{mqs} \leq a_{mqn}$ 。

间  $n-1$  等分,当  $i_{n-2}, i_{n-1}, \cdots, i_2, i_1$  从左至右依次取  $n \sim 1$  个分点值及  $j = -1$  时得到的  $n$  元联系数的值,称为  $n$  元联系数  $\mu = r_1 + r_2 i_1 + r_3 i_1 + \cdots + r_{n-1} i_{n-2} + r_n j$  的主值,记作:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu} = & r_1 + r_2 \cdot \frac{n-3}{n-1} + r_3 \cdot \frac{n-5}{n-1} + \cdots \\ & + r_1 \cdot \frac{n-1-2l}{n-1} + \cdots + r_{n-1} \cdot \frac{3-n}{n-1} + r_n \cdot (-1)。 \end{aligned} \tag{7}$$

2.3.5 土地生态安全评价等级的确定。根据“均分原则”,将  $[-1, 1]$  区间  $n$  等分,则从右至左每个区间依次分别对应  $B_1, B_2, \cdots, B_n$  共  $n$  个等级,即:

$$\begin{aligned} B_1 \leftrightarrow & \left( \frac{n-2}{n}, 1 \right], B_2 \leftrightarrow \left( \frac{n-4}{n}, \frac{n-2}{n} \right], \cdots, \\ B_l \leftrightarrow & \left( \frac{n-2l}{n}, \frac{n-2(l-1)}{n} \right], \cdots, B_n \leftrightarrow \left( -1, \frac{2-n}{n} \right]。 \end{aligned}$$

得到的  $\tilde{\mu}$  和各个评价等级对应的区间范围进行对比<sup>[11]</sup>,若  $\tilde{\mu} \in \left( \frac{n-2l}{n}, \frac{n-2(l-1)}{n} \right]$ ,则土地生态安全状况属于

$B_l$  等级。 $\tilde{\mu}$  的值越大,说明评价等级越高,土地生态安全状况越好。

### 3 案例分析

改革开放以来,河北省人口迅速增加,农地非农业

化过程持续进行,全省耕地面积显著减少,人多地少的矛盾日益尖锐,土地生态质量不断下降。因此,评价土地生态安全对实现河北省经济、社会和农业的可持续发展具有重要的意义。本研究的数据来源于河北年鉴(2003—2010)、河北经济年鉴(2003—2010)和河北农村统计年鉴(2003—2010)。

评价集  $B = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)$ , 其中  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$  分别代表安全、较安全、临界安全、较不安全和不安全 5 个级别。按照熵权法,可计算得到指标权重集合为  $W_i = (0.063\ 6, 0.061\ 9, 0.063\ 5, 0.068\ 6, 0.066\ 0, 0.064\ 2, 0.063\ 6, 0.084\ 9, 0.064\ 4, 0.060\ 5, 0.069\ 0, 0.067\ 5, 0.062\ 8, 0.065\ 4, 0.074\ 0)$ 。根据上述计算土地生态安全的步骤,计算得到 2003—2010 年河北省指标层、要素层及目标层的联系数,其中,目标层的五元联系数见表 3。根据“均分原则”,五元联系数中  $i_1, i_2, i_3$  的取值应位于  $[-1, 1]$  的四等分点处,故令  $i_1 = 0.5, i_2 = 0, i_3 = -0.5, j = -1$ ,得到目标层的联系数主值(见表 3)。根据“均分原则”确定五元联系数主值的 5 个区间  $(0.6, 1], (0.2, 0.6], (-0.2, 0.2], (-0.6, -0.2], (-1, -0.6]$ ,分别对应安全、较安全、临界安全、较不安全、不安全 5 个等级的取值区间。由此可得到 2003—2010 年目标层的生态安全等级(表 3)。

表 3 2003—2010 年目标层的五元联系数、主值及安全等级  
Tab.3 The five-dimensional connection degrees, major values and security grades of the destination layers from 2003 to 2010

年份	目标层的五元联系数	联系数主值	生态安全等级
2003	$\mu = 0.339\ 5 + 0.190\ 9i_1 + 0.229\ 0i_2 + 0.119\ 4i_3 + 0.121\ 1j$	0.254 1	较安全
2004	$\mu = 0.164\ 4 + 0.184\ 1i_1 + 0.223\ 8i_2 + 0.284\ 1i_3 + 0.143\ 6j$	-0.029 2	临界安全
2005	$\mu = 0.117\ 8 + 0.210\ 7i_1 + 0.261\ 9i_2 + 0.274\ 4i_3 + 0.135\ 2j$	-0.049 3	临界安全
2006	$\mu = 0.109\ 6 + 0.287\ 0i_1 + 0.194\ 4i_2 + 0.286\ 3i_3 + 0.122\ 6j$	-0.012 6	临界安全
2007	$\mu = 0.114\ 6 + 0.220\ 2i_1 + 0.215\ 0i_2 + 0.305\ 1i_3 + 0.145\ 1j$	-0.072 9	临界安全
2008	$\mu = 0.134\ 4 + 0.202\ 7i_1 + 0.272\ 8i_2 + 0.245\ 3i_3 + 0.144\ 7j$	-0.031 6	临界安全
2009	$\mu = 0.155\ 8 + 0.178\ 7i_1 + 0.313\ 9i_2 + 0.210\ 3i_3 + 0.141\ 2j$	-0.001 2	较安全
2010	$\mu = 0.174\ 0 + 0.147\ 1i_1 + 0.333\ 4i_2 + 0.203\ 9i_3 + 0.141\ 6j$	0.004 1	较安全

根据表 3,2003—2010 年河北省土地生态安全排序结果为:2010 > 2003 > 2009 > 2006 > 2004 > 2008 > 2005 > 2007 年。其中,2003 和 2010 年属于较安全级,表明土地生态安全状况较安全,土地生态系统服务功能较为完善,生态环境较少受到破坏,生态系统结构较完整;其他 6 个年份属于临界安全级,表明土地生态安全状况处于临界水平,土地生态系统服务功能已有退化,土地生态环境受到一定破坏。总体上看,2005—2008 年期间土地生态安全状况出现了一定的反复,2009 年之后出现了好转,但是河北省的土地生态安全状况总体上不容乐观,有待于进一步改善。

从 3 个要素看,经济要素的安全状况最好,8 年间都属于较安全级和临界安全级,而且从 2004 年开始呈现逐渐改善的趋势。自然要素的变化趋势比较平稳,8 年间都属于临界安全级。社会要素的安全状况最差,并呈现出逐年恶化的趋势,应引起足够的重视。

从具体指标看,造成河北省土地生态安全状况整体不高的原因是:人口增长过快,人均耕地面积逐年下降,人口密度、人口自然增长率却在逐年增加,增加了土地压力。同时,单位面积耕地化肥负荷和单位面积耕地农药负荷远远超过国际公认值并有逐年增加的趋势,从而使土地的污染加重,威胁到土地的生态安全。

4 结论

本研究采用集对分析法对 2003—2010 年间河北省的土地生态安全状况进行了评价。结果表明:土地生态安全状况总体上不容乐观,应该引起足够的重视,对评价结果的分析总结与研究区的实际情况比较符合。集对分析法思路清晰,算法简明,可操作性好,能较好地对土地生态安全进行综合评价,从而为土地环境规划与污

染防治决策提供较为科学的参考依据。

参考文献:

[1] 肖笃宁,陈文波,郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报,2002,13(3):354-358.

[2] 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.

[3] 刘蕾,姜灵彦,高军侠. 基于 P-S-R 模型的土地生态安全物元评价——以河南省为例[J]. 地域研究与开发,2011,30(4):117-121.

[4] 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.

[5] 张虹波,刘黎明,张军连,等. 黄土丘陵区土地资源生态安全及其动态评价[J]. 资源科学,2007,29(4):193-200.

[6] 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),2007,43(6):784-789.

[7] 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.

[8] 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):127-131,140.

[9] 赵克勤. 集对分析的不确定性系统理论在 AI 中的应用[J]. 智能系统学报,2006,1(2):6-9.

[10] 胡晓雪,杨晓华,酆建强,等. 河流健康系统评价的集对分析模型[J]. 系统工程理论与实践,2008,24(5):164-170.

[11] 李凡修,梅平,陈武. 区域生态环境质量的集对评价模型及其应用[J]. 环境工程,2006,24(3):77-79.

Land Ecological Security Evaluation Based on Entropy Weight and Set Pair Analysis: A Case of Hebei Province

Zhuo Fengli

(International Trade Department, Shengda Trade Economics & Management College of Zhengzhou, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** Study on land ecological security has become a forefront topic of regional sustainable development. Study on land ecological security is of great theoretical and practical significance to realize the reasonable utilization of land resource. This paper constructed an evaluation index system of land ecological security. Considering the illegibility and uncertainty in land ecological security evaluation, the paper combined set pair analysis and entropy method to establish an evaluation model of land ecological security. Then it developed a case study on Hebei Province. The results show that land ecological security conditions of Hebei Province are unsatisfactory on the whole and need to be improved.

**Key words:** land ecology; security evaluation; entropy weight; set pair analysis; Hebei Province