

基于可拓分析的区域生态安全预警模型及应用 ——以陕西省为例

张 强^{1,4,*}, 薛惠锋^{2,4}, 张明军³, 刘雪艳¹

(1. 西北师范大学数学与信息科学学院, 兰州 730070; 2. 中国环境科学研究院环境与经济政策研究室, 北京 100012;

3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 4. 西安理工大学工商管理学院, 西安 710054)

摘要:生态安全问题是当前人类社会可持续发展面临的主要问题, 预警是生态安全研究的重点。根据生态安全预警多层次、多维度和动态性的要求, 利用可拓综合分析方法, 建立了区域生态安全的“状态-胁迫-免疫”(State-Danger-Immunity, SDI) 动态预警模型。运用该模型对陕西省历史年份(1990—2007 年)生态安全进行定量评估, 并对规划年份(2010 年)生态环境进行动态预警。研究表明, 陕西省 1990 年至 2007 年的生态环境从“不安全”状态到“较不安全”状态再到“较安全”状态, 呈逐渐好转的趋势, 但生态安全整体水平较低, 均处于“安全”水平以下; 2010 年陕西省生态安全为“蓝色”预警, 且具有向“黄色”预警变化的趋势, 水资源出现“橙色”预警, 是影响陕西生态安全的主要因素。

关键词:可拓分析; 区域生态安全; 预警模型; 陕西省

Early-warning model based on extension analysis for ecological security and its application: case study of Shaanxi Province

ZHANG Qiang^{1,4,*}, XUE Huifeng^{2,4}, ZHANG Mingjun³, LIU Xueyan¹

1 College of Mathematics and Information Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 Policy Research Center for Environment and Economy, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

4 College of Business, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: Ecological security is important in human health, natural resources, and socio-economical development. How to develop an early-warning system is the key problem in ecological security research.

Ecological security warning needs to establish the early warning indicator system to reflect the ecological status and development trend. First, in the perspective of identifying factors that affect the eco-system security, the “State-Danger-Immune” (SDI) model is used as a concept model of early-warning indicators. Second, the matter-element model is used on the Formal Description of level of security and early warning objects to establish safety standards and related early warning. The integrated multi-index early warning model can be used to indicate the security state of ecosystems. According to multi-level, multi-dimension and dynamic features of regional ecological security early-warning, the matter-element model is established to assess the regional environmental safety. As a case study, the model is employed to quantitatively assess the ecological security situation of Shaanxi Province from 1990 to 2007. The calculation results show that the ecological environment has shifted from “unsafe” to “relatively unsafe” to “relatively safe” states, which demonstrated that the overall status of ecological security in the Province is undergoing increasing improvement, and the basic ecological destruction can be controlled effectively. However, on the holistic level of ecological security, the safety level of the whole Province is still not satisfactory, because all safety states are less than the general requirement of “Safe”. The results are fundamentally consistent with current real situation. The model carries out the early-warning for ecological security in 2010.

基金项目:美国能源基金会-中国可持续能源资助项目(G-0810-10482); 中国环境科学研究院环境与经济学科能力建设资助项目(GYG1270802)

收稿日期:2009-07-07; **修订日期:**2010-04-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiangzh@126.com

The results show that the ecological environment state of Shaanxi Province experienced a gradual improving process from “unsafe”, “relatively unsafe” to “relatively safe” from 1990 to 2007, while its overall level is relatively low; all indicators are below the safety standards. The ecological security will take a “Blue” alert and has the trend of turning into “Yellow” alert of Shaanxi Province in 2010, among which the water resource with an “Orange” alert, which is the main affecting factor to ecological security of Shaanxi Province. In addition, conserving water resources, controlling water pollution, advancing resource utility effectiveness, reducing the impacts of human activities on ecosystems, promoting immunity function of ecological security are necessary for systematically developing and toward a higher level of regional ecological safety.

The early-warning model of ecological security, established in this study, has the merits of compatibility and flexibility. Therefore, it can be used not only for specific warning analysis on a particular targeting element of ecological security, but also for transforming multiple-level objective assessment into a single-level objective decision-making to better analyze the regional security status.

Key Words: extension analysis; regional ecological security; early-warning model; Shaanxi Province abbreviate

生态安全是指在生态复合系统中,不存在对人类健康和社会经济发展构成威胁的环境问题,自然资源和生态环境处于良好状况,整个系统处于和谐有序、没有危险的一种稳定状态。生态安全问题作为决定人类生存与发展的根本性问题^[1],已经成为生态学^[2]、地理学^[3-4]、国际政治学^[5-6]、环境科学^[7]、安全科学^[8-9]等相关学科的研究热点。近年来,国内外学者分别从概念探讨^[10-11]、理论分析^[12-13]、安全评价^[14-19]等方面进行了大量研究。预警是生态安全研究的重点和难点,通过对各种相关数据信息进行综合分析,预测和推断生态系统稳定的警情和警度,达到提前预防和控制不安全因素的目的^[20-21]。目前生态安全预警常见的方法有模糊综合评价法、神经网络模拟和系统动力学等。模糊综合评价法^[22]刻画了评价对象分级界限的模糊性,客观地反映了实际情况,但该方法强调极值作用,信息损失多,对权重的确定不够科学。BP神经网络法^[23]容易出现过度训练或训练不足,陷入局部最小,造成与实际不符。利用系统动力学方法^[24]对相同问题建立的模型和研究结果差异较大,缺乏一定的可靠性。因此,现有的预警模型和方法在反映区域生态安全的多层次、多维度和动态变化性等方面都存在一定的局限性。

可拓分析作为一种新的动态综合分析模型和方法,已应用到生态环境评价^[25-28]、不正常航班管理预警^[29]、环境质量综合评判^[30]、地震预报综合评判^[31]等方面,目前还没有将可拓分析方法应用到生态安全预警研究中。本文基于物元模型、可拓集合和关联函数理论,建立一种基于多指标可拓综合分析的生态安全动态预警模型。以陕西省为例,提出“状态-胁迫-免疫(State-Danger-Immunity, SDI)”预警指标概念模型,构建陕西省生态安全预警指标体系,从时间尺度(1996—2007年)对陕西生态安全进行评价,并对2010年的生态安全态势进行预警。

1 可拓分析方法及生态安全预警模型

1.1 可拓分析及安全预警方法

可拓综合分析方法是由我国数学家蔡文先生创立的多元数据量化决策的一种新方法^[32]。其主要理论包括物元模型、可拓集合和关联函数。物元是指事物、特征及事物的特征值三者组成的三元组。设事物的名称为 N ,其关于特征 C 的量值为 V ,则将三元有序组称为事物的基本元,简称物元,记为 $R = (N, C, v)$ 。其中 N, C, V 称为物元 R 的三要素。可拓理论将逻辑值从模糊数学的 $[0, 1]$ 闭区间拓展到 $(-\infty, +\infty)$ 实数轴,提出了表示事物性质变化的可拓集合的概念。为了定量描述事物性质的变化,可拓理论提出了关联函数及其计算方法,以关联函数值表征事物具有某种性质的程度及转化过程,实现事物的状态分类和发展态势分析。

根据可拓理论和方法,可利用物元模型对安全等级、预警对象进行形式化描述,并采用可拓集合和关联函数确立预警标准和安全关联度,建立表征安全状态的多指标综合预警模型。通过对单预警指标的关联函数计

算得到单要素安全水平,利用模型集成得到多指标的综合安全水平,定量表示安全度;以关联度大小对预警对象发展变化趋势进行判断,表征复杂巨系统的动态变化过程,实现动态安全预警。形式化的多元参数模型表示和定量的安全水平及趋势判断^[33]。

1.2 生态安全预警模型

1.2.1 生态安全的经典域、节域和预警对象

设有 m 个生态安全等级 $N_1, N_2, \dots, N_m$, 建立相应的物元

$$R_j = ((N_j, c_i, v_{ji})) = \begin{bmatrix} N_j, & c_1, & v_{j1} \\ & c_2, & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j, & c_1, & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix}$$

其中, N_j 表示所划分的 j 个生态安全等级 ($j=1, 2, \dots, m$), $C_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示安全等级 N_j 的特征, v_{ji} 分别为 N_j 关于 c_i 所规定的量值范围, 即各生态安全等级关于对应特征所取的数值范围, 称 R_j 为生态安全的经典域。对于经典域, 构造其节域 R_p , 且 $R_p \supset R_j$,

$$R_p = ((N_p, c_i, v_{ip})) = \begin{bmatrix} N_p, & c_1, & v_{1p} \\ & c_2, & v_{2p} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & v_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j, & c_1, & \langle a_{1p}, b_{1p} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{2p}, b_{2p} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & \langle a_{np}, b_{np} \rangle \end{bmatrix}$$

其中, N_p 表示生态安全等级的全体, v_{ip} 为 N_p 关于 c_i 所取的量值范围。

对于待预警对象, 将预警指标信息用物元:

$$R_o = (P_o, c_i, v_i) = \begin{bmatrix} P_o, & c_1, & v_1 \\ & c_2, & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & v_n \end{bmatrix}$$

其中, P_o 表示预警对象的名称, v_i 为 P_o 关于 c_i 的量值。

1.2.2 关联度计算及距的确定

待预警对象关于各安全等级的关联度用关联函数计算, 第 $i (i=1, 2, \dots, n)$ 个指标数值域属于第 $j (j=1, 2, \dots, m)$ 个安全等级的关联函数为:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{\rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij})}, & \rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij}) \neq 0 \\ -\rho(v_i, V_{ij}) - 1, & \rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $K_j(v_i)$ 为各安全因子关于安全级别的关联度; $\rho(v_i, V_{ij})$ 为点 v_i 与有限区间 $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 的距; $\rho(v_i, V_{ip})$ 为点 v_i 与有限区间 $V_{ip} = \langle a_{ip}, b_{ip} \rangle$ 的距。其中 v_i 为评价因子的实际数值, $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 为经典域, $V_{ip} = \langle a_{ip}, b_{ip} \rangle$ 为节域。其中: $\rho(x, \langle a, b \rangle) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2}$ 。

关联度 $K_j(v_i)$ 表征待预警对象各预警指标关于评价等级 j 的归属程度, 相当于模糊数学中描述模糊集合的隶属度, 模糊数学隶属度为闭区间 $[0, 1]$, 而关联度的取值范围是整个实数轴, 若 $K_j(v_i) = \max K_j(v_i)$, $j \in (1, 2, \dots, m)$, 则预警指标 v_i 属于等级 j 。

1.2.3 预警指标权系数

生态安全的预警指标权系数, 采用关联函数方法确定^[34]。设:

$$r_{ij}(v_i, V_{ij}) = \begin{cases} \frac{2(v_i - a_{ij})}{b_{ij} - a_{ij}}, v_i \leq \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \\ \frac{2(b_{ij} - v_i)}{b_{ij} - a_{ij}}, v_i \geq \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$) 且 $v_i \in V_{ip}$ (节域) ($i = 1, 2, \dots, n$), 则:

$$r_{ij\max}(v_i, V_{ij\max}) = \max_j \{r_{ij}(v_i, V_{ij})\}$$

如果指标 c_i 的数据落入的类别越大, 该指标应赋予越大的权系数, 则取:

$$r_i = \begin{cases} j_{\max} \times (1 + r_{ij\max}(v_i, V_{ij})) & \text{当 } r_{ij\max}(v_i, V_{ij}) \geq -0.5 \text{ 时} \\ j_{\max} \times 0.5 & \text{当 } r_{ij\max}(v_i, V_{ij}) < -0.5 \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

否则, 如果指标 c_i 的数据落入的类别越大, 该指标应赋予越小的权系数, 则取:

$$r_i = \begin{cases} (m - j_{\max} + 1) \times (1 + r_{ij\max}(v_i, V_{ij})) & \text{当 } r_{ij\max}(v_i, V_{ij}) \geq -0.5 \text{ 时} \\ (m - j_{\max} + 1) \times 0.5 & \text{当 } r_{ij\max}(v_i, V_{ij}) < -0.5 \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

于是由单个样本数据得到指标 c_i 的权系数为:

$$a_i = r_i / \sum_{i=1}^n r_i \quad (5)$$

则根据第 k 个样本数据得到指标 c_i 的权系数为 a_{ik} ($k = 1, 2, \dots, n$), 对 n 个样本数据得到的权系数求平均值, 即可得到指标 c_i 的权系数为:

$$w_i = \sum_{k=1}^n a_{ik} / n \quad (6)$$

1.2.4 安全等级评定

关联函数 $K(x)$ 的数值表示预警对象符合生态安全级别的隶属程度。预警对象 R_0 关于安全等级 j 的关联度为:

$$K_j(R_0) = \sum_{i=1}^n w_i K_j(v_i) \quad (7)$$

若 $K_{j_0} = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(R_0)$, 则评定 R_0 属于安全等级 j_0 。当 $K_j(R_0) > 0$ 时, 表示待预警对象符合某安全等级标准的要求, 并且其值越大, 符合程度越好; 当 $-1 \leq K_j(R_0) \leq 0$ 时, 表示待预警对象不符合某安全等级标准的要求, 但具备转化为该级标准的条件, 并且其值越大, 越易转化; 当 $K_j(R_0) \leq -1$ 时, 表示待预警对象不符合某安全等级标准的要求, 而且不具备转化为该安全等级的条件, 其值越小, 表明与某安全等级标准的差距越大。

2 陕西省生态安全预警分析

2.1 研究区概况

陕西省位于中国西北地区东部, 地处东经 $105^\circ 29'$ — $111^\circ 15'$ 和北纬 $31^\circ 42'$ — $39^\circ 35'$ 之间, 全省地域南北长、东西窄, 总面积 20.56 万 km^2 , 占全国总面积的 2.1%。区域内水资源短缺, 生态环境脆弱, 矿产资源丰富, 是中国的矿产资源大省之一。随着煤炭、石油和天然气等资源的大规模开发, 陕西生态环境问题日益突出, 水土流失严重、土地荒漠化加剧、森林破坏严重、自然灾害频繁发生。局部地区生态趋于危机和不安全状态, 不仅制约陕西省社会经济的发展, 而且对西部开发和中东部发展产生重大影响。

2.2 研究尺度与数据来源

区域生态安全预警分析包括历史年份的生态安全评价和未来年份的生态安全预警。本研究通过对陕西省 1996—2007 年的历史年份生态安全进行评价, 检验预警模型的有效性, 并利用模型对 2010 年陕西生态安全状态和发展趋势进行预警分析。

本研究需要的原始数据主要源于:《中国环境年鉴》(1996—2007 年)^[35]、《陕西省统计年鉴》(1996—

2007) [36]、《陕西省环境状况公报》(1996—2007) [37]、《陕西省水资源公报》(1996—2007) [38]、《陕西省国民经济和社会发展“十一五”规划》 [39]、《陕西省“十一五”环境保护专项规划》 [40]、《陕西省“十一五”生态建设专项规划》 [41]、《国家环境保护“十一五”规划》 [42] 等。

2.3 预警指标体系的构建

生态安全预警首先需要建立一套能反映生态系统状态和发展态势的预警指标体系。从现有的研究成果来看,生态安全评价指标体系,大都基于“压力-状态-响应(Press-State-Response, PSR 模型)”模型来构建 [43]。王耕等通过对区域生态安全概念及评价体系的研究认为,生态安全是一个动态演变过程,仅仅基于 PSR 框架的评价并不能全面客观解释生态安全的演变过程 [44],尤其是预警指标体系,由于要求具有预测性和预报性,现有的生态安全评价指标体系显然不能满足生态安全预警的需要。

本文以识别影响生态系统安全因素为视角,提出了“状态-胁迫-免疫(State-Danger-Immunity, SDI 模型)”的生态安全预警指标概念模型。通过系统分析,认为影响区域生态安全的主要因素包括生态环境状态、生态安全胁迫和生态风险免疫功能 3 个方面。区域拥有的自然禀赋和生态环境现状,是区域生态环境的基础,即生态安全的状态因素;自然资源不合理开发和利用,引起的环境污染、资源浪费、生态破坏等,对生态系统安全构成胁迫效应和隐患,即生态安全的胁迫因素;为规避区域生态环境可能存在的风险,人们通过制度、技术、经济、教育等手段,保持和增强生态系统的抵抗生态风险的免疫功能,即生态安全的免疫功能因素。利用 SDI 模型,构建陕西省生态安全预警指标体系(表 1)。

表 1 陕西省生态安全预警指标体系
Table 1 The index system of regional ecological security Early-warning

目标层 Object layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	红色预警 Red I (非常不安全) Very insecurity	橙色预警 Orange II (不安全) Insecurity	黄色预警 Yellow III (较不安全) Relatively insecurity	蓝色预警 Blue IV (较安全) Relative safe	绿色预警 Green V (安全) Safe	指标权重 Index weight
区域	生态	人均水资源量 $C_1/(\text{m}^3/\text{人})$	[100,500]	[500,2000]	[2000,5000]	[5000,10000]	[10000,15000]	0.0193
生态	环境	水环境指数 C_2	[1,0.08]	(0.08,0.06]	(0.06,0.04]	(0.04,0.02]	(0.02,0]	0.0517
安全	状态 ^②	大气环境指数 C_3	[1,0.08]	(0.08,0.06]	(0.06,0.04]	(0.04,0.02]	(0.02,0]	0.0342
水平 ^①		人均耕地面积 $C_4/(\text{km}^2/\text{人})$	[0.0002,0.00053]	[0.00053,0.00075]	[0.00075,0.001]	[0.001,0.0022]	[0.0022,0.003]	0.0179
		畜均草地面积 $C_5/(\text{hm}^2/\text{头})$	[0.0030,0.0133]	[0.0133,0.04]	[0.04,0.08]	[0.08,0.12]	[0.12,0.20]	0.0310
		人均林地面积 $C_6/(\text{km}^2/\text{人})$	[0.0005,0.0011]	[0.0011,0.0025]	[0.0025,0.004]	[0.004,0.0064]	[0.0064,0.008]	0.0327
		水土流失面积/土地面积 C_7	[0.7,0.5]	(0.5,0.375]	(0.375,0.2]	(0.2,0.05]	(0.05,0.005]	0.0367
		人均 GDP/ C_8 (元/人)	[6000,8000]	[8000,10000]	[10000,20000]	[20000,30000]	[30000,40000]	0.0435
		恩格尔系数 C_9	[60,50]	(50,40]	(40,30]	(30,25]	(25,15]	0.0156
		三产比重 $C_{10}/\%$	[10,15]	[15,25]	[25,35]	[35,45]	[45,55]	0.0499
		万人科技人员数 $C_{11}/\text{人}$	[100,200]	[200,350]	[350,450]	[450,600]	[600,800]	0.0490
		公众环保满意率 $C_{12}/\%$	[0.5,0.6]	[0.6,0.7]	[0.7,0.8]	[0.8,0.9]	[0.9,1]	0.0367
	生态	人均污水排放量 $C_{13}/(\text{m}^3/\text{人})$	[60,35]	(35,25]	(25,15]	(15,8]	(8,0]	0.0435
	安全	人均用水量/ $C_{14}(\text{m}^3/\text{人})$	[1200,800]	(800,600]	(600,400]	(400,200]	(200,100]	0.0367
	胁迫	人均工业废气排放量 $C_{15}/(\text{万标 m}^3/\text{人})$	[5,2]	(2,1.5]	(1.5,1]	(1,0.5]	(0.5,0]	0.0346
	效应 ^③	人均耗能量 $C_{16}/(\text{t 标煤})$	[1.5,1]	(1,0.8]	(0.8,0.5]	(0.5,0.3]	(0.3,0]	0.0367
		GDP 增长率 $C_{17}/\%$	[15,14]	(14,12]	(12,10]	(10,8]	(8,6]	0.0227
		人口密度 $C_{18}/(\text{km}^2/\text{人})$	[800,600]	(600,500]	(500,400]	(400,300]	(300,150]	0.0308
		城市化率 $C_{19}/\%$	[80,70]	[70,55]	[55,40]	[40,30]	[30,15]	0.0544
		森林覆盖率 $C_{20}/\%$	[5,10]	[10,20]	[20,35]	[35,45]	[45,65]	0.0544
		荒漠化率 $C_{21}/\%$	[0.6,0.45]	(0.45,0.35]	(0.35,0.25]	(0.25,0.15]	(0.15,0]	0.0312
	生态	工业废水达标排放率 $C_{22}/\%$	[20,40]	[40,55]	[55,75]	[75,95]	[95,100]	0.0490
	风险	工业废气处理率 $C_{23}/\%$	[20,40]	[40,50]	[50,60]	[60,70]	[70,95]	0.0408

续表

目标层 Object layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	红色预警 Red I (非常不安全) Very insecurity	橙色预警 Orange II (不安全) Insecurity	黄色预警 Yellow III (较不安全) Relatively insecurity	蓝色预警 Blue IV (较安全) Relative safe	绿色预警 Green V (安全) Safe	指标权重 Index weight
	免疫	生态环境管理水平 C_{24}	[0.5,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.95)	[0.95,1]	0.0080
	能力 ^④	工业固废利用率 $C_{25}/\%$	[20,45)	[45,60)	[60,75)	[75,90)	[90,100]	0.0340
		科技投入强度 C_{26}	[0.05,0.01)	[0.01,0.03)	[0.03,0.06)	[0.06,0.08)	[0.08,0.1]	0.0272
		环保投入强度 C_{27}	[0.002,0.005)	[0.005,0.01)	[0.01,0.02)	[0.02,0.035)	[0.035,0.6]	0.0367
		教育投入强度 C_{28}	[0.02,0.075)	[0.075,0.1)	[0.1,0.2)	[0.2,0.25)	[0.25,0.4]	0.0245
		环保教育水平 C_{29}	[0.45,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1]	0.0163

①Regional Ecological security;②Ecosystem State;③Ecosystem Danger;④Ecosystem Immunity

2.4 生态安全等级划分与预警指标阈值

2.4.1 安全等级划分

运用可拓集合概念,将生态安全分异概念集合中的渐变分类关系由定性描述扩展为定量描述,从而辨识生态安全概念的层次关系。参考国家生态安全评估体系研究成果^[45],将生态安全等级划分为五级,按照生态安全度由劣到优,分别对应于 I (非常不安全状态)、II (不安全状态)、III (较不安全状态)、IV (较安全状态)、V (安全状态),分别对应于红色、橙色、黄色、蓝色和绿色,得到区域生态安全等级划分标准(表 2)。

2.4.2 预警指标阈值确定

在确定生态安全预警指标体系和安全等级基础上,参考国家、行业和地方规定的环境质量标准、背景和本底标准、类比标准等,通过对陕西省 1996—2007 年的历史数据统计分析,确定各预警指标对应的各生态安全级别的阈值(表 1)。

表 2 区域生态安全等级划分

Table 2 Criterion of regional ecological security classification

安全等级 Classification	生态安全表征状态 State of ecological security classification	安全预警 Alter
I	生态环境受到严重破坏,对人体健康和社会经济发展带来严重威胁,自然资源 and 环境保护管理滞后,难以实现人口、资源和环境的协调发展	红色预警
II	生态环境受到较大破坏,对人体健康和社会经济发展造成较大影响,生态压力较大,环境政策不合理,阻碍了人口、资源和环境的协调发展	橙色预警
III	生态环境受到一定的破坏,对人体健康和社会经济发展产生一定的影响,环境质量出现恶化,环境管理措施没有力度,环境污染事件时有发生	黄色预警
IV	生态环境较少受到破坏,生态系统功能尚好,对人体健康和社会经济发展没有影响,能承受较轻微的生态胁迫压力,环境管理响应程度高,环境污染事件发生较少	蓝色预警
V	生态环境基本未受干扰破坏,生态系统功能良好,无明显的生态胁迫因子,具有较强的抵御和恢复能力,社会经济政策能有效地保护资源和环境,是人类活动的理想环境	绿色预警

2.5 计算及结果分析

2.5.1 指标权重计算

利用陕西省 1996—2007 年历史数据作为计算样本,根据公式(2)—(6),计算陕西省生态安全预警指标权重系数,结果见表 1。

2.5.2 1996—2007 年生态安全评价

利用公式(4)计算陕西省 1996 年—2007 年预警指标对于不同预警级别的安全关联度,利用公式(7)和表 1 的权重系数计算各年的对于不同安全等级的综合安全关联度 $K_j(R_0)$,根据 $K_{j0}(R_0) = \max_{j \in \{I, II, \dots, V\}} K_j(R_0)$ 得到生态安全级别,得到计算结果(表 3)。

由模型计算可知,1996—2007 年期间,陕西省生态环境从“不安全”状态到“较不安全”状态再到“较安

全”状态,12a 间生态安全呈现逐渐好转趋势。1996—2000 年期间陕西省生态安全水平较低,基本都处于“不安全状态”。到 2000 年($K_{III}(R_{2000})=0.56143>0$)达到“较不安全状态”,实现了由“不安全”状态向“较不安全”状态的关键性转变。2001—2005 年,陕西省生态安全关联度的最大值均落在 III 区间,全省生态安全均处于“较不安全”状态。2006 年首次出现“较安全”($K_{IV}(R_{2006})=0.11256>0$)的生态环境状态。2007 年全省生态环境为“较安全”($K_{IV}(R_{2007})=0.32342>0$)状态,且具有向“安全”状态发展($K_V(R_{2007})=-0.09342>0$)的良好态势。

表 3 陕西省 1996—2007 年生态安全综合评价结果
Table 3 Integrated assessment results of regional ecological security in Shannxi Province

安全关联度 Security correlation	I	II	III	IV	V	安全级别 Classification	变化趋势 Trend
$K_j(R_{1996})$	-0.30594	0.78852	-0.62353	-1.05374	-1.24726	不安全 II	非常不安全 I
$K_j(R_{1997})$	-0.10755	0.43872	-0.22353	-1.06402	-1.34271	不安全 II	非常不安全 I
$K_j(R_{1998})$	-1.03000	0.62830	-0.11272	-1.03974	-1.31304	不安全 II	较不安全 III
$K_j(R_{1999})$	-1.02687	0.18000	-0.15714	-1.34774	-1.83269	不安全 II	较不安全 III
$K_j(R_{2000})$	-1.16204	-0.73686	0.56143	-1.01570	-1.16351	较不安全 III	不安全 II
$K_j(R_{2001})$	-1.90620	-0.47533	0.15560	-1.06256	-1.44079	较不安全 III	不安全 II
$K_j(R_{2002})$	-1.02500	-0.72662	0.10750	-0.32759	-1.63617	较不安全 III	较安全 IV
$K_j(R_{2003})$	-1.40453	-0.20030	0.26301	-1.14286	-1.36842	较不安全 III	不安全 II
$K_j(R_{2004})$	-1.12937	-0.10345	0.14561	-1.24045	-1.36557	较不安全 III	不安全 II
$K_j(R_{2005})$	-1.29081	-1.07348	0.26371	-0.11040	-1.09677	较不安全 III	较安全 IV
$K_j(R_{2006})$	-1.44536	-1.20345	-0.20563	0.11256	-1.06442	较安全 IV	较不安全 III
$K_j(R_{2007})$	-1.82731	-1.36585	-0.37748	0.32342	-0.09342	较安全 IV	安全 V

以上发展变化说明,多年来陕西省生态环境保护工作成效显著,生态安全问题基本上得到了有效控制。但是从生态安全水平来看,全省生态安全级别较低,均处于“安全”水平以下,整体情况不容乐观。研究结果与陕西省实际情况基本一致,说明基于可拓综合分析方法建立的生态安全预警模型合理、可靠,可用于陕西省未来年份生态安全进行预警分析。

2.5.3 2010 年生态安全预警

将 2010 年生态安全预警指标值并代入预警模型,得到 2010 年陕西省生态安全预警结果(表 4)。由 $K_{IV}(R_{2010})=\max_{j \in \{I, II, \dots, V\}} K_j(R_{2000})=0.13360$ 计算可知陕西省 2010 年的生态安全等级属于 IV,即“较安全”状态; $K_{III}(R_{2010})=-0.07442, K_V(R_{2010})=-0.36829$,且 $K_{III}(R_{2010})>K_V(R_{2010})$,表明具有向“较不安全”状态发展变化的趋势。因此,2010 年陕西省生态安全为“蓝色”预警,生态环境良好,但未来发展形势依然严峻,具有向“黄色”预警发展的恶化趋势。

根据预警分析可知,陕西省 2010 年整体生态环境良好,但恶化趋势明显,生态环境保护形势依然严峻,尤其是部分短板因素对整体生态安全将造成严重威胁。水资源短缺、水污染、大气环境污染将是影响陕西省生态安全的主要因素。在未来的生态的环境保护工作中,只有采取积极有效的预防和控制措施,才能保证实现陕西生态环境达到“较安全”的状态。

3 结论与讨论

(1)利用本文建立的预警指标体系和预警方法,对陕西省 1996 年—2007 年生态安全进行评价,计算得到生态环境从“不安全”状态到“较不安全”状态再到“较安全”状态,生态安全整体情况得到不断改善,生态破坏基本上得到了有效控制。但是从整体生态安全水平来看,全省生态安全级别较低,均低于“安全”水平,研究结果与实际情况基本相符。

(2)对陕西省 2010 年生态安全状况进行预警,表明在实施环境目标的情景下,2010 年生态安全为“蓝色”

预警,且具有向“黄色”预警发展的趋势。水资源短缺是影响陕西生态安全的主要因素,为“橙色”预警。环保科技基础较好,为“绿色”预警。因此,在未来生态安全建设中,应充分发挥科技资源优势,节约水资源、控制水污染,提高资源利用效率,控制和减少人类活动对生态系统的压力,提高生态安全免疫功能,全面系统的保障区域生态安全向更高水平发展。

表 4 陕西省 2010 生态安全度计算结果

Table 4 Early-warning results of regional ecological security in Shannxi Province

预警指标 Index	I	II	III	IV	V	安全预警 Alter	发展趋势 Trend
$K_j(C_1)$	-1.30594	0.78852	-0.62353	-1.25402	-1.42775	橙色	黄色
$K_j(C_2)$	-1.03000	-1.02830	0.21374	-0.33974	-1.23094	黄色	蓝色
$K_j(C_3)$	-1.13235	-1.18000	-0.15714	0.34444	-0.43269	蓝色	黄色
$K_j(C_4)$	-1.01204	-0.73686	-0.56143	0.31570	-0.19351	蓝色	绿色
$K_j(C_5)$	-0.60650	-0.47533	-0.05560	0.06256	-0.44079	蓝色	黄色
$K_j(C_6)$	-1.02500	-0.52632	-0.18750	0.32759	-0.42647	蓝色	黄色
$K_j(C_7)$	-1.23001	-0.43876	-0.13760	0.14286	-0.36842	蓝色	黄色
$K_j(C_8)$	-1.17949	-0.10345	-0.08571	0.36000	-0.06667	蓝色	绿色
$K_j(C_9)$	-1.09091	-0.37778	-0.20000	0.12000	-0.09677	蓝色	绿色
$K_j(C_{10})$	-0.42731	-0.36585	-0.27778	0.62500	-0.35000	蓝色	黄色
$K_j(C_{11})$	-1.00364	-0.46667	-0.20000	0.20000	-0.14286	蓝色	绿色
$K_j(C_{12})$	-1.32558	-0.16121	-0.12100	0.17143	-0.15556	蓝色	黄色
$K_j(C_{13})$	-1.41374	-0.26061	0.05405	-0.34545	-0.70085	黄色	橙色
$K_j(C_{14})$	-0.44231	-0.23684	0.26087	-0.17143	-0.50847	黄色	蓝色
$K_j(C_{15})$	-1.25962	-0.15842	0.05231	-0.02384	-0.52615	黄色	蓝色
$K_j(C_{16})$	-0.44444	-0.37500	0.66667	-0.28571	-0.58333	黄色	蓝色
$K_j(C_{17})$	-1.14286	-0.29000	-0.25000	0.45455	-0.17143	蓝色	绿色
$K_j(C_{18})$	-0.52500	-0.36667	-0.05000	0.05556	-0.42424	蓝色	黄色
$K_j(C_{19})$	-0.35000	-0.25030	-0.05230	0.23210	-0.25143	蓝色	黄色
$K_j(C_{20})$	-1.62500	-0.50000	-0.24000	0.43023	-0.25000	蓝色	黄色
$K_j(C_{21})$	-0.43500	-0.24667	-0.03143	0.03354	-0.29079	蓝色	黄色
$K_j(C_{22})$	-0.62222	-0.40000	0.30000	-0.53333	-0.65000	黄色	橙色
$K_j(C_{23})$	-1.42857	-0.19000	0.33333	-0.20000	-0.42857	黄色	橙色
$K_j(C_{24})$	-1.69556	-0.60857	-0.45200	0.28667	-0.10484	蓝色	绿色
$K_j(C_{25})$	-1.45455	-0.25000	-0.20000	0.14286	-0.33333	蓝色	黄色
$K_j(C_{26})$	-1.45455	-0.34286	-0.21210	-0.15455	0.12530	绿色	蓝色
$K_j(C_{27})$	-1.42857	-0.25000	-0.15000	0.33333	-0.63636	蓝色	黄色
$K_j(C_{28})$	-1.47692	-0.43333	-0.15000	0.63333	-0.10526	蓝色	绿色
$K_j(C_{29})$	-1.35882	-0.26667	-0.16000	0.54286	-0.06444	蓝色	绿色
综合安全关联度 ^① $K_j(C_{2010})$	-1.03716	-0.38358	-0.07442	0.13360	-0.36829	蓝色	黄色

①Integrated Security Correlation

(3) 基于可拓分析的生态安全预警模型具有可扩充性和灵活性,既可以对单个生态安全要素进行针对性的预警分析,又可以将多目标评价归结为单目标决策,对整个区域对象的生态安全状况进行分析。该模型和方法克服了多角度、多因素预警中容易出现的主观片面性,可拓集合中“既是又非”的临界概念,摆脱了经典数学“非此即彼”的二值限制,实现了生态环境“既此亦彼”的动态安全预警,为环境管理部门对环境风险进行有效防范和控制提供了科学依据。

References:

- [1] Ye W H, Kong Q C Environmental Security: a fundamental problem confronting mankind in the 21st century. *China Population, Resources and Environment*, 2001, 11(3): 42-44.
- [2] Qu G P. The problems of ecological environmental have become a popular subject of country safety. *Environmental Protection*, 2002, 5(5): 3-5.
- [3] Liu S Y, Zuo C Q, Meng Q L. Soil and water conservation and national ecological security. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(1): 102-105.
- [4] Mike H, Simon M. Mike Hodson and Simon Marvin. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2009, 33(1): 193-215.
- [5] Thomas F H D. *Environment, Scarcity and Violence*. New Jersey: Princeton University Press, 1999: 4-58.
- [6] Mirian R L, Brian R S. *Environment and Security: Discourses and Practices*. New York: ST. Martin's Press, 2000: 101-228.
- [7] Anantha K D. *Ecological Security and Capabilities: A Conceptual Framework for Sustainable Development*. [2009-08-10] <http://www-3.unipv.it/deontica/sen/papers>.
- [8] Westing A H. Environmental security and its relation to ethiopia and Sudan. *AMBIO*, 1991, 20(5): 168-171.
- [9] Magno F A. Environmental security in the South China Sea. *Security Dialogue*, 1997, 28(1): 97-112.
- [10] Ma KM, Fu BJ, Li XY, Guan W B. The concept and theoretical basis of the regional pattern of ecological security. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 761-768.
- [11] Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 354-358.
- [12] Singh S. *Ecological Security: The Foundation of Sustainable Development*. New Delhi: Shipra Pub, 2007: 1-108.
- [13] Wang G, Wu W. Analysis on the Evolvement mechanism and course of regional ecological security. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(1): 16-21.
- [14] Shi X Q, Zhao J Z, Ouyang Z Y. Assessment of eco-security in the Knowledge Grid e-science environment. *The Journal of Systems and Software*, 2006, (79): 246-252.
- [15] Liu H, Wang H, Zhang X W. Research review on ecological security assessment. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1): 74-79.
- [16] Shi X Q, Zhao J Z, Ouyang Z Y. Urban eco-security and its dynamic assessment method. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3237-3243.
- [17] Alcamo J, Endejan M B, Kaspar F, Rosch F. The GLASS model: a strategy for quantifying global environmental security. *Environmental Science&Policy*, 2001, 4(1): 1-12.
- [18] Guo M, Xiao D N, Li X. Changes of landscape pattern between 1986 and 2000 in Jiuquan oasis, Heihe River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 457-466.
- [19] Zhang F T, Su W C, Zhou J X. Assessment of urban ecological security based on entropy-weighted gray correlation analysis. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1249-1254.
- [20] Cui S H, Hong H S, Huang Y F, Xue XZ. Progress of the ecological security research. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 861-868.
- [21] Wang G, Wu W. Design on early-warning system of water security of Liaohe River based on GIS. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47(2): 16-22.
- [22] Liu S Q, Chen G J, Chen Z J. Ecological and environmental warning on rural habitat ecosystem — A case study of group 5 of Cizhu Village in Wanxian City. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 295-311.
- [23] Shi M K, Peng Y, Li E D, Wen C H. Study on early warning of ecological security in ethnic agricultural regions of the upper reaches of the pearl river-an analysis on actual examples of 22 counties within the boundary of Guizhou. *China Population, Resources and Environment*, 2005, 15(6): 50-54.
- [24] Li H S, Xu R X, Gao Z G. Early warning of the quality of human settlements in scale of NanJing City. *Economic Geography*, 2005, 25(5): 658-611.
- [25] Pan J H, Feng Z D. Evaluation of eco-environmental fragility in middle reaches of heihe river using information entropy and matter-element model. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(1): 1-4.
- [26] Wang M Q, Wang J D, Liu J S, Dou J X. Evaluation of eco-environmental frangibility in West Jilin Province based on matter-element mode. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2): 291-295.
- [27] Zhang H B, Liu L M, Zhang J L, Zhu Z Q. Matter-element model and its application to land resource eco-security assessment. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 33(2): 222-229.
- [28] Xie H L, Zhang X S. Study on model of matter-element evaluation of city eco-security. *Geography and Geo-Information Science, China Population Resources and Environment*, 2004, 20(2): 88-90.
- [29] Yao Y, Zhu J F. Early-warning model of irregular flight management based on correlation function in extension theory. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2008, 43(1): 101-106.
- [30] Wang J G, Zhou Z F, Yuan Y S. Application of extension method to comprehensive assessment of environmental quality. *Journal of Hehai University*, 2002, 30(1): 15-18.
- [31] Jiang C, Tian S, Chen H R. Matter element model of multi factorial evaluation and its application to earthquake prediction. *Systems Engineering-Theory& Practice*, 1998, 18(1): 135-138.
- [32] Cai W. *Matter element Model and It's Application*. Beijing: Science and Technology Literature Publishing House, 1994, 8: 3-32.
- [33] Yang C Y, Cai W. *Extension Engineering*. Beijing: Science Press, 2007: 8: 2-56.

- [34] Hu B Q, Zhang X, Lu Z M. Research on assessment of building fire safety by improved extension assessment method, Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2003, 36(5): 79-84.
- [35] China Environment Yearbook Editorial Committee. China Environment Yearbook. Beijing: China Environmental Press, 1996-2007.
- [36] Shaanxi Provincial Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of Shaanxi. Beijing: China Statistics Press, 1996-2007.
- [37] Shaanxi Provincial Environmental Protection Agency. State of the Environment Bulletin, Shaanxi Province, [2009-08-10]. <http://www.snepb.gov.cn>.
- [38] Shaanxi Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources. Shaanxi Provincial Water Resources Bulletin [1996-2007]. <http://www.shxsw.com.cn/xxfw/Szygb.jsp>.
- [39] Shaanxi Provincial People's Government. National Economic and Social Development "Eleventh Five-Year Plan" of Shaanxi Province. [2009-08-10]. <http://www.shaanxi.gov.cn>.
- [40] Shaanxi Provincial People's Government. "Eleventh Five-Year" Special Plan for Environmental Protection, Shaanxi Province. [2009-08-10] <http://www.shaanxi.gov.cn>.
- [41] Shaanxi Provincial People's Government. "Eleventh Five-Year" Ecological Construction Planning, Shaanxi Province. [2009-08-10] <http://www.shaanxi.gov.cn>.
- [42] Ministry of Environment Protection of the People's Republic of China. National Environmental Protection "Eleventh Five-Year Plan". [2009-08-10] <http://www.zhb.gov.cn/plan/hjgh/sywh>.
- [43] Wu S Z, Wang J N. Assessment Report of National Environmental Security. Beijing: China Environmental Science Press, 2006: 8: 30-89.
- [44] Wang G, Wang L, Wu W. Recognition on regional ecological security definition and assessment system. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(4): 1627-1637.
- [45] Wang J N, Wu S Z. Assessment and Early-warning of Environmental Security. Beijing: Science Press, 2007: 1: 15-130.

参考文献:

- [1] 叶文虎,孔青春. 环境安全:21 世纪人类面临的根本问题. 中国人口、资源与环境, 2001, 11(3): 42-44.
- [2] 曲格平. 关注生态安全之一:生态环境问题已经成为国家安全的热门话题. 环境保护, 2002, 5(5): 3-5.
- [15] 刘红,王慧,张兴卫. 生态安全评价研究述评. 生态学杂志, 2006, 25(1): 74-79.
- [16] 施晓清,赵景柱,欧阳志云. 城市生态安全及其动态评价方法. 生态学报, 2005, 25(12): 3237-3243.
- [18] 郭明,肖笃宁,李新. 黑河流域酒泉绿洲景观生态安全格局分析. 生态学报, 2006, 26(2): 457-466.
- [19] 张凤太,苏维词,周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1249-1254.
- [20] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,薛雄志. 生态安全研究进展. 生态学报, 2005, 25(4): 861-868.
- [21] 王耕,吴伟. 基于 GIS 辽河流域水安全预警系统设计研究. 大连理工大学学报, 2007, 47(2): 16-22.
- [22] 刘邵权,陈国阶,陈治谏. 农村聚落生态环境预警——以万州区茨竹乡茨竹五组为例. 生态学报, 2001, 21(2): 295-311.
- [23] 石明奎,彭昱,李恩东,文传浩. 珠江上游少数民族农业区域生态安全预警研究——贵州境内 22 县实证分析. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(6): 50-54.
- [24] 李华生,徐瑞祥,高中贵. 南京城市人居环境质量预警研究. 经济地理, 2005, 25(5): 658-611.
- [25] 潘竟虎,冯兆东. 基于熵权物元可拓模型的黑河中游生态环境脆弱性评价. 生态与农村环境学报, 2008, 24(1): 1-4.
- [26] 王明全,王金达,刘景双,窦晶鑫. 基于物元模型的吉林省西部生态环境脆弱性评价. 生态学杂志, 2007, 26(2): 291-295.
- [27] 张虹波,刘黎明,张军连,朱战强. 区域土地资源生态安全评价的物元模型构建及应用. 浙江大学学报, 2007, 33(2): 222-229.
- [28] 谢花林,张新时. 城市生态安全水平的物元评判模型研究. 地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 88-90.
- [29] 姚韵,朱金福. 基于可拓关联函数的不正常航班管理预警模型. 西南交通大学学报, 2008, 43(1): 101-106.
- [30] 王锦国,周志芳,袁永生. 可拓评价方法在环境质量综合评价中的应用. 河海大学学报, 2002, 30(1): 15-18.
- [31] 蒋淳,田山,陈化然. 中强地震预报综合评判物元模型及其应用. 系统工程理论与实践, 1998, 18(1): 135-138.
- [32] 蔡文. 物元模型及其应用. 北京:科学技术文献出版社, 1994: 8: 3-32.
- [33] 杨春燕,蔡文. 可拓工程. 北京:科学出版社, 2007: 8: 2-56.
- [34] 胡宝清,张轩,卢兆明. 可拓评价方法的改进及其应用研究. 武汉大学学报, 2003, 36(5): 79-84.
- [35] 中国环境年鉴. 中国环境年鉴编辑委员会. 北京:中国环境出版社, 1996-2007.
- [36] 陕西省统计年鉴. 陕西省统计局. 北京:中国统计出版社, 1996-2007.
- [37] 陕西省环境保护厅,陕西省环境状况公报[1996-2007]. <http://www.snepb.gov.cn>.
- [38] 陕西省水文水资源局,陕西省水资源公报[1996-2007]. <http://www.shxsw.com.cn/xxfw/Szygb.jsp>.
- [39] 陕西省人民政府,陕西省国民经济和社会发展“十一五”规划. <http://www.shaanxi.gov.cn>.
- [40] 陕西省人民政府,陕西省“十一五”环境保护专项规划. <http://www.shaanxi.gov.cn>.
- [41] 陕西省人民政府,陕西省“十一五”生态建设专项规划. <http://www.shaanxi.gov.cn>.
- [42] 中华人民共和国环境保护部,国家环境保护“十一五”规划. <http://www.zhb.gov.cn/plan/hjgh/sywh/>.
- [43] 吴舜泽,王金南. 国家环境安全评估报告. 北京:中国环境科学出版社, 2006, 8: 30-89.
- [44] 王耕,王利,吴伟. 区域生态安全概念及评价体系的再认识. 生态学报, 2007, 27(4): 1627-1637.
- [45] 王金南,吴舜泽. 环境安全管理评估与预警. 北京:科学出版社, 2007: 1: 15-130.