

# 基于熵权可拓物元模型的耕地生态安全评价

张锐, 郑华伟, 刘友兆

(南京农业大学 公共管理学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 耕地生态安全评价是改善耕地生态系统状况, 促进耕地可持续利用的重要基础。在界定耕地生态安全内涵的基础上, 构建了基于“压力—状态—响应”(PSR)概念模型的评价指标体系, 建立了熵权可拓物元模型, 并以四川省为例进行了实证分析。结果表明: (1) 2000—2008 年四川省耕地生态安全水平呈逐步改善态势, 但 2008 年“较安全”等级关联度很弱; (2) 单位耕地农药负荷、单位耕地化肥负荷、人均耕地面积、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。因此, 为了促进耕地生态安全等级不断提升, 需要进一步转变经济发展方式, 降低经济增长对土地资源的过度消耗; 大力发展绿色农业, 合理施用农药、化肥; 加大环境治理力度, 有效控制水土流失。

**关键词:** 耕地生态安全; 熵权可拓物元模型; 四川省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0149-06

中图分类号: F301.24

## Evaluation on Cultivated Land Ecological Security Based on Entropy-weighted Extension Matter-element Model

ZHANG Rui, ZHENG Hua-wei, LIU You-zhao

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

**Abstract:** Evaluation on cultivated land ecological security is of greatly importance in improving cultivated land ecosystem and sustainable cultivated land use. On the basis of defining the meaning for cultivated land ecological security, the evaluation index system was established based on the pressure—state—response (PSR) model. And then an empirical analysis was conducted in Sichuan Province by entropy-weighted extension matter-element model. The results showed that: (1) The level of cultivated land ecological security had been gradually improved in Sichuan Province during the period from 2000 to 2008, but the coefficient of the correlation for the assessed rank of safer class was very weak in 2008; (2) The factors such as, the pesticide load per unit of cultivated land, fertilizer load per unit of cultivated land, per capita cultivated land, land reclamation rate and extent of soil erosion were indentified as the key constraints for further improvement. Therefore, to improve the ecological security in cultivated land, economic development mode needs to be further transformed, excessive consumption of land resources need to be reduced, green agriculture need to be developed, pesticides and fertilizers need to be applied in a rational way, and environment and soil erosion need to be conserved effectively.

**Keywords:** cultivated land ecological security; entropy-weighted extension matter-element model; Sichuan Province

耕地资源作为最宝贵的土地资源,是非常重要的农业生产资料,具有生产、景观文化、生态服务等多种功能,经过人类长期的干预,耕地生态系统逐渐演变

成为具有高度耦合性的社会—经济—生态复合系统<sup>[1-2]</sup>。随着人类对耕地资源利用的深度和广度增加,耕地数量不断减少,耕地肥力降低和退化加剧,农

收稿日期:2012-07-01

修回日期:2012-09-18

资助项目:国家社会科学基金项目“西部少数民族牧区建设社会主义新农村面临的问题及对策研究”(07XJY021);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);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目“土地综合整治项目绩效研究”(CXZZ11\_0690)

作者简介:张锐(1985—),女(汉族),江苏省盐城市人,博士研究生,研究方向为土地利用与生态经济。E-mail:zhangrui\_1985@163.com。

通信作者:刘友兆(1959—),男(汉族),江苏省淮安市人,教授,博士生导师,研究方向为土地可持续利用与土地资源评价。E-mail:yzliu@njau.edu.cn。

田环境污染日趋严重,耕地利用生态问题逐渐凸显<sup>[3-4]</sup>。因此,开展耕地利用生态安全研究,优化耕地生态安全的改善路径,对于缓解人地矛盾,保障我国粮食安全,维护国家安全,促进社会经济可持续发展具有非常重要的理论意义和现实意义<sup>[5]</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;在这种状态下耕地生态系统有稳定、均衡、充裕的自然资源可供利用,生态环境处于健康状态<sup>[6-8]</sup>。国外专家<sup>[9-10]</sup>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 从农业生态环境、社会经济方面构建了评价指标体系,分析了南亚国家孟加拉的耕地可持续利用与生态状况;Beesley 指出在农用地保护中,耕地生态价值与安全越来越受到农场主的认可与关注。国内学者主要开展耕地生态安全内涵、耕地生态安全评价、耕地生态安全影响因素、耕地生态安全调控对策研究,王千等<sup>[4]</sup>结合生态学中的能值理论构建了耕地生态安全评价指标体系,运用综合评价法估算了河北省 138 个县耕地生态安全状况,重点探讨其空间聚集格局差异特征,分析聚集格局产生的主要影响因素。张传华<sup>[11]</sup>运用层次分析法、综合评价法测算了重庆市丰都县耕地生态安全水平。徐辉等<sup>[12]</sup>从自然因素、经济因素和社会因素三个方面构建了耕地生态安全评价指标体系,运用组合赋权法确定其指标权重,采用多因素综合评价法,对宁安市耕地生态安全进行定量评价。朱红波、张安录<sup>[6]</sup>从直接影响因素、间接影响因素、社会经济影响因素三个方面构建耕地生态安全评价指标体系,选用层次分析法确定各指标的权重,采用综合评价法测算了耕地生态安全水平。总体来看,耕地生态安全评价尚属起步阶段,定性分析相对较多、定量研究较少;评价方法较为单一,多采用综合评价法,较少揭示单个指标的评价信息;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评价的作用。熵权可拓物元模型通过计算单个指标与各标准等级的关联系数得到综合评价结果,能够揭示更加丰富的评价信息,有效诊断耕地生态安全状况,但尚未被应用到耕地生态安全评价中;PSR 模型综合考虑社会、经济、资源与环境,突出了人地关系。鉴于此,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,并引入熵权可拓物元模型对四川省耕地生态安全进行实证研究,诊断耕地生态安全的制约因子,以期改善耕地生态系统状况、协调人地关系、促进耕地资源可持续利用提供一定的参考依据。

## 1 耕地生态安全评价指标体系构建

耕地生态安全主要包括两个方面的含义,一是耕地生态系统在人类利用耕地资源过程中,自身结构合理,功能得到正常发挥;二是人类可以持续获得耕地资源来满足健康生存的需要<sup>[7,13]</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,目的是诊断由人类活动、自然因素引起的耕地生态系统破坏程度,剖析耕地生态安全的制约因素,以便发出预警,为管理者提供决策。“压力—状态—响应”(PSR)概念模型是由联合国 OECD 和 UNEP 提出的<sup>[14-15]</sup>,该模型以因果关系为基础,即人类活动对环境施加一定的压力;环境改变了其原有的性质或自然资源的数量(状态);人类社会采取一定的措施对这些变化做出反应,以恢复环境质量或防止环境退化<sup>[16-18]</sup>;它突出了环境受到的压力和环境退化之间的因果关系,压力、状态、响应三个环节相互制约、相互影响,正是决策和制定对策措施的全过程<sup>[16]</sup>。因此,本研究借鉴 PSR 概念模型开展耕地生态安全评价;从 PSR 概念模型出发,遵循指标选取的系统性、科学性、可比性和可获取性等原则,在参考相关文献的基础上<sup>[4,6,9,12]</sup>,构建了 3 个层次的耕地生态安全评价指标体系(表 1)。

## 2 耕地生态安全评价的熵权可拓物元模型

物元分析方法是学者蔡文<sup>[19]</sup>于 20 世纪 80 年代提出的用于解决矛盾问题的技术方法,可应用于生态环境、水资源承载力、农用地分级和土地生态水平等综合评价研究中。根据物元分析方法构建耕地生态安全评价的熵权可拓物元模型<sup>[19-21]</sup>,主要可分为 7 个步骤。

### 2.1 确定耕地生态安全物元

耕地生态安全  $N$ ,耕地生态安全特征  $c$  和特征量值  $v$  共同构成耕地生态安全物元。假设耕地生态安全  $N$  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: $R$ —— $n$  维耕地生态安全物元,简记为  $R = (N, c, v)$ 。

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	指标权重
耕地生态安全	压力	$x_1$ 人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	总人口除以土地总面积	0.056 2
		$x_2$ 人口自然增长率/%		0.051 7
		$x_3$ 城市化水平/%	非农业人口除以总人口	0.063 8
		$x_4$ 单位耕地化肥负荷/(kg·hm <sup>-2</sup> )	化肥施用量除以耕地面积	0.060 0
		$x_5$ 人均耕地面积/(hm <sup>2</sup> /人)	耕地面积除以总人口	0.056 3
		$x_6$ 单位耕地农药负荷/(kg·hm <sup>-2</sup> )	农药施用量除以耕地面积	0.051 5
	状态	$x_7$ 人均水资源量/(m <sup>3</sup> /人)		0.070 1
		$x_8$ 土地垦殖率/%	耕地面积除以土地总面积	0.053 2
		$x_9$ 耕地粮食单产/(kg·hm <sup>-2</sup> )	粮食总产除以耕地面积	0.059 7
		$x_{10}$ 灾害指数/%	成灾面积除以农作物播种面积	0.050 7
		$x_{11}$ 水土流失程度/%	水土流失面积除以土地总面积	0.061 9
		$x_{12}$ 森林覆盖率/%		0.052 8
	响应	$x_{13}$ 农民人均纯收入/(元/人)		0.054 2
		$x_{14}$ 有效灌溉面积比/%	有效灌溉面积除以耕地面积	0.070 7
		$x_{15}$ 单位耕地农业机械动力/(kW·hm <sup>-2</sup> )	农业机械动力除以耕地面积	0.058 1
		$x_{16}$ 教育投资强度/%	教育投资量除以财政支出总量	0.065 3
		$x_{17}$ 水土流失治理率/%	水土流失治理面积除以水土流失面积	0.063 8

2.2 确定耕地生态安全的经典域

耕地生态安全的经典域物元矩阵可表示为:

$$R_{oj} = (N_{oj}, c_i, v_{oji}) = \begin{bmatrix} N_{oj} & c_1 & v_{oj1} \\ & c_2 & v_{oj2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{ojn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{oj} & c_1 & \langle a_{oj1}, b_{oj1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{oj2}, b_{oj2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{ojn}, b_{ojn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

2.3 确定耕地生态安全的节域

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

2.4 确定待评物元

把待评对象  $N_x$  的物元表示为  $R_x$ :

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

2.5 确定关联函数及关联度

令有界区间  $X_o = [a, b]$  的模式定义为:

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

某一点  $x$  到区间  $X_o = [a, b]$  的距离为:

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

则耕地生态安全指标关联函数  $K(x)$  的定义为:

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

式中: $\rho(x, X_o)$ ——点  $x$  与有限区间  $X_o = [a, b]$  的距离; $\rho(x, X_p)$ ——点  $x$  与有限区间  $X_p = [a_p, b_p]$  的距离; $x, X_o, X_p$ ——待评耕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。

2.6 指标权重确定

耕地生态安全评价是一个多指标定量综合评价的过程,指标权重确定具有举足轻重的地位,将直接关系到耕地生态安全评价结果的准确性<sup>[22]</sup>。为了避免人为因素的影响,使耕地生态安全评价指标权重确定更加具有科学性,采用客观赋权法中的熵值法来确定指标权重;熵值法根据评价指标变异程度的大小来确定指标权重,指标变异程度越大,信息熵越少,该指标权重值就越大,反之越小<sup>[22-23]</sup>。在熵值法的计算过程中,运用了对数和熵的概念,根据相应的约束规则,负值和极值不能直接参与运算,应对其进行一定的变换,即应该对熵值法进行一些必要的改进;改进的办法主要有两种:功效系数法和标准化变换法,本研究

采用标准化变换法对熵值法进行改进<sup>[22]</sup>。改进的熵值法确定指标权重主要步骤包括评价指标标准化处理、坐标平移、评价指标熵值计算、评价指标差异性系数测算、指标权重确定<sup>[23]</sup>。

### 2.7 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:

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

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 ( $j=1, 2, \dots, n$ );  $w_i$ ——各评价指标的权重。

若  $K_{j_i} = \max[K_j(x_i)]$ , ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 则待评对象第  $i$  指标属于耕地生态安全等级  $j$ ; 若  $K_{j_x} = \max[K_j(N_x)]$ , ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 则待评对象  $N_x$  属于耕地生态安全等级  $j$ 。

## 3 实证分析

### 3.1 研究区概况与数据来源

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  $4.85 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 为我国第 5 大省区, 现辖 18 个地级市和 3 个自治州。四川省自然资源丰富, 光热条件好, 是我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。然而随着经济社会的发展, 建设用地规模持续扩张, 耕地资源数量锐减, 耕地生态功能减弱, 水土流失较为严重, 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《四川统计年鉴》,《四川农村统计年鉴》,《中国统计年鉴》,《中国农村统计年鉴》,《中国农业年鉴》和四川省土地利用变更调查数据等。

### 3.2 耕地生态安全评价经典域、节域的确定

经典域(评价等级的取值区间)的确定是熵权可拓物元模型的基础。依据耕地生态安全的可拓性, 将其划分为 5 个等级, 即  $N_{01} \rightarrow N_{05}$ , 定性描述为: 安全  $\rightarrow$  较安全  $\rightarrow$  临界安全  $\rightarrow$  较不安全  $\rightarrow$  不安全。评价经典域的确定主要参考国家、地方、行业及国际相关标准, 研究区域本底背景值, 全国平均水平等, 具体取值区间详见表 2。

表 2 耕地生态安全评价指标经典域、节域的取值范围

评价指标	经典域取值区间					节域取值区间
	$N_{01}$	$N_{02}$	$N_{03}$	$N_{04}$	$N_{05}$	
$x_1$	[80,150)	[150,350)	[350,500)	[500,800)	[800,1500)	[80,1500)
$x_2$	[0,3)	[3,8)	[8,15)	[15,25)	[25,50)	[0,50)
$x_3$	[70,100)	[40,70)	[20,40)	[10,20)	[0,10)	[0,100)
$x_4$	[1,225)	[225,400)	[400,600)	[600,800)	[800,1 000)	[1,1 000)
$x_5$	[0.10,0.20)	[0.085,0.10)	[0.075,0.085)	[0.053,0.075)	[0,0.053)	[0,0.20)
$x_6$	[0,3)	[3,8)	[8,15)	[15,24)	[24,35)	[0,35)
$x_7$	[3 000,4 500)	[2 400,3 000)	[1 800,2 400)	[1 200,1 800)	[300,1 200)	[300,4 500)
$x_8$	[30,50)	[20,30)	[15,20)	[10,15)	[0,10)	[0,50)
$x_9$	[8 600,10 000)	[6 400,8 600)	[4 200,6 400)	[2000,4200)	[0,2000)	[0,10 000)
$x_{10}$	[0,1)	[1,3)	[3,10)	[10,25)	[25,40)	[0,40)
$x_{11}$	[0,15)	[15,30)	[30,45)	[45,60)	[60,100)	[0,100)
$x_{12}$	[40,60)	[30,40)	[20,30)	[10,20)	[0,10)	[0,60)
$x_{13}$	[6 000,10 000)	[3 500,6 000)	[2 500,3 500)	[1 500,2 500)	[0,1 500)	[0,10 000)
$x_{14}$	[80,100)	[60,80)	[50,60)	[40,50)	[30,40)	[30,100)
$x_{15}$	[9,15)	[6,9)	[4,6)	[2,4)	[0,2)	[0,15)
$x_{16}$	[35,50)	[20,35)	[10,20)	[5,10)	[0,5)	[0,50)
$x_{17}$	[60,100)	[30,60)	[20,30)	[10,20)	[0,10)	[0,100)

注:  $x_1, \dots, x_{17}$  表示意义详见表 1;  $N_{01} \rightarrow N_{05}$  定性描述为: 安全  $\rightarrow$  较安全  $\rightarrow$  临界安全  $\rightarrow$  较不安全  $\rightarrow$  不安全。

### 3.3 结果分析

收集四川省有关耕地生态安全评价指标数据, 经分析整理后, 按照改进的熵值法确定各评价指标的权重(表 1)。将耕地生态安全评价指标数据组成的待评

物元带入评价模型, 得到评价指标关联度与综合关联度的测算结果(表 3—4)。表 3 中  $K_j(x_i)$  ( $i=1, 2, \dots, 17$ ) 即第  $i$  个指标对应各评价等级的关联度, 以人口密度( $x_1$ )为例, 其对应 5 个评价等级的关联系数分别

为: $K_1(x_1) = -0.2465, K_2(x_1) = 0.1701, K_3(x_1) = -0.6147, K_4(x_1) = -0.7523, K_5(x_1) = -0.8555$  因此可以判定该指标属于级别  $N_{02}$ , 即“较安全”。同理, 可以得到其他指标评价结果。

表 3 四川省 2008 年耕地生态安全评价指标关联度

评价指标	$N_{01}$	$N_{02}$	$N_{03}$	$N_{04}$	$N_{05}$	等级
$K_j(x_1)$	-0.2465	0.1701	-0.6147	-0.7523	-0.8555	较安全
$K_j(x_2)$	0.2333	-0.2333	-0.7125	-0.8467	-0.9080	安全
$K_j(x_3)$	-0.6466	-0.3816	0.2368	-0.1607	-0.3733	临界安全
$K_j(x_4)$	-0.5009	-0.3553	-0.0330	0.0660	-0.3257	较不安全
$K_j(x_5)$	-0.3320	-0.2142	-0.1094	0.3729	-0.1712	较不安全
$K_j(x_6)$	-0.4458	-0.3238	-0.0222	0.0387	-0.3605	较不安全
$K_j(x_7)$	-0.1713	0.3483	-0.0995	-0.2996	-0.4270	较安全
$K_j(x_8)$	-0.5903	-0.3854	-0.1805	0.4584	-0.1572	较不安全
$K_j(x_9)$	0.1799	-0.1799	-0.6811	-0.8020	-0.8565	安全
$K_j(x_{10})$	0.3188	-0.3188	-0.7729	-0.9319	-0.9728	安全
$K_j(x_{11})$	-0.4195	-0.2951	-0.1028	0.3770	-0.1592	较不安全
$K_j(x_{12})$	-0.2397	0.0790	-0.0263	-0.2698	-0.4158	较安全
$K_j(x_{13})$	-0.3131	0.2485	-0.1310	-0.2823	-0.3888	较安全
$K_j(x_{14})$	-0.3337	0.1658	-0.0905	-0.2856	-0.4117	较安全
$K_j(x_{15})$	-0.2458	0.2625	-0.1040	-0.2911	-0.4136	较安全
$K_j(x_{16})$	-0.6422	-0.3739	0.2523	-0.1677	-0.3753	临界安全
$K_j(x_{17})$	-0.6005	-0.2009	0.3973	-0.1422	-0.3682	临界安全

注: $K_j(x_i)$ 表示第  $i$  个指标对应各评价等级的关联度。

表 4 耕地生态安全评价结果

综合关联度	$N_{01}$	$N_{02}$	$N_{03}$	$N_{04}$	$N_{05}$	级别
$K_j(N_{2000})$	-0.4129	-0.1873	-0.0823	-0.1556	-0.4071	临界安全
$K_j(N_{2004})$	-0.3713	-0.1315	-0.0545	-0.2245	-0.4592	临界安全
$K_j(N_{2008})$	-0.3050	-0.1108	-0.1475	-0.2244	-0.4594	较安全

$K_j(N_x)$ 是指多指标加权求和的综合等级关联系数,  $K_1(N_{2008}) = -0.3050, K_2(N_{2008}) = -0.1108, K_3(N_{2008}) = -0.1475, K_4(N_{2008}) = -0.2244, K_5(N_{2008}) = -0.4594$ , 说明耕地生态安全等级为“较安全”。同理可知, 2000 和 2004 年等级分别为“临界安全”、“临界安全”。虽然 2000 和 2004 年耕地生态安全等级均为“临界安全”, 但  $K_3(N_{2004})$  大于  $K_3(N_{2000})$ , 说明四川省 2000—2004 年耕地生态安全等级得到一定程度的提升。从区域整体耕地生态安全的变化来看, 2000—2008 年耕地生态系统安全状况有所改善, 耕地生态安全水平有变好的趋势。研究发现, 2000 年以来四川省经济持续发展, 农民收入水平不断提高; 单位耕地面积农业机械动力有效增加, 积极开展农民科技培训, 着力提高耕地粮食单产; 加大生态环境保护建设的力度, 有效加强水土流失治理, 使得相关指标发生了不同程度等级提升, 促进了耕地生态安全水平提高。虽然 2008 年耕地生态安全等级为“较安全”, 但  $K_2(N_{2008}) = -0.1108$ , 说明等级关

联度很弱, 接近“较安全”等级, 究其原因主要是某些指标还没有达到“较安全”等级所致。从单个指标评价结果来看, 2008 年四川省有 8 个指标未达到“较安全”等级, 而单位耕地农药负荷、单位耕地化肥负荷、人均耕地面积、土地垦殖率、水土流失程度等仅达到“较不安全”等级。虽然四川省一直致力于水土流失的综合治理, 但由于易水土流失区域较大, 且存在反复的现象, 目前水土流失程度仍较大, 还需加大治理力度, 有效保护土地资源。随着经济社会的发展, 四川省国内生产总值不断增长, 但这种高速增长是以资源高消耗为代价的, 建设用地规模不断扩大, 耕地面积持续减少, 土地集约利用水平较低。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。

#### 4 结论

(1) 2000—2008 年四川省耕地生态安全水平不断提高, 耕地生态系统安全状况有所改善, 安全等级

经历了“临界安全—较安全”的演变历程,但 2008 年“较安全”等级关联度很弱,单位耕地农药负荷、单位耕地化肥负荷、人均耕地面积、土地垦殖率和水土流失程度是制约四川省耕地生态安全等级提升的关键因素。

(2) 为了促进耕地生态安全等级不断提升,应进一步转变经济发展方式,推动经济结构战略性调整,优化产业升级布局,有效增加土地利用集约度,降低经济增长对土地资源的过度消耗;大力发展绿色农业,加快推进农业科技创新,合理施用农药、化肥,减少对耕地资源的污染;持续增加环境保护投入,加大环境治理力度,有效控制水土流失。

(3) PSR 模型从社会经济与资源环境有机统一观点出发,将资源环境、人类活动、社会经济等联系起来并考虑它们之间的相互作用,改变现有研究主要关注资源环境的状况,能更准确地反映耕地生态系统的各要素之间的关系;熵权可拓物元模型不仅能够获取耕地生态安全水平的综合评价结果,而且能够获得单个指标的评价结果,揭示各指标的水平状态,诊断耕地生态系统安全问题的具体原因;基于 PSR 模型的评价指标体系和熵权可拓物元模型适用于耕地生态安全评价,有利于提高耕地生态安全水平。

(4) 构建基于 PSR 模型的耕地生态安全评价指标体系,并将熵权可拓物元模型运用到耕地生态安全评价中,在耕地生态系统健康评价领域属有益尝试,但此类研究尚不多,评价指标选择、评价等级标准确定等问题还有待于进一步检验和深入研究。

#### [ 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] 姜广辉,张凤荣,孔祥斌,等. 耕地多功能的层次性及其多功能保护[J]. 中国土地科学,2011,25(8):42-47.
- [3] 倪绍祥,谭少华. 江苏省耕地安全问题探讨[J]. 自然资源学报,2002,17(3):307-312.
- [4] 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.
- [5] 何蓓蓓. 区域耕地资源安全研究[D]. 江苏 南京:南京农业大学,2009.
- [6] 朱红波,张安录. 我国耕地资源生态安全的时空差异分析[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(6):754-758.
- [7] 谢戈力. 广州市耕地资源生态安全研究[J]. 广东农业科学,2011(22):152-154.
- [8] 冯艳芬. 广东省近 20 年耕地生态安全探析[J]. 环境保护,2006(17):53-55.
- [9] Rasul G, Thapa G. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh[J]. World Development, 2003,31(6):1721-1741.
- [10] Beesley K B, Ramsey D. Agricultural Land Preservation [J]. International Encyclopedia of Human Geography, 2009,25(6):65-69.
- [11] 张传华. 耕地生态安全评价研究[J]. 重庆:西南大学,2006.
- [12] 徐辉,雷国平,崔登攀,等. 耕地生态安全评价研究:以黑龙江省宁安市为例[J]. 水土保持研究,2011,18(6):180-184.
- [13] 蔡为民,唐华俊,陈佑启,等. 土地利用系统健康评价的框架与指标选择[J]. 中国人口·资源与环境,2004,14(1):31-35.
- [14] FAO Proceedings. Land Quality Indicators and Their Use in Sustainable Agriculture and Rural Development [R]. Proceedings of the Workshop Organized by the Land and Water Development Division FAO Agriculture Department, 1997.
- [15] Rainer W. Development of environmental indicator systems: Experiences from Germany [J]. Environmental Management, 2000,25(6):613-623.
- [16] 颜利,王金坑,黄浩. 基于 PSR 框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J]. 资源科学,2008,30(1):107-113.
- [17] 麦少芝,徐颂军,潘颖君. PSR 模型在湿地生态系统健康评价中的应用[J]. 热带地理,2005,25(4):317-321.
- [18] 仇蕾. 基于免疫机理的流域生态系统健康诊断预警研究[D]. 江苏 南京:河海大学,2006.
- [19] 罗文斌,吴次芳,吴一洲. 基于物元模型的土地整理项目绩效评价方法与案例研究[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(11):1321-1326.
- [20] 郑华伟,张锐,刘友兆. 基于物元分析的土地利用系统健康诊断[J]. 中国土地科学,2012,26(11):33-39.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 郑华伟,刘友兆,王希睿. 中国城镇化与土地集约利用关系的动态计量分析[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(9):1029-1034.