

基于物元模型的四川省土地生态安全评价

吴 涛^{1,2},任 平^{1,2*}

(1. 四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室,四川 成都 610066;

2. 四川师范大学 地理与资源科学学院,四川 成都 610066)

摘要: 为进一步明确四川省土地生态安全状况,基于自然—经济—社会模式构建四川省土地生态安全评价指标体系,并运用物元模型对四川省 2004、2006、2008、2010 年的土地生态安全关联度进行计算。结果表明,2004—2010 年四川省土地生态安全状况整体好转。2004 年和 2006 年均处于临界安全状态,但受干旱灾害影响,2006 年土地生态安全水平较 2004 年有所下降;2008 年和 2010 年处于较安全状态。综合分析发现,强化抵御自然灾害风险能力、加强环境污染治理与生态环境保护是提高四川省土地生态安全水平的关键。

关键词: 土地生态安全; 物元模型; 安全等级; 四川省

中图分类号: X826 F124.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2014)06-0053-07

Evaluation of Land Eco-security of Sichuan Province Based on Matter-element Model

WU Tao^{1,2},REN Ping^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education/
Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China;

2. The Faculty of Geography Resources Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

Abstract: In order to further define the status of land eco-security in Sichuan province, the land eco-security evaluation index system was constructed based on the model of nature-economy-society, and the land eco-security correlation was studied by employing the matter-element model in the years of 2004, 2006, 2008, 2010. The results showed that the land eco-security level of Sichuan province was improved from 2004 to 2010. The land was in critical safe state in 2004 and 2006, but compared with 2004, the land eco-security level in 2006 decreased because of drought disaster; The land was in relatively safe state in 2008 and 2010. Comprehensive analysis showed that, enhancing the ability to resist natural disasters, strengthening the pollution abatement and ecological environment protection were the keys to improve land eco-security level of Sichuan province.

Key words: land eco-security; matter-element model; safety grade; Sichuan province

随着近年来人地矛盾突出、水土流失严重、森林减少等一系列生态环境问题的出现,生态安全问题作为人类社会可持续发展的关键环节被提上议程。一般认为,生态安全是指一个国家或地区生态环境

资源状况不受或少受来自于资源和生态环境的制约与威胁的状态^[1-2],其实质强调的是生态系统本身的安全以及生态系统对人类生存的满足程度。而在整个生态系统安全体系中,土地生态安全是关键。

收稿日期:2013-11-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41301196)

作者简介:吴 涛(1989-),男,四川达州人,在读硕士研究生,研究方向:土地资源管理、土地经济评价。

E-mail: wted123@126.com

* 通讯作者:任 平(1978-),男,湖北钟祥人,副教授,博士,主要从事国土资源管理、资源环境评价方面的研究。

E-mail: pren121680@126.com

土地生态安全是一个发展中的新概念,也是土地科学发展过程中可持续发展问题的新主题,是指陆地表层由各种有机物和无机物构成的土地生态系统结构不受破坏,同时土地生态系统为人类提供服务的质量和数量能够持续满足人类生存和发展的需要^[3-4]。因此,土地生态安全是涉及自然、经济、社会的综合性概念。就土地生态安全评价而言,国内学者基于不同视角做了大量研究^[4-9],取得了较为丰富的研究成果。但对在生态环境方面具有重要地位的四川省进行土地生态安全的研究甚少。四川省作为我国西部地区重要的生态功能区域,生态环境比较脆弱,也是自然灾害多发的地区。近年来,四川省社会经济迅速发展,人口、资源与环境等问题日益突出。为此,对四川省土地生态安全进行研究,为把握四川省土地生态安全状况,协调四川省社会经济发展过程中人口、资源与环境之间的矛盾提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

四川省地处我国西南腹地和长江上游,是西南地区重要的生态屏障,位于陕、鄂、渝、黔、云、藏等省(市、区)结合部,是我国西部的资源、经济、人口大省。全省面积 48.5 万 km²,下辖 21 个市(州)、181 个县(市、区)。全境地跨青藏高原、横断山脉、云贵高原、四川盆地以及大巴山地等地貌单元,地势整体呈现为西高东低、由西北向东南倾斜,中间盆地以成都平原为主体,四周以山地为主,地形条件极为复杂。四川省位于亚热带范围内,由于受复杂地形影响,全境气候类型多样,东部盆地属于亚热带湿润性季风气候,

西部高原地区以山地垂直气候带为主;东部盆地年平均气温 14~19℃、年降水量 900~1 200 mm,川西高原年平均气温<8℃、年降水量 600~700 mm;川西南山地年平均气温 10~17.5℃、年降水量 800~1 200 mm。全境河流 1 400 多条,水资源丰富。2010 年四川省常住人口 8 041.8 万人,其中城镇人口 3 231.2 万人、农村人口 4 810.6 万人,城镇化率为 40.18%,人均生产总值 21 182 元。

1.2 数据来源

本研究所用数据来源于《四川省统计年鉴》(2005—2011 年)、《国家统计年鉴》(2005—2011 年)、《中国环境统计年鉴》(2005—2011 年)以及四川省国民经济社会发展统计公报(2004—2010 年)。

1.3 研究方法

文章采用物元模型^[2,10-11]对四川省土地生态安全进行评价。物元分析理论于 20 世纪 80 年代由蔡文教授提出,主要用于解决多因子评价过程中不相容的问题。物元模型分析的基本步骤:设定土地生态安全评价物元;根据土地生态安全评价对象确定经典物元矩阵与节域矩阵;确定待评估物元矩阵;确定关联函数并计算关联度;根据各指标关联度计算综合关联度,确定评价等级。

1.3.1 四川省土地生态安全评价指标体系构建 根据指标数据的可操作性与全面性,充分考虑四川省土地生态安全与经济、社会、自然因子的关系,并参阅国内相关研究成果^[4-5,12],建立基于自然—经济—社会模式的四川省土地生态安全评价指标体系,如表 1 所示。为客观反映指标的相对重要程度,采用熵权法确定各个指标的权重,基本原理及具体计算过程参照文献^[14],指标权重如表 1 所示。

表 1 四川省土地生态安全评价指标体系及权重

系统层	指标层	指标代码	指标来源说明	权重
经济生态系统	人均 GDP/元	C ₁	统计指标	0.049 3
	农民人均纯收入/元	C ₂	统计指标	0.052 2
	第三产业产值占地区生产总值比重/%	C ₃	统计指标	0.044 5
	粮食单产/(kg/hm ²)	C ₄	统计指标	0.032 3
	化肥施用量/(kg/hm ²)	C ₅	公式推导	0.064 3
	农业机械化水平/(kW/hm ²)	C ₆	公式推导	0.048 6
社会生态系统	城镇化率/%	C ₇	统计指标	0.040 2
	人口自然增长率/%	C ₈	统计指标	0.052 1
	人口密度/(人/km ²)	C ₉	统计指标	0.031 9
	耕地压力指数	C ₁₀	公式推导	0.051 2
	工业废水排放达标率/%	C ₁₁	公式推导	0.051 9
	工业固体废物综合利用率/%	C ₁₂	公式推导	0.070 2
	环境污染治理投资占 GDP 比重/%	C ₁₃	统计指标	0.038 7

续表 1 四川省土地生态安全评价指标体系及权重

系统层	指标层	指标代码	指标来源说明	权重
自然生态系统	人均耕地面积/hm ²	C ₁₄	统计指标	0.033 4
	耕地面积比重/%	C ₁₅	公式推导	0.035 8
	森林覆盖率/%	C ₁₆	统计指标	0.113 2
	水土流失治理面积占国土面积比重/%	C ₁₇	公式推导	0.039 9
	水土协调度/%	C ₁₈	公式推导	0.049 5
	受灾面积成灾率/%	C ₁₉	公式推导	0.033 9
	保护区面积占辖区面积比重/%	C ₂₀	公式推导	0.031 8
	建成区绿化覆盖率/%	C ₂₁	统计指标	0.035 1

注:统计指标是来源于各统计年鉴中的原始指标,公式推导指标是根据各统计年鉴中的指标经公式计算推导得出的新指标。其中,农业机械化水平=农业机械总动力/耕地总面积×100%;耕地压力指数=人均最小耕地面积/实际人均耕地面积,人均最小耕地面积计算方法参照参考文献[13];水土协调度=有效灌溉面积/耕地总面积×100%。

1.3.2 四川省土地生态安全评价物元模型

1.3.2.1 四川省土地生态安全评价物元的建立

设定土地生态安全 N 有 n 个特征,它用 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 和相应的量化值 V_1, V_2, \dots, V_n 进行描述,表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \dots & \dots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix},$$

式中, R 为 n 维土地生态安全物元,简记 $R = (N, C, V)^{[11]}$ 。

将四川省土地生态安全作为一个整体进行评价,以 2004、2006、2008、2010 年的数据为基础,结合土地生态安全评价指标共同构成四川省土地生态安全物元。

1.3.2.2 四川省土地生态安全评价经典域与节域物元矩阵

经典域确定在物元模型评价中至关重要,这关系到评价结果的有效性与科学性。根据土地生态安全的动态性与可拓性,将四川省土地生态安全划分为 4 个等级:安全(N_{01})、较安全(N_{02})、临界安全(N_{03})、不安全(N_{04})。在确定经典域过程中,考虑到传统等距划分方式划定的取值范围主观性较强,不能较好地反映指标与生态安全评价等级的隶属关系,通过参照国际通行标准取值、全国平均水平、同类地区相关指标标准值以及环保部关于《生态县、生态市、生态省建设指标(试行)》的标准值,确定四川省土地生态安全的经典域范围,同时根据经典域确定节域范围。

四川省土地生态安全评价的经典域物元模型矩阵 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 、 R_{04} 和节域物元模型矩阵 R_p 分别为:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} N_{01} & C_1 & (22\,000, 35\,000) \\ & C_2 & (4\,500, 6\,000) \\ & C_3 & (50, 60) \\ & C_4 & (7\,000, 8\,000) \\ & C_5 & (0, 225) \\ & C_6 & (20, 30) \\ & C_7 & (50, 60) \\ & C_8 & (-0.1, 0.15) \\ & C_9 & (80, 150) \\ & C_{10} & (0, 0.25) \\ & C_{11} & (96, 100) \\ & C_{12} & (85, 100) \\ & C_{13} & (1.5, 2.0) \\ & C_{14} & (0.075, 0.1) \\ & C_{15} & (0, 6) \\ & C_{16} & (35, 45) \\ & C_{17} & (15, 20) \\ & C_{18} & (70, 80) \\ & C_{19} & (10, 30) \\ & C_{20} & (20, 30) \\ & C_{21} & (45, 55) \end{bmatrix}, R_{02} = \begin{bmatrix} N_{02} & C_1 & (18\,000, 22\,000) \\ & C_2 & (3\,500, 4\,500) \\ & C_3 & (40, 50) \\ & C_4 & (6\,000, 7\,000) \\ & C_5 & (225, 380) \\ & C_6 & (14, 20) \\ & C_7 & (40, 50) \\ & C_8 & (0.15, 0.3) \\ & C_9 & (150, 350) \\ & C_{10} & (0.25, 0.5) \\ & C_{11} & (92, 96) \\ & C_{12} & (75, 85) \\ & C_{13} & (1.0, 1.5) \\ & C_{14} & (0.05, 0.075) \\ & C_{15} & (6, 10) \\ & C_{16} & (25, 35) \\ & C_{17} & (10, 15) \\ & C_{18} & (60, 70) \\ & C_{19} & (30, 40) \\ & C_{20} & (15, 20) \\ & C_{21} & (35, 45) \end{bmatrix}, R_{03} = \begin{bmatrix} N_{03} & C_1 & (14\,000, 18\,000) \\ & C_2 & (2\,500, 3\,500) \\ & C_3 & (30, 40) \\ & C_4 & (5\,000, 6\,000) \\ & C_5 & (380, 500) \\ & C_6 & (8, 14) \\ & C_7 & (30, 40) \\ & C_8 & (0.3, 0.45) \\ & C_9 & (350, 500) \\ & C_{10} & (0.5, 0.75) \\ & C_{11} & (88, 92) \\ & C_{12} & (55, 70) \\ & C_{13} & (0.5, 1.0) \\ & C_{14} & (0.025, 0.05) \\ & C_{15} & (10, 14) \\ & C_{16} & (15, 25) \\ & C_{17} & (5, 10) \\ & C_{18} & (50, 60) \\ & C_{19} & (40, 50) \\ & C_{20} & (10, 15) \\ & C_{21} & (25, 35) \end{bmatrix}, R_{04} = \begin{bmatrix} N_{04} & C_1 & (0, 14\,000) \\ & C_2 & (1\,500, 2\,500) \\ & C_3 & (20, 30) \\ & C_4 & (4\,000, 5\,000) \\ & C_5 & (500, 700) \\ & C_6 & (0, 8) \\ & C_7 & (20, 30) \\ & C_8 & (0.45, 0.6) \\ & C_9 & (500, 800) \\ & C_{10} & (0.75, 1.0) \\ & C_{11} & (80, 88) \\ & C_{12} & (40, 45) \\ & C_{13} & (0, 0.5) \\ & C_{14} & (0.00, 0.025) \\ & C_{15} & (14, 20) \\ & C_{16} & (0, 15) \\ & C_{17} & (0, 5) \\ & C_{18} & (40, 50) \\ & C_{19} & (50, 70) \\ & C_{20} & (0, 10) \\ & C_{21} & (0, 25) \end{bmatrix}, R_p = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & (0, 35\,000) \\ & C_2 & (1\,500, 6\,000) \\ & C_3 & (20, 60) \\ & C_4 & (4\,000, 8\,000) \\ & C_5 & (0, 700) \\ & C_6 & (0, 30) \\ & C_7 & (20, 60) \\ & C_8 & (-0.1, 0.6) \\ & C_9 & (80, 800) \\ & C_{10} & (0, 1.0) \\ & C_{11} & (80, 100) \\ & C_{12} & (40, 100) \\ & C_{13} & (0, 2.0) \\ & C_{14} & (0, 0.1) \\ & C_{15} & (0, 20) \\ & C_{16} & (0, 45) \\ & C_{17} & (0, 20) \\ & C_{18} & (40, 80) \\ & C_{19} & (10, 70) \\ & C_{20} & (0, 30) \\ & C_{21} & (0, 55) \end{bmatrix}.$$

1.3.2.3 确定四川省土地生态安全待评物元模型

根据 2004、2006、2008、2010 年各指标的具体量化

值,四川省土地生态安全评价待评物元模型矩阵

R_{2004} 、 R_{2006} 、 R_{2008} 和 R_{2010} 分别为:

$R_{2004} =$	$\begin{bmatrix} N_{2004} & C_1 & 7.895 \\ C_2 & 2.580 \\ C_3 & 39.3 \\ C_4 & 5.250 \\ C_5 & 549.92 \\ C_6 & 5.14 \\ C_7 & 31.1 \\ C_8 & 0.28 \\ C_9 & 179.9 \\ C_{10} & 0.556 \\ C_{11} & 86.43 \\ C_{12} & 58.28 \\ C_{13} & 1.13 \\ C_{14} & 0.046 \\ C_{15} & 8.05 \\ C_{16} & 30.27 \\ C_{17} & 10.37 \\ C_{18} & 64.11 \\ C_{19} & 44.44 \\ C_{20} & 15.71 \\ C_{21} & 28.54 \end{bmatrix}$	$R_{2006} =$	$\begin{bmatrix} N_{2006} & C_1 & 10.613 \\ C_2 & 3.002 \\ C_3 & 38.2 \\ C_4 & 4.720 \\ C_5 & 582.54 \\ C_6 & 5.99 \\ C_7 & 34.3 \\ C_8 & 0.29 \\ C_9 & 168.4 \\ C_{10} & 0.53 \\ C_{11} & 84.49 \\ C_{12} & 55.09 \\ C_{13} & 0.82 \\ C_{14} & 0.048 \\ C_{15} & 8.08 \\ C_{16} & 30.27 \\ C_{17} & 11.35 \\ C_{18} & 63.5 \\ C_{19} & 60.31 \\ C_{20} & 18.37 \\ C_{21} & 33.54 \end{bmatrix}$	$R_{2008} =$	$\begin{bmatrix} N_{2008} & C_1 & 15.495 \\ C_2 & 4.121 \\ C_3 & 36.2 \\ C_4 & 5.130 \\ C_5 & 613.31 \\ C_6 & 9.31 \\ C_7 & 37.4 \\ C_8 & 0.23 \\ C_9 & 167.8 \\ C_{10} & 0.424 \\ C_{11} & 94.93 \\ C_{12} & 61.67 \\ C_{13} & 0.81 \\ C_{14} & 0.049 \\ C_{15} & 8.16 \\ C_{16} & 30.79 \\ C_{17} & 12.12 \\ C_{18} & 63.31 \\ C_{19} & 45.11 \\ C_{20} & 18.02 \\ C_{21} & 35.30 \end{bmatrix}$	$R_{2010} =$	$\begin{bmatrix} N_{2010} & C_1 & 21.182 \\ C_2 & 5.140 \\ C_3 & 35.1 \\ C_4 & 5.250 \\ C_5 & 618.35 \\ C_6 & 7.87 \\ C_7 & 40.18 \\ C_8 & 0.23 \\ C_9 & 166 \\ C_{10} & 0.402 \\ C_{11} & 96.52 \\ C_{12} & 54.8 \\ C_{13} & 0.52 \\ C_{14} & 0.049 \\ C_{15} & 8.27 \\ C_{16} & 34.31 \\ C_{17} & 13.05 \\ C_{18} & 63.66 \\ C_{19} & 36.62 \\ C_{20} & 18.40 \\ C_{21} & 37.88 \end{bmatrix}$
--------------	---	--------------	--	--------------	--	--------------	--

1.3.2.4 关联度计算与评价等级确定 设定土地生态安全评价指标关联度函数 $K(x)$ 为:

$$K(x) = \begin{cases} \frac{-f(X, X_0)}{|X_0|}, & X \in X_0 \\ \frac{f(X, X_0)}{f(X, X_p) - f(X, X_0)}, & X \in X_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $f(X, X_0)$ 表示点 X 到有限区间 $X_0 = [a, b]$ 的距离, $f(X, X_p)$ 表示点 X 到有限区间 $X_p = [a_p, b_p]$ 的距离; X_0, X_p, X 分别表示土地生态安全物元模型的经典域范围值、节域范围值以及待评价土地生态安全物元值。其中:

$$f(X, X_0) = |X - (a+b)/2| - (b-a)/2 \quad (2)$$

$$f(X, X_p) = |X - (a_p+b_p)/2| - (b_p-a_p)/2 \quad (3)$$

基于此,通过计算各项指标关联度,分别对待评价对象 $N_{01}, N_{02}, N_{03}, N_{04}$ 的不同经典域等级范围值的综合关联度进行计算,计算公式如下:

$$K_j(N_x) = \sum_{i=1}^M w_i k_j(x_i) \quad (4)$$

式中, $K_j(N_x)$ 为待评估对象 N_x 在等级 j 上的综合关联度, $k_j(x_i)$ 为待评估对象 N_x 中指标 i 在等级 j 上的单指标关联度 ($j=1, 2, \dots, n$); w_i 为指标权重值。如果 $K_{ji} = \max[k_j(x_i)]$, $j=1, 2, \dots, n$, 则评价对象中指标 i 属于土地生态安全等级 j , K_{ji} 为评价对象中指标 i 在等级 j 上的单指标最大关联度。如果 $K_{jx} = \max[K_j(N_x)]$, $j=1, 2, \dots, n$, 则评价对象 N_x 属于土地生态安全等级 j , K_{jx} 为评价对象 N_x 在等级 j 上的最大综合关联度。

关联度 K 的大小反映评价对象隶属土地生态安全某一等级的程度大小,在物元模型中关联度 K 的取值为 $(-\infty, +\infty)$,不同取值区间所反映出的土地生态安全等级信息有所差异,具体如下:当 $K \geq$

1.0 时,表示评价对象超出了标准对象的上限,且数值越大,开发潜力越大;当 $0 \leq K < 1.0$ 时,表示评价对象符合标准对象的要求,且数值越大,越接近标准对象的上限;当 $-1.0 \leq K < 0$ 时,表示评价对象不符合标准对象要求,但具备转化为标准对象的条件,且数值越大,越容易转化;当 $K < -1.0$ 时,表示评价对象不符合标准对象的要求,且不具备转化为标准对象的条件^[2,11,15]。

2 结果与分析

2.1 四川省土地生态安全指标的生态安全关联度及安全等级

从单个指标反映的信息来看,2004—2010 年各项指标生态安全关联度等级转化方向大致分为以下 3 类。一是指标生态安全关联度趋于向高等级方向转化,包括人均 GDP、农民人均纯收入、城镇化率、人口密度、耕地压力指数、人均耕地面积、森林覆盖率、水土流失治理面积占国土面积比重、建成区绿化覆盖率,这些指标生态安全等级整体呈现上升趋势,说明四川省社会经济持续发展、实施科学合理的人口发展战略、加强耕地资源与生态环境保护等对土地生态安全水平提升具有重要作用。二是指标生态安全关联度向低等级方向转化,包括第三产业产值占地区生产总值比重、化肥施用量、耕地面积比重、环境污染治理投资占 GDP 比重 4 项指标,生态安全等级呈现下降趋势,这说明第三产业比重偏低、化肥施用量不断增加、耕地保护压力大、环境污染治理投资占 GDP 比重减少等问题制约四川省土地生态安全状况的改善。三是指标生态安全关联度呈现波动趋势,包括粮食单产、农业机械化水平、人口自然增长率、工业废水排放达标率、工业固体废物综合利用

率、水土协调度、受灾面积成灾率、保护区面积占辖区面积比重,说明这些因素为四川省土地生态安全的不确定因素,主要受自然灾害、突发事件等制约。其中,粮食单产、工业废水排放达标率、工业固体废

物综合利用率、水土协调度、受灾面积成灾率受 2006 年四川省特大干旱灾害影响,生态安全关联度有所下降;保护区面积占辖区面积比重受 2008 年汶川地震影响,生态安全关联度有所下降。

表 2 四川省 2004、2006、2008、2010 年土地生态安全指标的生态安全关联度及安全等级

关联度	2004 年					2006 年				
	N_{01}	N_{02}	N_{03}	N_{04}	安全等级	N_{01}	N_{02}	N_{03}	N_{04}	安全等级
$K(C_1)$	-0.641 1	-0.561 4	-0.434 7	0.436 1	不安全	-0.517 6	-0.410 4	-0.241 9	0.241 9	不安全
$K(C_2)$	-0.640 0	-0.460 0	0.080 0	-0.069 0	临界安全	-0.499 3	-0.249 0	0.498 0	-0.250 5	临界安全
$K(C_3)$	-0.356 7	-0.035 0	0.070 0	-0.325 2	临界安全	-0.393 3	-0.090 0	0.180 0	-0.310 6	临界安全
$K(C_4)$	-0.583 3	-0.375 0	0.250 0	-0.166 7	临界安全	-0.760 0	-0.640 0	-0.280 0	0.280 0	不安全
$K(C_5)$	-0.684 0	-0.531 0	-0.249 6	0.249 6	不安全	-0.752 7	-0.632 9	-0.412 7	0.412 7	不安全
$K(C_6)$	-0.743 0	-0.632 9	-0.357 5	0.357 5	不安全	-0.700 5	-0.572 1	-0.251 3	0.251 3	不安全
$K(C_7)$	-0.630 0	-0.445 0	0.110 0	-0.090 2	临界安全	-0.523 3	-0.285 0	0.430 0	-0.231 2	临界安全
$K(C_8)$	-0.317 1	0.133 3	-0.066 7	-0.377 8	较安全	-0.325 6	0.066 7	-0.033 3	-0.355 6	较安全
$K(C_9)$	-0.230 4	0.149 5	-0.630 0	-0.762 1	较安全	-0.172 3	0.092 0	-0.672 6	-0.789 5	较安全
$K(C_{10})$	-0.408 0	-0.112 0	0.224 0	-0.304 1	临界安全	-0.373 3	-0.060 0	0.120 0	-0.318 8	临界安全
$K(C_{11})$	-0.598 1	-0.464 2	-0.196 2	0.196 3	不安全	-0.719 4	-0.625 8	-0.438 8	0.438 8	不安全
$K(C_{12})$	-0.593 8	-0.390 7	0.218 7	-0.152 1	临界安全	-0.664 7	-0.497 0	0.006 0	-0.005 9	临界安全
$K(C_{13})$	-0.298 4	0.260 0	-0.130 0	-0.420 0	较安全	-0.453 3	-0.180 0	0.360 0	-0.280 7	临界安全
$K(C_{14})$	-0.386 7	-0.080 0	0.160 0	-0.313 4	临界安全	-0.360 0	-0.040 0	0.080 0	-0.323 9	临界安全
$K(C_{15})$	-0.203 0	0.487 5	-0.195 0	-0.425 0	较安全	-0.204 7	0.480 0	-0.192 0	-0.422 9	较安全
$K(C_{16})$	-0.243 1	0.473 0	-0.263 5	-0.509 0	较安全	-0.243 1	0.473 0	-0.263 5	-0.509 0	较安全
$K(C_{17})$	-0.324 7	0.074 0	-0.037 0	-0.358 0	较安全	-0.296 7	0.270 0	-0.135 0	-0.423 3	较安全
$K(C_{18})$	-0.270 4	0.411 0	-0.205 5	-0.470 3	较安全	-0.282 6	0.350 0	-0.175 0	-0.450 0	较安全
$K(C_{19})$	-0.361 0	-0.148 0	0.444 0	-0.178 7	临界安全	-0.757 8	-0.677 0	-0.515 5	0.484 5	不安全
$K(C_{20})$	-0.230 9	0.142 0	-0.047 3	-0.285 5	较安全	-0.122 9	0.326 0	-0.224 7	-0.418 5	较安全
$K(C_{21})$	-0.383 5	-0.196 2	0.354 0	-0.118 0	临界安全	-0.348 1	-0.063 7	0.146 0	-0.284 7	临界安全

关联度	2008 年					2010 年				
	N_{01}	N_{02}	N_{03}	N_{04}	安全等级	N_{01}	N_{02}	N_{03}	N_{04}	安全等级
$K(C_1)$	-0.295 7	-0.139 2	0.373 8	-0.088 0	临界安全	-0.055 9	0.204 5	-0.187 2	-0.342 0	较安全
$K(C_2)$	-0.167 8	0.379 0	-0.248 4	-0.463 1	较安全	0.426 7	-0.426 7	-0.656 0	-0.754 3	安全
$K(C_3)$	-0.460 0	-0.190 0	0.380 0	-0.276 8	临界安全	-0.496 7	-0.245 0	0.490 0	-0.252 5	临界安全
$K(C_4)$	-0.623 3	-0.435 0	0.130 0	-0.103 2	临界安全	-0.583 3	-0.375 0	0.250 0	-0.166 7	临界安全
$K(C_5)$	-0.817 5	-0.729 1	-0.566 6	0.433 5	不安全	-0.828 1	-0.744 8	-0.591 8	0.408 3	不安全
$K(C_6)$	-0.534 5	-0.335 0	0.218 3	-0.123 4	临界安全	-0.606 5	-0.437 9	-0.016 3	0.016 3	不安全
$K(C_7)$	-0.420 0	-0.130 0	0.260 0	-0.298 4	临界安全	-0.331 3	0.018 0	-0.009 0	-0.339 3	较安全
$K(C_8)$	-0.258 1	0.466 7	-0.233 3	-0.488 9	较安全	-0.258 1	0.466 7	-0.233 3	-0.488 9	较安全
$K(C_9)$	-0.168 6	0.089 0	-0.674 8	-0.791 0	较安全	-0.156 9	0.080 0	-0.681 5	-0.795 2	较安全
$K(C_{10})$	-0.291 0	0.304 0	-0.152 0	-0.434 7	较安全	-0.274 4	0.392 0	-0.196 0	-0.464 0	较安全
$K(C_{11})$	-0.174 3	0.267 5	-0.366 3	-0.577 5	较安全	0.130 0	-0.130 0	-0.565 0	-0.710 0	安全
$K(C_{12})$	-0.518 4	-0.277 7	0.444 7	-0.235 4	临界安全	-0.671 1	-0.506 7	-0.013 3	0.013 3	不安全
$K(C_{13})$	-0.460 0	-0.190 0	0.380 0	-0.276 8	临界安全	-0.653 3	-0.480 0	0.040 0	-0.037 0	临界安全
$K(C_{14})$	-0.346 7	-0.020 0	0.040 0	-0.328 8	临界安全	-0.346 7	-0.020 0	0.040 0	-0.328 8	临界安全
$K(C_{15})$	-0.209 3	0.460 0	-0.184 0	-0.417 1	较安全	-0.215 4	0.432 5	-0.173 0	-0.409 3	较安全
$K(C_{16})$	-0.228 6	0.421 0	-0.289 5	-0.526 3	较安全	-0.060 6	0.069 0	-0.465 5	-0.643 7	较安全
$K(C_{17})$	-0.267 7	0.424 0	-0.212 0	-0.474 7	较安全	-0.219 1	0.390 0	-0.305 0	-0.536 7	较安全
$K(C_{18})$	-0.286 1	0.331 0	-0.165 5	-0.443 7	较安全	-0.279 5	0.366 0	-0.183 0	-0.455 3	较安全
$K(C_{19})$	-0.377 8	-0.170 3	0.489 0	-0.164 2	临界安全	-0.199 2	0.338 0	-0.112 7	-0.334 5	较安全
$K(C_{20})$	-0.141 8	0.396 0	-0.201 3	-0.401 0	较安全	-0.121 2	0.320 0	-0.226 7	-0.420 0	较安全
$K(C_{21})$	-0.329 9	0.030 0	-0.015 0	-0.343 3	较安全	-0.293 7	0.288 0	-0.144 0	-0.429 3	较安全

2.2 四川省土地生态安全评价

由表 3 可以看出,2004 年和 2006 年四川省土地生态安全处于临界安全状态,2008 年和 2010 年处于较安全状态,整体上呈现出由临界安全(N_{03})向较安全(N_{02})转变的趋势。通过对比分析发现,不同安全等级整体表现为: $K_{01}(2006) < K_{01}(2004) < K_{01}(2008) < K_{01}(2010)$, $K_{02}(2006) < K_{02}(2004) < K_{02}(2010) < K_{02}(2008)$, $K_{03}(2010) < K_{03}(2006) < K_{03}(2004) < K_{03}(2008)$, $K_{04}(2010) < K_{04}(2008) < K_{04}(2004) < K_{04}(2006)$ 。由此可以看出,2004—2010 年四川省土地生态安全整体呈现出好转的趋势。结合表 2 中单一指标生态安全关联度,2004—2010 年人均 GDP、农民人均纯收入、城镇化率、森林覆盖率、水土流失治理面积占国土面积比重、建成区绿化覆盖率 6 项指标的生态安全关联度呈现上升趋势,且变化相对较大,这与四川省土地生态安全整体变化趋势一致,这也说明社会经济发展、自然生态环境保护等措施对提升土地生态安全水平具有重要作用。

表 3 四川省 2004、2006、2008、2010 年土地生态安全综合关联度及安全等级

综合关联度	N_{01}	N_{02}	N_{03}	N_{04}	安全级别
$K(2004)$	-0.441 3	-0.099 4	-0.064 1	-0.188 6	临界安全
$K(2006)$	-0.454 8	-0.126 2	-0.101 4	-0.154 6	临界安全
$K(2008)$	-0.355 0	0.056 4	-0.048 4	-0.321 2	较安全
$K(2010)$	-0.285 2	-0.029 6	-0.220 3	-0.353 6	较安全

从 2004—2010 年四川省土地生态安全综合关联度变化情况来看:(1) $K_{03}(2004) > K_{03}(2006)$ 表明,虽然 2004 年和 2006 年四川省土地生态安全等级均为临界安全,但在 $[0,1]$ 区间 2004 年对应的 N_{03} 更接近于标准上限,即 2004 年土地生态安全等级高于 2006 年,换言之,2006 年四川省土地生态安全水平有所下降。从单一指标生态安全关联度来看,2006 年粮食单产、工业废水排放达标率、工业固体废物综合利用率、水土协调度、受灾面积成灾率生态安全关联度较 2004 年有所降低,这说明这些指标在一定程度上对四川省土地生态安全产生了影响,而这些因素变化与 2006 年四川省百年不遇的特大干旱自然灾害有关。(2)2008 年与 2006 年相比,2008 年实现了土地生态安全等级由临界安全向较安全的转变。从单一指标来看,这一时期人均 GDP、农民人均纯收入、粮食单产、农业机械化水平、城镇化率、耕地压力指数、工业废水排放达标率、受灾面积成灾率、建成区绿化覆盖率实现向土地生态安全高等级方向的转变,这些因素在这一时期对

土地生态安全整体水平提升起到了促进作用。(3) $K_{02}(2008) > K_{02}(2010)$ 说明,2008 年对应的 N_{02} 关联度大于 2010 年,但 $K_{01}(2008) < K_{01}(2010)$ 则说明 2010 年四川省土地生态安全对应的 N_{01} 安全等级要高于 2008 年,从侧面反映了 2010 年四川省土地生态安全状况较 2008 年有所好转。从单一指标来看,这一时期人均 GDP、农民人均纯收入、城镇化率、工业废水排放达标率、受灾面积成灾率向土地生态安全高等级转化,这也说明这些指标对提升土地生态安全水平产生了积极作用,而这得益于社会经济发展、加强环境治理与生态环境保护等措施。

基于上述分析可以看出,2004—2010 年四川省土地生态安全趋于向良好的状态转变。综合各阶段指标生态安全关联度及综合关联度可以看出,人均 GDP、农民人均纯收入、城镇化率、工业废水排放达标率、森林覆盖率、水土流失治理面积占国土面积比重、受灾面积成灾率、建成区绿化覆盖率指标对四川省土地生态安全产生重要影响。根据指标生态安全关联度变化反映的信息,强化抵御自然灾害风险能力、加强环境污染治理与生态环境保护,是四川省土地生态建设的重点,也是提高四川省土地生态安全水平的关键点。

3 结论与建议

本研究结果显示,2004—2010 年四川省土地生态安全状况整体好转,其中 2004 年与 2006 年土地生态安全水平处于临界安全状态,但 2006 年受干旱灾害的影响,土地生态安全水平较 2004 年有所降低;2008 年处于较安全状态;2010 年处于较安全状态,并且与安全状态关联度进一步增强。

通过对各单指标反映的信息进行分析,社会经济持续发展、实施科学合理的人口发展战略以及加强耕地资源与生态环境保护等对提升四川省土地生态安全水平具有重要推动作用;而第三产业产值占地区生产总值比重偏低、化肥施用量不断增加、耕地面积下降、环境污染治理投资占 GDP 比重减少等问题制约土地生态安全状况的改善;受自然灾害、突发事件等制约,粮食单产、农业机械化水平、人口自然增长率、工业废水排放达标率、工业固体废物综合利用率、水土协调度、受灾面积成灾率以及保护区面积占国土面积比重为土地生态安全的不稳定因素。综合来看,人均 GDP、农民人均纯收入、城镇化率、工业废水排放达标率、森林覆盖率、水土流失治理面积占国土面积比重、受灾面积成灾率、建成区绿化覆盖率对四川省土地生态安全产生重要影响。(下转第 70 页)

- 2012(1):33-35.
- [17] 新楠,卢树昌,王小波,等.天津市设施菜田氮投入状况评价与面源污染风险分析[J].河南农业科学,2013,42(6):68-72.
- [18] 马建华,宋博,谷蕾.河南省某高校校园土壤重金属污染及其防治[J].气象与环境科学,2010,33(4):1-5.
- [19] 栗献锋.太原市污灌区土壤重金属分布特征及风险评价[J].山西农业科学,2012,40(7):742-746,774.
- [20] 梁晶,马光军,赵晓艺,等.3种不同功能区绿地土壤Cd和Hg的污染现状及其风险评价[J].现代农业科技,2009(12):17-19.
- [21] 孙金华,马建华.污染场地健康风险评价述评[J].气象与环境科学,2011,34(4):72-78.
- [22] 张笑归,宁国辉,刘树庆,等.张家口葡萄产区土壤抗生素含量及其潜在生态环境风险评价[J].华北农学报,2011,26(增刊):146-151.
- [23] 郭廷忠,薛旭方,李蕊.TOPSIS法在开封市化肥河水环境质量评价中的应用[J].气象与环境科学,2008,31(2):59-62.
- [24] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 2012[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [25] 国家环境保护总局.关于印发《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》的通知[EB/OL]. [2013-10-21]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172492.htm.
- [26] 毛小苓,刘阳生.国内外环境风险评价研究进展[J].应用基础与工程科学学报,2003,11(3):266-273.
- [27] 陆雍森.环境评价[M].上海:同济大学出版社,1999:531-558.
- [28] 范小杉,高吉喜.中国食品生产消费过程中农用化学品足迹分析[J].现代化工,2008,28(5):79-84.
- [29] 宋秀杰,程大军,张鑫,等.北京种植业结构调整及化肥面源污染控制[C].2010中国环境科学学会学术年会论文集,2010.
- [30] 殷砚.水体富营养化的影响及其防治技术[J].中国资源综合利用,2006,24(5):19-23.
- [31] 河南省环境保护厅.河南省环境状况公报 2011[EB/OL]. [2013-10-21]. <http://www.hnep.gov.cn/tab-id/435/InfoID/905/frtid/432/Default.aspx>.
- [32] 李传桐,张广现.农业面源污染背后的农户行为——基于山东省昌乐县调查数据的面板分析[J].地域研究与开发,2013,32(1):143-146.

(上接第 58 页)

因此,要提升四川省土地生态安全水平,强化抵御自然灾害风险能力、加强环境污染治理与生态环境保护是关键,具体应采取如下措施:首先,注重社会经济发展与人口、资源、生态环境的协调性,实施可持续发展战略,大力发展第三产业与绿色环保产业;其次,建立科学的环境污染预警预报机制,加强环境污染治理,对环境污染实施定点监控,改善环境质量;强化抵御自然灾害风险能力,注重森林、生物资源保护,维护生态环境的稳定性与协调性。

参考文献:

- [1] 曲福田,赵海霞,朱德明.江苏省土地生态安全问题及对策研究[J].环境保护,2005(2):51-56.
- [2] 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.
- [3] 刘胜华.我国土地生态安全问题及其立法[J].国土资源科技管理,2004,21(2):53-56.
- [4] 李玉平,蔡云龙.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.
- [5] 李明月,赖笑娟.基于BP神经网络方法的城市土地生态安全评价[J].经济地理,2011,31(2):289-293.
- [6] 吴冠岑,牛星.土地生态安全协同演变的机理分析及动态评价——以淮南市为例[J].生态经济,2012(2):157-160.
- [7] 张丽汝.武汉城市圈土地生态安全预警研究[D].武汉:华中农业大学,2010.
- [8] 李秀霞,张希.基于熵权法的城市化进程中土地生态安全研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(9):13-17.
- [9] 陈西蕊,张蓉珍.基于P-S-R模型的陕西省土地资源生态安全动态评价[J].南方农业学报,2011,42(2):224-228.
- [10] 余敦,陈文波.基于物元模型的鄱阳湖生态经济区土地生态安全评价[J].应用生态学报,2011,22(10):2681-2686.
- [11] 罗文斌,吴次芳,吴一洲.城市土地生态水平物元分析评价——以山东省滨州市为例[J].生态学报,2009,29(7):3818-3827.
- [12] 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.
- [13] 蔡运龙,傅泽强,戴尔阜.区域最小人均耕地面积与耕地资源调控[J].地理学报,2002,57(2):127-134.
- [14] 赵磊,刘洪彬,于国锋,等.基于熵权法土地资源可持续利用综合评价研究[J].资源与产业,2012,14(4):63-69.
- [15] 施开放,刁承泰,左泰安,等.基于熵权物元模型的耕地占补平衡生态安全评价[J].中国生态农业学报,2013,21(2):243-250.