

DOI: 10.5846/stxb201309042205

赵宏波, 马延吉. 基于变权-物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究——以吉林省为例. 生态学报, 2014, 34(16): 4720-4733.

Zhao H B, Ma Y J. Study on early-warning model based on variable weight-matter element analysis for ecological security in old industrial bases: a case study of Jilin Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4720-4733.

基于变权-物元分析模型的老工业基地 区域生态安全动态预警研究 ——以吉林省为例

赵宏波^{1, 2}, 马延吉^{1, *}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:生态安全预警是生态安全研究的重要内容,对维护区域生态安全具有重要的意义。老工业基地区域生态安全预警研究具有一定的特殊性和典型性,选取吉林省为研究区,基于压力、状态、响应(P-S-R)和生态、环境、经济、社会(E-E-E-S)框架模型构建生态安全预警指标体系,运用变权-物元分析模型对1991—2011年吉林省区域生态安全的预警等级进行了测度,并结合灰色系统GM(1,1)预测模型对2015年、2020年区域生态安全态势进行预测预警。研究表明:(1)1991—2011年,吉林省生态安全总体水平呈逐步上升的趋势,区域生态安全预警等级从“巨警”上升为“轻警”,指示灯由“红色预警”逐步变为“蓝色预警”;(2)2015年,吉林省的生态安全预警等级属于“轻警”,指示灯为“蓝色预警”,到2020年,吉林省的生态安全预警等级属于“无警”,指示灯为“绿色预警”,但具有向“轻警”变化的态势;(3)制约吉林省生态安全水平提升的主要因素包括单位面积耕地化肥负荷量、城镇化、人均水资源量、GDP增长率、第一产业占GDP比重等,这些因素应是今后生态环境保护调控的重点,本研究为吉林省经济-生态-社会可持续发展提供参考。

关键词:变权理论;物元模型;区域生态安全预警;吉林省

Study on early-warning model based on variable weight-matter element analysis for ecological security in old industrial bases: a case study of Jilin Province

ZHAO Hongbo^{1,2}, MA Yanji^{1, *}

1 Northeast Institute of Geography and Agro-ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: At present, China is actively promoting the ecological civilization construction and the ecological security is an important part of ecological civilization construction. Early-warning is a key content of ecological security research, which can make an evaluation, prediction and alarm for the changes of the regional ecological environment quality and social economy coordinated development. It also has a significant meaning in maintain the regional ecological security. Early-warning of ecological security research for old industrial bases has a certain particularity and typicality. This paper selected Jilin Province as the study region; constructed an ecological security early-warning index system by employing the “Pressure-State-Response” (PSR) and “Ecology-Environment-Economy-Society” (EEES) model. Then we used the variable weight and matter element analysis model to estimate the early-warning level of ecological security of Jilin Province from 1991 to 2011. At last the grey system GM (1,1) model was used to predict the regional ecological security trend of Jilin

基金项目:国家自然科学基金项目(41371135);吉林省科技引导计划软科学项目(20120635);中国科学院知识创新工程重要方向项目课题(KZCX2-YW-342-2)

收稿日期:2013-09-04; 网络出版日期:2014-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mayanji@neigae.ac.cn

Province in 2015 and 2020. The results indicated that: (1) The overall level of ecological security showed an upward trend in Jilin Province in 1991—2011, the warning degree rose from “huge alarm” to “light alarm” and the indicator lamp turned from red lamp to blue lamp; (2) In 2015, the warning degree will be “light alarm” and the indicator lamp will be blue. In 2020, the warning degree of Jilin Province will be “no alarm” and the indicator lamp will be green. But it has the trend of turning into “light alarm”; (3) The main factors that restrict the improvement of ecological security of Jilin Province include Consumption of chemical fertilizer per hectare cultivated land, Urbanization, Per capital water resources, GDP growth rate and Primary industry production per GDP, Which are the focus of ecological environment protection in the future. This study will provide a reference to achieve economy-ecology-society sustainable developing of Jilin Province. So, we may take some necessary measures to guide rationally consumption of chemical fertilizers; to improve agricultural production technique and adjust agricultural structure further; to follow a new path of industrialization and reduce the energy consumption; to change economic growth patterns and promote a energy-saving and emission reduction; to accelerate development of green economy and circular economy; to save water and promote water-saving technological in key industrial areas; to control water pollution in key basins, and at last to realize coordinated development between industrialization, urbanization, agricultural modernization and ecological environment protection. The forewarning model of regional ecological security that used in this study combined variable weight theory with matter element analysis. It not only reflects the role of factors changing in the regional ecological security early-warning, meanwhile, it can analyze the alert-situation on the single factor and pay more attention on the adverse factors that affected the ecological security. It can also integrate the evaluation results of single factors estimate and alarm the ecological security of the whole region and realize the function of regional ecological security early-warning more preferable.

Key Words: variable weight theory; matter element analysis; early-warning of ecological security; Jilin Province

生态安全是生态文明建设的重要组成部分。生态安全与国防安全、经济安全同等重要,都是国家安全的重要基石^[1-2],它是指一定尺度上气候、水、空气、土壤等环境和生态系统的完整性和健康水平,是人类开发自然资源的规模和阈限,由自然-经济-社会组成的一个复合人工生态安全系统^[3]。对生态安全的研究是生态学、环境科学、地学等相关学科的前沿课题和主要领域^[4]。生态安全预警是生态安全研究的重要内容之一,是指运用相关预警方法和模型对区域资源开发利用的生态后果,区域生态环境质量的变化以及生态环境与社会经济协调发展的评价、预测和警报^[5],以预防和控制影响区域生态系统正常运行的不安全因素。研究区域生态安全预警对区域生态安全的维护具有重要的意义和作用,并已成为国内外有关学者研究的热点课题。国外学者的相关研究主要从生态风险、生态系统的健康评价^[6-8]、环境冲突预警^[9-10]、环境预警服务^[11]、自然灾害预警^[12-15]等方面展开。国内学者主要侧重区域生态安全预警的理论探讨^[16]、预警系统的开发与设计^[17]以及对土地生态系统^[18]、农业生态系统^[19]、流域生态

系统^[20]、生态经济区^[21]等的实证研究,在预警方法方面,主要有综合指数法^[22]、BP 神经网络法^[23]、径向基函数模型(RBF)^[24]、能值分析^[25]、系统动力学^[26]等。区域生态安全预警的研究已取得一些成果,但仍处于探索阶段,研究的区域与内容上,对正在振兴的东北老工业基地这一典型区域的生态安全预警研究相对较少,研究方法上,成熟的预警方法不多,一些方法存在对生态安全变化的预测、预警准确性不高等问题^[27]。

生态安全预警评价研究中权重的确定大多采用层次分析法、特尔斐法、熵值法等常权权重方法,这种方法不能反映生态安全预警的及时性与动态性,变权方法则有助于解决常权方法中的缺陷,使得因素的权重根据因素状态值的变化而变化,能够更好地体现相应因素在决策中的作用^[28]。物元分析通过关联函数分析决策对象各子系统间的矛盾性,是解决现实世界中的矛盾与不相容问题的有力工具^[29],区域生态安全预警评价是一个多指标决策过程,存在单项指标评价结果的不相容性问题^[30]。因此,可以运用物元分析模型来研究区域生态安全的

预警状况,与其他方法相比,物元分析模型克服了无法识别单指标、总体与评价等级之间的隶属程度,遗漏指标之间以及评价结果中间状态转化过程等信息的缺陷^[31-32],能够综合各种因素的全部信息,并极大地拓展研究范围,揭示了更多的分异信息;它可以对安全等级、预警对象进行形式化的描述,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,表征复杂系统的动态变化过程,实现动态安全预警,提高了预警等级判定的客观性和科学性^[33-34]。

东北地区是我国重要老工业基地之一,为社会主义经济的建设与发展做出了重大贡献。然而建国初期的东北地区是资源依赖型的工业化,多年来对资源的过度开采,使得东北地区大部分资源已经处于萎缩状态,区域可持续发展的资源保障程度降低,长期以资源消耗、环境损害为代价的粗放式经济增长模式已经对东北地区的生态安全造成了破坏^[35]。2003 年实施振兴东北老工业基地战略以来,地区经济发展迅速的同时,污染物排放总量呈增大趋势,土壤污染、水体富营养化等环境问题突出,虽然不断加大对环境污染的防治力度,但生态环境污染风险依然很大,环境保护的形势比较严峻。首先,本文基于压力-状态-响应(P-S-R)和生态-环境-经济-社会(E-E-E-S)相融合的框架模型构建区域生态安全预警指标体系,然后,尝试将变权模型与物元分析模型相结合,建立变权-物元分析模型的区域生态安全预警模型,最后,以吉林省为例,评价 1991—2011 年吉林省区域生态安全的警度等级,并结合灰色 GM(1,1) 预测模型对 2015 年、2020 年区域生态安全态势进行预测预警,旨在对区域生态安全预警方法作一种尝试,为吉林省生态环境的保护和社会经济的可持续发展提供参考。

1 研究方法

1.1 变权理论模型

1.1.1 指标标准化

借鉴功效系数法原理对区域生态安全预警指标进行标准化处理^[28],对于正向指标,即越大越优型指标采用公式(1)和对于负向指标,即越小越优型指标采用公式(2)分别进行标准化:

$$V_i = \begin{cases} 1 - \frac{M_j}{v_j} \times 0.15 & v_j \geq M_j \\ \frac{v_j}{M_j} \times 0.85 & 0 < v_j < M_j \end{cases} \quad (1)$$

$$V_i = \begin{cases} 1 - \frac{v_i}{M_i} \times 0.15 & 0 < v_i \leq M_i \\ \frac{M_i}{v_i} \times 0.85 & M_i < v_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, V_i 为标准化值, v_i 为指标实际值, M_i 为预警指标实际值有警与无警的临界值,即否定水平。

1.1.2 常权权重的确定

为了尽可能客观的反映各指标的情况,采用熵值法^[36]确定常权权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_j)$ 。

1.1.3 惩罚型变权权重的确定

根据前人研究的成果^[37-38-39],变权向量 $W(V) = (w_1(V), w_2(V), \dots, w_m(V))$ 可表示为常权向量 W 和状态变权向量 $S(V)$ 的归一化的 Hadamard 乘积;且状态变权向量 $S(V)$ 是均衡函数的梯度向量,基于惩罚型变权的区域生态安全预警权重公式如下:

$$W(V) = \frac{(w_1 S_1(V), w_2 S_2(V), \dots, w_m S_m(V))}{\sum_{j=1}^m w_j S_j(V)} = \frac{w_j S(V)}{\sum_{j=1}^m w_j S_j(V)} \quad (3)$$

根据区域生态安全的警情特点并借鉴已有的研究^[28],将惩罚型状态变权向量构造如下:

$$S_j(V) = \begin{cases} e^{-a(V_j - \beta)} & V_j \leq \beta \\ 1 & V_j > \beta \end{cases} \quad (4)$$

式中, β 为预警指标标准化后有警与无警的临界线,引进模糊数学的隶属度概念,将警戒阈值的确定转化为相应隶属度的确定和划分^[40-41]。当预警指标 v_i 为正向指标时,且 v_a 为相应指标的最优值, v_b 为预警指标的下极限值,则警度 N_i 为:

$$N_i = \begin{cases} 1 & v_i = v_a \\ \frac{v_i - v_b}{v_a - v_b} & v_b < v_i < v_a \\ 0 & v_i = v_b \end{cases} \quad (5)$$

当预警指标 v_i 为负向指标时,且 v_a 为相应指标的最优值, v_b 为预警指标的下极限值,则警度 N_i 为:

$$N_i = \begin{cases} 1 & v_i = v_b \\ \frac{v_a - v_i}{v_a - v_b} & v_b < v_i < v_a \\ 0 & v_i = v_a \end{cases} \quad (6)$$

经计算,如果 $N_i \geq 0.85$,则可判断预警对象无警,即有警与无警临界线 β 值为 0.85。

当 $0 \leq V_j \leq \beta$ 时, V_j 对应的权重增大,而 V_j 的值小,因而加权和变小,达到对第 j 个因素惩罚目的;当 $\beta < V_j \leq 1$ 时,对第 j 个指标主观不进行惩罚。 a 为惩罚因子,参考有关文献^[28]确定为 0.81547。

1.2 物元分析方法及生态安全预警模型

参考物元分析理论与方法^[33,42-43],由区域生态安全等级 N ,生态安全特征 c 和特征量值 v 共同构成生态安全物元 $R = (N, c, v)$,物元分析模型的主要步骤为:(1)确定生态安全物元。(2)确定生态安全的经典域、节域和预警对象。(3)确定关联函数和关联度。

$$K_j(v_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, V_{ij})}{|V_{ij}|}, & v_i \in V_{ij} \\ \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{\rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij})} & v_i \notin V_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $K_j(v_i)$ 为各安全因子关于安全等级的关联度。

$$\begin{cases} \rho(v_i, V_{ij}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \\ \rho(v_i, V_{ip}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{ip} + b_{ip}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ip} - a_{ip}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\rho(v_i, V_{ij})$ 为点 v_i 与有限区间 $V_{ij} = (a_{ij}, b_{ij})$ 的距离; $\rho(v_i, V_{ip})$ 为点 v_i 与有限区间 $V_{ip} = (a_{ip}, b_{ip})$ 的距离;其中 v_i 为评价因子的实际数值, $V_{ij} = (a_{ij}, b_{ij})$ 为经典域, $\rho(v_i, V_{ip})$ 为节域。

(4) 预警对象 R_0 关于安全等级 j 的综合关联度为:

$$K_j(R_0) = \sum_{i=1}^n W(V) K_j(v_i) \quad (9)$$

式中, $W(V)$ 为各指标的变权权重, $K_j(v_i)$ 为各安全因子关于安全等级的关联度。

1.3 预测分析-灰色系统的 GM(1,1) 模型

GM(1,1) 模型是采用灰色系统理论中最常用的一种数列预测方法,运用 GM(1,1) 模型对区域生态

安全未来警度的变化趋势进行预测,具体建模步骤参考文献^[44-45],并进行精度检验,当后验比 $c < 0.35$ 和小误差概率 $P > 0.95$ 时,模型可以对区域生态安全进行预测。

2 吉林省生态安全预警分析

2.1 研究区概况

吉林省位于中国东北地区的中部,全省面积 $18.74 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国的 1.95%, 是我国重要的工业基地和商品粮生产基地,吉林省地势呈东南向西北逐渐递降趋势,形成东部山地、丘陵,中部台地,西部平原的地形,吉林省生态环境具有较好的基础条件,总体生态环境呈特殊的多样性和相对的整体性,而且可恢复性和保护程度较好。从生态区域分布看,由东向西自然形成东部长白山地原始森林生态区、中东部低山丘陵次生植被生态区、中部松辽平原生态区和西部草原湿地四个生态区。1999 年,国家批准吉林省为生态建设试点省,2001 年开始实施《吉林省生态省建设总体规划纲要》,通过农田防护林建设工程,向海、莫莫格湿地保护区补水工程等措施,对吉林省生态环境的保护取得初步成效。但是,吉林省人均水资源占有量为 1520 m^3 , 是我国人均水资源量的 68.5% 左右,世界的 1/5, 属于水资源贫乏的省份,全省在城市化与工业化的快速发展中,生态环境也存在一些问题,主要是耕地质量下降,水土流失严重,草地沙化、碱化及退化问题,农业面源污染严重,辽河流域、松花江流域部分支流环境污染严重等,因此,研究吉林省生态安全预警对其推进生态省建设,环境保护与社会经济的可持续发展具有重要的意义。

2.2 数据来源

研究数据主要来源于:《吉林省统计年鉴》(1990—2012 年)、《吉林省环境质量报告书》(1991—2011 年)、《中国农村统计年鉴》(1990—2012 年)、《中国统计年鉴》(1990—2012 年)、《吉林省国民经济和社会发展“十二五”规划》、《吉林省生态省建设总体规划纲要》等。

2.3 预警指标体系的构建

2.3.1 构建原理

区域生态安全系统是一个受人口、资源、环境、经济和社会等多方面因素的共同作用复合系统,其

预警指标的选取不仅需要结合区域生态安全的特征,还能反映出对区域生态安全具有潜在影响的重要因素和人类活动的影响^[46]。联合国经济合作开发署 20 世纪 80 年代提出的压力-状态-响应 (Pressure-State-Response) 框架模型^[47],从人类与生态环境的相互作用与影响出发,对生态环境指标进行组织,具有较强的系统性^[48]。本文对 P-S-R 模型进行改进,将 P-S-R 模型与生态-环境-经济-社会 (Ecology-Environment-Economy-Society) 模型相结合,强调生态、环境、经济、社会四个方面都具有压力、状态和响应三个方面的表征,更清晰地反映出人类活动和经济社会发展对生态环境系统的影响,同时,也体现出生态环境系统对人类活动和经济社会发展的反馈作用,有利于表达出生态、环境、经济和社会之间的相互关系,更好地从动态的角度,全面客观地诠释生态安全的演变过程,满足对区域生态安全预警的要求(图 1)。

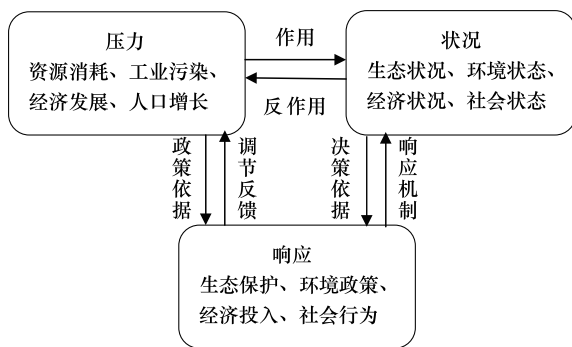


图 1 基于 PSR-EEES 模型的生态安全预警运行机制

Fig. 1 Operation mechanism of ecological security early-warning based on PSR-EEES model

2.3.2 指标选取

基于 PSR-EEES 框架模型原理,本文对影响吉林省区域生态安全的相关指标运用因子分析法进行统计分析。根据主成分个数累计方程超过 80% 的原则,经因子载荷矩阵旋转后选择载荷值大于 0.8 的指标作为下一步待筛选指标^[49]。由于各预警指标之间可能存在相关性和重复性,采用 SPSS 的 Pearson 的相关性分析方法对指标间的相关性进行分析处理,依据统计学分析与主观判断相结合原则^[50],指标选取的科学性、实用性和可操作性等原则,并参考相关研究成果^[21,34,43],结合研究区的实际,最终选取重要的 45 个指标作为预警评价指标(表 1)。

通过构建的 P-S-R 模型与 E-E-E-S 模型相结合的生态安全预警指标体系可知,压力(P)指人类经济社会活动引起的对生态环境的负荷作用,是影响生态安全变化的原因,选取能源消耗、工业污染排放、GDP 的增长率、人口增长等因素从生态压力、环境压力、经济压力、社会压力 4 方面进行构建。状态(S)指在压力作用下,生态系统、环境质量及社会经济所处的状况或者趋势,选取森林覆盖率、空气质量综合指数、产业占 GDP 的比重、失业率等因素从生态状况、环境状况、经济状况、社会状况 4 方面进行构建。响应(R)指面临生态环境所处的压力和状况,为了保护区域生态安全,规避可能存在的生态风险,人们采取技术、经济、制度等措施保障区域生态安全,促进生态环境的可持续发展,具有动态变化性,选取水土流失治理面积比例、工业污染治理率、环保投入比重等因素从生态响应、环境响应、经济响应、社会响应 4 方面进行构建。

表 1 吉林省生态安全预警指标体系

Table 1 Early-warning index system of ecological security in Jilin Province

				巨警 I	重警 II	中警 III	轻警 IV	无警 V
				Huge alarm	Heavy alarm	Moderate alarm	Light alarm	No alarm
				(红色)	(橙色)	(黄色)	(蓝色)	(绿色)
				Red	Orange	Yellow	Blue	Green
区域生态安全预警 (E)	生态安全	生态压力	人均耕地面积 $C_1(10^4\text{m}^2/\text{人})$	[0.053—0.16]	[0.16—0.20]	[0.2—0.21]	[0.21—0.23]	[0.23—0.26]
			人均水资源量 $C_2(\text{m}^3/\text{人})$	[1140—1181]	[1181—1305]	[1305—1494]	[1494—2503]	[2503—2550]
			单位 GDP 能耗 $C_3(\text{t 标准煤})$	(6.48—7.71]	(4.29—6.48]	(2.59—4.29]	(1.45—2.59]	(0—1.45]
			城市人均日生活用水 $C_4(\text{L})$	(141.82—152.41]	(131—141.82]	(121.26—131]	(113—121.26]	(100—113]
	环境压力	(J)	单位耕地面积化肥负荷 $C_5(\text{L})$	(850—1200]	(630—850]	(450—630]	(225—450]	(1—225]
			单位耕地面积农药负荷 $C_6(\text{kg}/10^4\text{m}^2)$	(15—20]	(10—15]	(6—10]	(3—6]	(0—3]
			万元 GDP 工业废水排放强度 $C_7(\text{t}/10^4\text{元})$	(90—120]	(60—90]	(30—60]	(10—30]	(0—10]

续表

			巨警 I Huge alarm (红色) Red	重警 II Heavy alarm (橙色) Orange	中警 III Moderate alarm (黄色) Yellow	轻警 IV Light alarm (蓝色) Blue	无警 V No alarm (绿色) Green
		万元 GDP 工业固体废弃物排放强度 C_8 (10^4 元)	(2—4]	(1—2]	(0.1—1]	(0.05—0.1]	(0—0.05]
	经济压力	GDP 增长率 C_9 (%)	(30—40]	(20—30]	(12—20]	(7—12]	(0—7]
	(K)	经济密度 C_{10} (10^4 元/ km^2)	[1—55]	[55—105]	[105—200]	[200—300]	[300—600]
		人均 GDP C_{11} (元)	[1000—6000]	[6000—10000]	[10000—20000]	[20000—30000]	[30000—80000]
	社会压力	人口密度 C_{12} (人/ km^2)	(500—800]	(350—500]	(150—500]	(80—150]	(1—80]
	(L)	人口自然增长率 C_{13} (‰)	(5—8]	(3—5]	(2—3]	(1—2]	(0.7—1]
		城镇化水平比重 C_{14} (%)	(70—80]	(55—70]	(40—55]	(30—40]	(15—30]
生态安全	生态状态	生物丰度指数 C_{15} (%)	[15—35]	[35—55]	[55—75]	[75—80]	[80—100]
状态(G)	(M)	土地垦殖率 C_{16} (%)	[5—13.55]	[13.55—20]	[20—28.74]	[28.74—37]	[37—50]
		森林覆盖率 C_{17} (%)	[5—10]	[10—30]	[30—40]	[40—50]	[50—60]
		人类干扰指数 ^[51] C_{18} (%)	(60—100]	(45—60]	(30—45]	(15—30]	(0—15]
	环境状态	自然灾害受灾面积比例 C_{19} (%)	(60—100]	(40—60]	(5—40]	(1—5]	(0—1]
	(N)	空气质量综合指数 C_{20}	(3.9—5]	(2.9—3.9]	(1.9—2.9]	(1—1.9]	(0.5—1]
		水土协调度 C_{21} (%)	[1—15]	[15—30]	[30—45]	[45—60]	[60—85]
		城市区域环境噪声等级 C_{22} (dB(A))	(65—100]	(60—65]	(55—60]	(50—55]	(0—50]
	经济状态	第一产业占 GDP 比重 C_{23} (%)	[1—10]	[10—15]	[15—20]	[25—30]	[30—50]
	(O)	第二产业占 GDP 比重 C_{24} (%)	[1—35]	[35—40]	[40—45]	[45—50]	[50—60]
		农民人均纯收入 C_{25} (元)	[0—2000]	[2000—3000]	[3000—5000]	[5000—10000]	[10000—17000]
		城镇居民人均可支配收入 C_{26} (元)	[0—3000]	[3000—8000]	[8000—15000]	[15000—25000]	[25000—35000]
	社会状态	城镇登记失业率 C_{27} (%)	(4.5—5]	(4—4.5]	(3—4]	(3—2]	(1—2]
	(P)	人均粮食产量 C_{28} (kg/人)	[400—600]	[600—800]	[800—1000]	[1000—1200]	[1200—1400]
		单位耕地粮食产量 C_{29} (kg/ 10^4m^2)	[4000—4500]	[4500—5500]	[5500—6500]	[6500—7500]	[7500—8000]
		农业机械化水平 C_{30} (kw/ 10^4m^2)	[0—1]	[1—2]	[2—2.5]	[2.5—3]	[3—3.5]
生态安全	生态响应	人均公共绿地面积 C_{31} (m^2 /人)	[3—5]	[5—6]	[6—8]	[8—10]	[10—12]
响应(H)	(Q)	建成区绿化覆盖率 C_{32} (%)	[10—15]	[15—25]	[25—30]	[30—35]	[35—60]
		自然保护区占国土面积比例 C_{33} (%)	[5—8]	[8—10]	[10—15]	[15—20]	[20—25]
		水土流失治理面积比例 C_{34} (%)	[0—5]	[5—10]	[10—15]	[15—20]	[20—25]
	环境响应	工业固体废物利用率 C_{35} (%)	[0—40]	[40—50]	[50—60]	[60—70]	[70—80]
	(R)	工业废水达标排放率 C_{36} (%)	[0—50]	[50—66]	[66—80]	[80—90]	[90—100]
		污水集中处理率 C_{37} (%)	[35—45]	[45—55]	[55—65]	[65—75]	[75—85]
		生活垃圾无害化处理率 C_{38} (%)	[20—40]	[40—50]	[50—60]	[60—80]	[80—100]
	经济响应	环保投资额占 GDP 比重 C_{39} (%)	[0—0.1]	[0.1—0.2]	[0.2—0.4]	[0.4—1]	[1—1.6]
	(S)	第三产业占 GDP 比重 C_{40} (%)	[10—20]	[20—30]	[30—36]	[36—40]	[40—45]
		(R&D)支出占 GDP 比重 C_{41} (%)	[0.5—0.8]	[0.8—0.91]	[0.91—1.01]	[1.01—1.2]	[1.2—2.2]
	社会响应	专业技术人员 C_{42} (10^4 人)	[30—70]	[70—90]	[90—95]	[95—105]	[105—150]
	(T)	机耕程度 C_{43} (%)	[0—35]	[35—45]	[45—65]	[65—85]	[85—100]

续表

	巨警 I Huge alarm (红色) Red	重警 II Heavy alarm (橙色) Orange	中警 III Moderate alarm (黄色) Yellow	轻警 IV Light alarm (蓝色) Blue	无警 V No alarm (绿色) Green
从业人员比重 C_{44} (%)	[35—40)	[40—45)	[45—50)	[50—55)	[55—65)
每万人大学生人数 C_{45} (人)	[30—100)	[100—200)	[200—250)	[250—300)	[300—350)

A; Object layer; B; System layer; C; Type layer; D; Index layer; E; Regional ecological security Early-warning; F; Ecological security pressure; G; Ecological security state; H; Ecological security response; I; Ecological pressure; J; Environmental pressure; K; Economic pressure; L; Societal pressure; M; Ecological state; N; Environmental state; O; Economic state; P; Societal state; Q; Ecological response; R; Environmental response; S; Economic response; T; Societal response

2.4 警度的确定

经典域的确定主要依据以下几点原则^[52]进行:
(1) 凡已有国家标准的或国际标准的指标,尽量采用规定的标准值,比如国家环境保护总局《生态县、生态市、生态省建设指标(试行)》标准值、国际通行标准取值、《吉林省生态省建设总体规划纲要》与《吉林省生态环境保护规划》的标准值;(2) 参考国内或研究区的现状值,作为趋势外推,确定标准值;如参照相关指标的全国平均水平以及研究区的经济社会发展平均水平;(3) 依据现有的环境与社会、经济协调发展的理论,力求定量化作为标准值;依据以上原

则,并运用 SPSS 中的聚类分析工具对各指标进行聚类分析,以便确定各个指标经典域的区间,经典域的取值范围见表 1。

依据区域生态安全的可拓性,运用上述的相对隶属度法,参照国家生态安全评估体系研究成果以及相关研究^[21,23-24,26,53-54],得到区域生态安全预警等级划分标准(表 2),将警度划分为 5 个等级,即 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 ,由劣到优描述为:巨警(Ⅰ级)、重警(Ⅱ级)、中警(Ⅲ级)、轻警(Ⅳ级)、无警(Ⅴ级),对应的指示灯为红色、橙色、黄色、蓝色、绿色。

表 2 区域生态安全预警等级划分标准
Table 2 Criterion of regional ecological security early-warning classification

警度 Warning degree	生态安全警情特征 Characteristic of ecological security	指示灯 Indicator lamp
巨警(Ⅰ级) Huge alarm	区域生态环境受到严重破坏,生态环境系统脆弱,结构破碎,服务功能严重退化,生态恢复与重建很困难,资源消耗过度,环境污染严重,社会经济发展水平落后,难以实现人口、资源和环境的协调发展。	红色
重警(Ⅱ级) Heavy alarm	区域生态环境受到较大破坏,生态环境系统比较脆弱,结构破坏较大,服务功能较大退化,生态系统的恢复与重建比较困难,资源消耗与环境污染比较严重,社会经济发展水平相对落后,阻碍了人口、资源和环境的协调发展。	橙色
中警(Ⅲ级) Moderate alarm	区域生态环境受到一定程度的破坏,生态环境系统相对脆弱,结构已开始被破坏,服务功能已有退化,但尚能维持基本功能,生态系统受干扰后易恶化,资源消耗与环境污染较为明显,对社会经济发展产生一定影响。	黄色
轻警(Ⅳ级) Light alarm	区域生态环境较少受到破坏,生态系统结构基本完善,服务功能良好,生态系统一般干扰后可恢复,资源消耗与环境污染不明显,社会经济发展水平较高,环境管理响应程度高,人口、资源和环境的基本协调发展。	蓝色
无警(Ⅴ级) No alarm	区域生态环境基本未受干扰破坏,生态系统结构完整,服务功能完善,系统恢复再生能力强,具有较强的抵御和恢复能力,资源充足,社会经济发展水平高,社会经济政策能有效地保护资源和环境,实现人口、资源和环境的协调发展。	绿色

3 结果与分析

3.1 物元分析

首先,运用上述指标标准化公式(1)、公式(2)与变权权重公式(3)、公式(4),以 1991—2011 年各

指标数据为对象,得到吉林省区域生态安全预警指标的变权权重;然后,将预警指标输入关联函数计算 1991—2011 年吉林省区域生态安全预警指标的对不同预警级别的关联度;最后,利用公式(9)和指标变权权重系数计算 1991—2011 年对不同预警级别的

综合安全关联度 $K_j(R_0)$, 并判定区域生态安全的预警等级。

按照国家五年计划的“八五”计划、“九五”计划、“十五”计划、“十一五”计划、“十二五”计划的起始年份为时间节点, 对压力系统、状态系统、响应系统的生态安全预警状况进行分析, 以利于对生态安全变化状况进行比较。

3.1.1 压力系统生态安全预警状况分析

由压力系统单个指标的物元分析结果可知(表3), 压力系统中, 单位 GDP 能耗、单位面积耕地化肥负荷量、万元 GDP 工业废水排放强度、经济密度、人均 GDP 等因素影响较大。单位 GDP 能耗、万元 GDP 工业废水排放强度、经济密度、人均 GDP 等因素 1991—2011 年间预警等级呈现不同等级的上升的态势, 说明其对缓解吉林省生态安全压力方面具

有一定促进作用。单位 GDP 能耗从 1991 年的 7.70 t 标准煤降低到 2011 年的 0.92 t 标准煤, 表明吉林省通过相关措施在节约利用能源、提高能源利用率取得一定成效。经济密度从 1991 年的 24.78×10^4 元/ km^2 提高到 2011 年的 565.18×10^4 元/ km^2 , 人均 GDP 从 1991 年的 1878 元增加到 2011 年的 38460 元, 表明土地利用的产出效益日益增加, 社会经济发展水平不断提升。单位面积耕地化肥负荷量、城镇化、人均水资源量、GDP 增长率等方面在 1991—2011 年间预警等级呈现不同等级的下降的态势, 说明其对减少吉林省生态安全的压力具有一定制约作用。吉林省要在降低耕地化肥的投入水平、提高农业生产技术, 合理推进城镇化, 适度发展经济, 节约利用水资源等方面更加的重视。

表 3 1991—2011 年吉林省生态安全预警压力指标关联度与等级

Table 3 The pressure index correlation and classification of ecological security in Jilin Province from 1991 to 2011

关联度 Correlation	压力指标 Pressure index					1991	1995	1996	2000	2001	2005	2006	2010	2011
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5									
$K_j(C_1)$	-0.001	0.002	-0.285	-0.333	-0.412	II	I	I	I	I	III	IV	V	V
$K_j(C_2)$	-0.338	0.343	-0.494	-0.764	-0.939	II	II	III	IV	IV	IV	II	V	I
$K_j(C_3)$	0.001	-0.996	-0.997	-0.998	-0.999	I	III	III	IV	IV	IV	V	V	V
$K_j(C_4)$	-0.534	-0.362	-0.083	0.213	-0.25	IV	III	I	I	II	II	II	IV	IV
$K_j(C_5)$	-0.279	0	0.001	-0.24	-0.415	III	II	II	II	II	II	II	II	II
$K_j(C_6)$	-0.867	-0.800	-0.667	-0.333	0.334	V	V	IV	IV	III	IV	III	III	III
$K_j(C_7)$	0.020	-0.979	-0.989	-0.993	-0.995	I	III	III	IV	IV	IV	V	V	V
$K_j(C_8)$	0.273	-0.727	-0.818	-0.860	-0.862	I	II	II	III	III	III	III	III	III
$K_j(C_9)$	-0.701	-0.551	-0.252	0.396	-0.181	IV	II	III	III	IV	III	III	III	II
$K_j(C_{10})$	0.439	-0.561	-0.772	-0.881	-0.921	I	II	II	II	III	III	IV	V	V
$K_j(C_{11})$	0.176	-0.824	-0.902	-0.954	-0.969	I	I	I	II	II	III	III	V	V
$K_j(C_{12})$	-0.739	-0.627	-0.126	0.268	-0.282	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
$K_j(C_{13})$	0.310	-0.69	-0.814	-0.845	-0.867	I	I	I	II	II	III	III	III	IV
$K_j(C_{14})$	-0.558	-0.393	-0.028	0.07	-0.277	IV	III	III	III	III	III	III	III	III

3.1.2 状态系统生态安全预警状况分析

由状态系统单个指标的物元分析结果可知(表4), 受压力系统的影响, 状态系统中, 森林覆盖率、自然灾害受灾面积比重、农民人均纯收入、城镇居民可支配收入、农业机械化水平等方面在 1991—2011 年间预警等级呈不同等级的上升趋势, 表明这些因素对生态安全状态的提高具有一定的贡献性。通过积极的人工造林、“三北”防护林建设等措施, 使得森林覆盖率从 1991 年的 37.91% 增加到 2011 年的 43.7%。自然灾害受灾面积比重的预警等级提高的

幅度较小, 说明洪涝、旱灾等自然灾害对吉林省生态安全状况的影响仍然较大, 加强防灾减灾能力建设, 减轻其对区域生态安全的影响依然不容忽视。农民人均纯收入从 1991 年的 748.33 元增加到 2011 年的 7509 元, 城镇居民人均可支配收入从 1991 年的 1395.36 元增加到 2011 年的 17796.57 元, 收入水平的提高有利于人们对生态环境保护的注重和投入, 有利于生态安全水平的提高。人类干扰指数、第一产业占 GDP 的比重、城镇登记失业率等在 1991—2011 年间预警等级呈不同等级的下降趋势, 成为制

约吉林省生态安全状态水平提升的因素。近年来,吉林省老工业基地振兴取得一定成效,社会经济得到快速发展,城镇化水平不断提高,但是也出现建设用地面积大量扩张、耕地质量下降等问题,导致人地关系越来越紧张,经济发展与环境保护的矛盾也日

益尖锐。吉林省作为国家重要的粮食主产区和商品粮生产基地,第一产业在国内生产总值中的比重仍然偏高,农业的产业结构需要进一步优化与调整,这样对区域生态安全也造成一定影响。

表 4 1991—2011 年吉林省生态安全预警状态指标关联度与等级

Table 4 The state index correlation and classification of ecological security in Jilin Province from 1991 to 2011

关联度 Correlation	状态指标 state index					1991	1995	1996	2000	2001	2005	2006	2010	2011
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5									
$K_j(C_{15})$	-0.607	-0.435	0.022	-0.017	-0.176	III	III	IV	IV	IV	IV	IV	III	III
$K_j(C_{16})$	-0.318	-0.059	0.116	-0.325	-0.499	III	III	III	III	III	IV	IV	IV	IV
$K_j(C_{17})$	-0.558	-0.264	0.209	-0.086	-0.354	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
$K_j(C_{18})$	-0.543	-0.389	-0.085	0.169	-0.312	IV	IV	IV	IV	IV	III	III	III	III
$K_j(C_{19})$	-0.082	0.198	-0.267	-0.537	-0.556	II	II	III	I	I	III	III	III	III
$K_j(C_{20})$	-0.096	0.130	-0.414	-0.603	-0.693	II	II	II	II	III	III	III	IV	IV
$K_j(C_{21})$	-0.273	0.440	-0.228	-0.491	-0.620	II	II	II	III	III	III	III	III	II
$K_j(C_{22})$	-0.147	-0.052	0.460	-0.060	-0.154	III	III	III	III	III	IV	IV	IV	IV
$K_j(C_{23})$	-0.399	-0.314	-0.199	0.199	-0.143	IV	IV	IV	III	III	III	III	II	II
$K_j(C_{24})$	-0.352	-0.190	0.239	-0.069	-0.277	III	III	II	II	III	III	III	V	V
$K_j(C_{25})$	0.374	-0.626	-0.751	-0.850	-0.925	I	I	II	II	II	III	III	IV	IV
$K_j(C_{26})$	0.465	-0.535	-0.826	-0.907	-0.944	I	II	II	II	II	III	III	IV	IV
$K_j(C_{27})$	-0.771	-0.733	-0.600	-0.200	0.200	V	IV	IV	III	III	II	II	III	III
$K_j(C_{28})$	-0.316	0.140	-0.070	-0.380	-0.535	II	II	III	II	II	III	IV	IV	IV
$K_j(C_{29})$	-0.387	0.145	-0.097	-0.458	-0.613	II	IV	III	II	III	III	III	III	IV
$K_j(C_{30})$	-0.248	0.492	-0.254	-0.403	-0.503	II	II	II	IV	IV	IV	IV	V	V

3.1.3 响应系统生态安全预警状况分析

由响应系统单个指标的物元分析结果可知(表 5),响应系统中,人均公共绿地面积、建成区绿化覆盖率、自然保护区占国土面积比例、水土流失治理面积比例、工业废水排放达标率、环境污染治理投资总额占 GDP 比重、(R&D)支出占 GDP 的比重、每万人大学生人数等因素在 1991—2011 年间预警等级呈不同等级的上升趋势,表明这些因素对吉林省生态安全水平的提高具有一定的积极作用。为了保护生态环境,面对生态环境的一些问题,吉林省积极响应,先后出台了《吉林省环境保护条例》、《吉林省生态省建设总体规划纲要》、《吉林省生态环境保护规划》等一系列政策规划文件,积极采取大力发展循环经济,实施城市环境综合整治工程、污染减排工程、农村环境连片整治和生态保护工程,推进清洁生产等措施,有效的促进了全省生态安全水平的提高。人均公共绿地面积从 1991 年的 $4.4 \text{ m}^2/\text{人}$ 增加到 2011 年的 $10.53 \text{ m}^2/\text{人}$,建成区绿化覆盖率从 1991

年的 18.3% 增加到 2011 年的 34.2%。吉林省自然保护区面积逐年增加,到 2011 年底,自然保护区总面积约 $2.31 \times 10^4 \text{ km}^2$,各类自然保护区的数量 38 处,森林生态系统、草原生态系统、湿地与水域生态系统等得到有效的保护。环境保护的治理与投入力度不断加大,并取得显著成效,工业废水排放达标率从 1991 年的 34.29% 增加到 2011 年的 89.97%,每万人大学生人数从 1991 年的 30 人增加到 2011 年的 280 人,人口素质的不断提高可以增强对生态保护和节约利用资源的观念和意识,对生态安全的保护起到积极的推动作用。

3.1.4 区域生态安全预警状况总体分析

由表 6 可知,1991—2011 年吉林省生态安全预警度从“巨警”上升为“轻警”,指示灯由“红色”逐步变为“蓝色”,表明吉林省生态安全总体水平正逐步提高,呈日益好转的趋势。1991—1995 年间吉林省生态安全预警基本上处于“巨警”状态,表明这期间吉林省生态安全水平较低,其中,1994 年吉林省区域生

态安全不完全符合“巨警”的标准,更具备转换为“巨警”的条件。“巨警”等级不稳定。1996—2002年间有所好转,由“向重警转换”变为“重警”状态,指示灯变为“橙色预警”,其中,1996—2001年不完全符合“重警”的标准,但具备转换为“重警”的条件。2003—2009年由“向中警转换”变为“中警”状态,指示灯变为“黄色预警”,其中,2004年为“轻警”状态,2003年、2006年、2007年、2008年不完全符合“中警”的标准,更具备转换为“中警”的条件。2010—2011年由“向轻警转换”变为“轻警”状态,指示灯变为“蓝色预警”,2010年不完全符合“轻警”的标准,更具备转换为“轻警”的条件。

表 5 1991—2011 年吉林省生态安全预警响应指标关联度与等级
Table 5 The response index correlation and classification of ecological security in Jilin Province from 1991 to 2011

关联度 Correlation	响应指标 Response index					1991	1995	1996	2000	2001	2005	2006	2010	2011
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5									
$K_j(C_{31})$	0.300	-0.300	-0.533	-0.720	-0.800	I	I	I	Ⅲ	I	Ⅲ	Ⅲ	V	V
$K_j(C_{32})$	-0.285	0.331	-0.446	-0.585	-0.668	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
$K_j(C_{33})$	-0.258	0.203	-0.081	-0.541	-0.694	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
$K_j(C_{34})$	-0.355	-0.090	0.220	-0.259	-0.445	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
$K_j(C_{35})$	-0.128	0.489	-0.123	-0.299	-0.416	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ
$K_j(C_{36})$	0.314	-0.314	-0.480	-0.571	-0.619	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
$K_j(C_{37})$	0.398	-0.398	-0.699	-0.799	-0.849	I	I	I	Ⅱ	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
$K_j(C_{38})$	-0.219	0.216	-0.072	-0.304	-0.536	Ⅱ	I	I	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	I	Ⅱ	Ⅱ
$K_j(C_{39})$	-0.416	-0.299	0.257	-0.128	-0.652	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
$K_j(C_{40})$	-0.408	-0.014	0.034	-0.281	-0.398	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	V	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ
$K_j(C_{41})$	-0.366	-0.298	-0.222	-0.018	0.013	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
$K_j(C_{42})$	-0.249	0.004	-0.001	-0.078	-0.201	Ⅱ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ	I	I	Ⅳ	Ⅳ
$K_j(C_{43})$	-0.206	-0.046	0.115	-0.272	-0.444	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
$K_j(C_{44})$	-0.387	-0.208	0.286	-0.095	-0.323	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
$K_j(C_{45})$	0	-1	-1	-1	-1	I	I	I	I	I	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ

表 6 1991—2011 年吉林省生态安全预警等级
Table 6 The classification of ecological security early-warning in Jilin Province from 1991—2011

关联度 Correlation	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V	警度等级 Classification	指示灯 Indicator lamp
$K_j(R_{1991})$	0.0947	-0.58173	-0.6482	-0.7444	-0.8304	巨警 I	红色
$K_j(R_{1992})$	0.1168	-0.3363	-0.5112	-0.6961	-0.7804	巨警 I	红色
$K_j(R_{1993})$	0.0269	-0.2778	-0.4202	-0.6381	-0.7376	巨警 I	红色
$K_j(R_{1994})$	-0.0211	-0.2385	-0.3096	-0.5758	-0.7054	向巨警 I 转换	待定
$K_j(R_{1995})$	0.1339	-0.1854	-0.3101	-0.5268	-0.6819	巨警 I	红色
$K_j(R_{1996})$	-0.2044	-0.1398	-0.2659	-0.4664	-0.6534	向重警 Ⅱ 转换	待定
$K_j(R_{1997})$	-0.2065	-0.0282	-0.3178	-0.5169	-0.6871	向重警 Ⅱ 转换	待定
$K_j(R_{1998})$	-0.2524	-0.0182	-0.2879	-0.4479	-0.6493	向重警 Ⅱ 转换	待定
$K_j(R_{1999})$	-0.3087	-0.0498	-0.1973	-0.4006	-0.6261	向重警 Ⅱ 转换	待定
$K_j(R_{2000})$	-0.2903	-0.1387	-0.2425	-0.3227	-0.5909	向重警 Ⅱ 转换	待定
$K_j(R_{2001})$	-0.3073	-0.0498	-0.2077	-0.4046	-0.6211	向重警 Ⅱ 转换	待定
$K_j(R_{2002})$	-0.3363	0.0845	-0.0801	-0.3531	-0.5748	重警 Ⅱ	橙色
$K_j(R_{2003})$	-0.3687	-0.1157	-0.1104	-0.3486	-0.5566	向中警 Ⅲ 转换	待定
$K_j(R_{2004})$	-0.4364	-0.1512	-0.0143	0.4898	-0.5191	轻警 Ⅳ	蓝色
$K_j(R_{2005})$	-0.4484	-0.1729	0.0336	-0.2722	-0.4909	中警 Ⅲ	黄色
$K_j(R_{2006})$	-0.4218	-0.2876	-0.0016	-0.2519	-0.4613	向中警 Ⅲ 转换	待定
$K_j(R_{2007})$	-0.4632	-0.1918	-0.0299	-0.2218	-0.3992	向中警 Ⅲ 转换	待定
$K_j(R_{2008})$	-0.5203	-0.3402	-0.1654	-0.1706	-0.3462	向中警 Ⅲ 转换	待定
$K_j(R_{2009})$	-0.4932	-0.3418	0.2042	-0.2143	-0.3197	中警 Ⅲ	黄色
$K_j(R_{2010})$	-0.4853	-0.4588	-0.2797	-0.2692	-0.2943	向轻警 Ⅳ 转换	待定
$K_j(R_{2011})$	-0.5441	-0.4951	-0.3721	0.2399	-0.2392	轻警 Ⅳ	蓝色

由上述结果表明,2003 年振兴东北老工业基地以来,吉林省在发展社会经济的同时,注重对生态环境的保护力度,采取了强化节能减排,加强重点流域水污染防治工程,加大工业污染治理力度,加快发展绿色经济和循环经济,推广低碳技术,推进全省东部、中部和西部地区生态建设等措施,使得区域生态安全水平得到了不断提高。但是,吉林省区域生态安全预警没有达到“无警”状态,生态环境保护仍存在一些不容忽视的问题,水土流失与土壤污染、农业面源污染问题日益严重,辽河流域、松花江流域等部分支流水环境污染较重,农村生活污水、垃圾、畜禽粪便等污染问题,城镇环境基础设施的运营与管理问题等仍十分突出。在社会经济快速发展、城镇化进程不断推进的背景下,吉林省生态环境保护形势依然很严峻。

4 预测分析

根据上述所选取的吉林省生态安全预警指标体

系的 47 个指标及其 1991—2011 年的数据,运用灰色 GM(1,1) 预测模型,对 2015 年、2020 年生态安全各预警指标值进行预测,并通过精度检验,说明预测指标值是可靠的,将 2015 年、2020 年的生态安全预测指标值代入变权-物元分析预警模型,分别得到 2015 年、2020 年吉林省生态安全的预警结果(表 7),由 $K_j(R_{2015}) = \max_{j \in \{I, II, \dots, V\}} K_j(R_{2015}) = 0.101$ 可知,2015 年吉林省的生态安全预警等级属于“轻警”,指示灯为“蓝色预警”,保持在 2011 年生态环境的预警状态,但是综合关联度有所增加。

由 $K_j(R_{2020}) = \max_{j \in \{I, II, \dots, V\}} K_j(R_{2020}) = 0.0253$ 可知,到 2020 年,吉林省的生态安全预警等级属于“无警”,指示灯为“绿色预警”,生态环境良好。

根据预警变化趋势分析可知,2020 年吉林省生态安全预警等级具有向“轻警”恶化的态势,发展形势仍不容乐观,因此,在以后的生态环境保护过程中,仍需要采取有效的预防措施和保护力度,进一步防范生态环境风险。

表 7 吉林省 2015 年、2020 年生态安全预警等级

Table 7 The grade of ecological security early-warning of Jilin Province in 2015 and 2020

关联度 Correlation	I	II	III	IV	V	等级 Classification	指示灯 Indicator lamp	变化趋势 Trend
$K_j(R_{2015})$	-0.8263	-0.7292	-0.5655	0.1010	-0.5512	轻警 IV	蓝色	无警 V
$K_j(R_{2020})$	-1.1237	-1.0897	-1.0344	-0.1911	0.0253	无警 V	绿色	轻警 IV

5 结论与讨论

(1) 1991—2011 年,吉林省生态安全总体水平呈逐步上升的趋势,区域生态安全预警等级从“巨警”上升为“轻警”,指示灯由“红色预警”逐步变为“蓝色预警”。通过灰色 GM(1,1) 模型的预测,2015 年吉林省的生态安全预警等级属于“轻警”,指示灯为“蓝色预警”,到 2020 年,吉林省的生态安全预警等级属于“无警”,指示灯为“绿色预警”,生态环境良好。但是,2020 年吉林省生态安全预警等级具有向“轻警”恶化的态势,发展形势仍不容乐观。吉林省生态环境保护的形势依然严峻,需要采取有效的预防措施和保护力度,进一步防范生态环境风险。

(2) 区域生态安全单指标的物元分析结果表明:单位面积耕地化肥负荷量、城镇化、人均水资源量、GDP 增长率、第一产业占 GDP 的比重等是制约吉林省生态安全水平提高的主要因素。吉林省在以后的

生态环境保护工作中,要引导耕地中化肥农药的合理施用,提高农业生产技术,并进一步优化与调整农业产业结构;走新型的工业化道路,降低工业能耗与耗水;改变经济增长方式,推进节能减排工作,加快发展绿色经济和循环经济,节约用水,推进重点工业领域节水技术改造,控制重点流域的水体污染,实现工业化、城镇化、农业现代化与生态环境保护的协调发展。

(3) 运用变权理论和物元分析方法相结合所建立的区域生态安全预警模型,不仅可以体现因素变动在区域生态安全预警中所起到的作用,并对单因素进行预警分析,提高对影响生态安全不利因素的重视程度,而且可以将单因素的评价结果进行整合,对整个区域的生态安全状况进行评价和预警,较好地实现区域生态安全预警的功能。但是,区域生态安全状况受多因素共同的影响与作用,由于在预测期间区域可能遭遇洪灾、旱灾等自然灾害的发生,对

区域生态安全产生一定的影响,使得该模型的预测结果存在一定的“不确定性”。受获取数据的局限性,本文对生态安全预警指标体系的选取不一定健全,仅从时间序列对吉林省区域生态安全进行预警与分析,对其生态安全警度的空间格局以及如何更合理地对物元分析模型中经典域的量值范围进行界定等问题是作者以后进一步研究和探讨的方向。

致谢:东北师范大学郭蒙老师帮助写作,特此致谢。

References:

- [1] Qu G P. The problems of ecological environmental have become a popular subject of country safety. *Environmental Protection*, 2002, (5): 3-5.
- [2] Li H Y, Zhang X P, Zhao M S. Evaluation of land ecological security in areas along Changjiang River in Anhui Province. *Resource Development & Market*, 2009, 25(3): 233-236.
- [3] Ma K M, Fu B J, Li X Y, Guan W B. The regional pattern for ecological security (RPES): the concept and theoretical basis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 761-768.
- [4] Wang G, Wu W. Research on Region ecological security early warning index: a case of Liaohe River watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3536-3542.
- [5] Fu B J. Early warning theory on regional eco-environmental issues and its application. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(4): 436-439.
- [6] De Lange H J, Sala S, Vighi M, Faber J H. Ecological vulnerability in risk assessment-a review and perspectives. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(18): 3871-3879.
- [7] Hallett C S, Valesini F J, Robert Clarke K, Alex Heso S, Hoeksema S D. Development and validation of fish-based, multimetric indices for assessing the ecological health of Western Australian estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 104-105: 102-113.
- [8] Costanza R. Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 2012, 45: 24-29.
- [9] Lenton T M. What early warning systems are there for environmental shocks? *Environmental Science & Policy*, 2013, 27(S1): S60-S75.
- [10] Brikmann J, Chang S D, Setiadi N. Enhancing early warning in the light of migration and environmental shocks. *Environmental Science & Policy*, 2013, 27(S1): S76-S88.
- [11] Grasso V F, Singh A. Global environmental alert service (GEAS). *Advances in Space Research*, 2008, 41(11): 1836-1852.
- [12] Boken V K. Improving a drought early warning model for an arid region using a soil-moisture index. *Applied Geography*, 2009, 29(3): 402-408.
- [13] Intrieri E, Gigli G, Mugnai F, Fanti R, Casagli N. Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 2012, 147-148: 124-136.
- [14] López V F, Medina S L, De Paz J F. Taranis: Neural networks and intelligent agents in the early warning against floods. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(11): 10031-10037.
- [15] Marvin H J P, Kleter G A, Van der Fels-Klerx H J, Noordam M Y, Franz E, Willems D J M, Boxall A. Proactive systems for early warning of potential impacts of natural disasters on food safety: Climate-change-induced extreme events as case in point. *Food Control*, 2013, 34(2): 444-456.
- [16] Wang J, Zhao J L, Cui X L, Zhen M T, Liu Y P, He L, Dong Q. Theoretical discuss on the establishing of the prediction mechanism of the agricultural ecological security of Hebei. *Ecological Economy*, 2007, (5): 130-133.
- [17] Li C, Liu J P. Design of the early-warning based on GIS in West Jilin Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(16): 9980-9981.
- [18] Li D C, Liao T J, Liu H, Guo F M, Mou X, Shen G Z. Research on early-warning of land ecological security in Leshan City. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2009, 31(3): 141-147.
- [19] Chen G C, Ma Y H, Zhao Y P, Hu H X, Wang Q, Liu X L. Review on early-warning of agroecosystem security and building of early-warning system. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(10): 330-333.
- [20] Zhang Y Z, Li Y F, Duan Y. Study of ecological security early-warning in Minjiang watershed. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2012, 40(1): 132-137.
- [21] Yu D, Gao Q, Ouyang L H. Land ecological safety alarm in Poyang lake eco-economic zone based on matter-element model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(6): 678-683.
- [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] Gong J P, Shi P J, Wei W. Early-warning of ecological safety based on BP artificial neural network-A case study of Gansu Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 211-216.
- [24] Xu M, Zhu X, Liu C L. Early-warning of land ecological security in Hunan Province based on RBF. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1411-1422.
- [25] Jiang Y, Fu M C, Wang Z, Ru J, Zhang Z Y, Zhang H J. Early warning of agricultural ecological security based on the emergy analysis in Wu'an city. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(6): 319-323.
- [26] Wang G, Liu Q B, Ding X J. Research on city eco-security early-warning in Liaoning Province based on system dynamics. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(2): 144-149.
- [27] Li W L. Review of research on the ecological security in China. *Safety and Environmental Engineering*, 2008, 15(3): 78-81.
- [28] Wu G C, Niu X. Application of an evaluation model based on

- punishing variable weight for early warning of land ecological security. *Resources Science*, 2010, 32(5): 992-999.
- [29] Zhu L, Huang J F. Assessment on ecological security of regional land resources based on multidimensional data. *Bulletin of Science and Technology*, 2008, 24(3): 361-366.
- [30] Li R Z. Regional eco-environmental quality assessment based on fuzzy matter-element analysis. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2006, 29(5): 597-601.
- [31] Qi P, Zhang R Z, Wang X J, Chen Y, Ma G J. Evaluation of land eco-security in Minqin oasis based on matter element model element model. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(5): 1494-1500.
- [32] Luo W B, Wu C F, Wang Y J, Wu Y Z, Wu Z B. Evaluation on urban land ecological level based on matter element analysis: A case of Hangzhou city in Zhejiang Province. *China Land Science*, 2008, 22(12): 31-38.
- [33] Zhang Q, Xue H F, Zhang M J, Liu X Y. Early-warning model based on extension analysis for ecological security and its application; case study of Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(16): 4277-4286.
- [34] Huang H L, Luo W B, Wu C F, Li D M. Evaluation of land eco-security based on matter element analysis. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 316-322.
- [35] Li H, Li X X, Yu J. A Study on the Evaluation of Ecological Security of Northeast Area. *Jilin University Journal Social Sciences Edition*, 2008, 48(5): 148-154.
- [36] Song G, Zhang W Y, Ma H. Construction and evaluation of intensive land use indicator system during transition period of forest industry city: A case of Yichun city in Heilongjiang Province. *China Land Science*, 2008, 22(10): 31-38.
- [37] Li H X. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII)-variable weights analysis. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 1995, 9(3): 1-9.
- [38] Li H X. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (IX)-structure of balance functions and Weber-Fechner's characteristics. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 1996, 10(3): 12-19.
- [39] Yao B X, Li H X. Axiomatic system of local variable weight. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2000, 20(1): 106-109, 112-112.
- [40] Wen J. Study on Forecasting and Warning System of the Sustainable Utilization of Region Water Resources. Nanjing: Hohai University.
- [41] Zhu Y, Ye M Q. A study on an early warning system to be used for ensuring sustainable development of a region. *Journal of Huaqiao University: Philosophy and Social Sciences*, 2002, (1): 32-38.
- [42] Cai W. Matter Element Model and Its Application. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1994.
- [43] Yu J, Fang L, Cang D B, Zhu L, Bian Z F. Evaluation of land eco-security in Wanjiang district base on entropy weight and matter element model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(5): 260-266.
- [44] Zhou J, Liu Z C. The research on the control and warning of ecological security based on GM(1,1) model. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(1): 15-19.
- [45] Zeng S. Research on GM(1,1) Model of grey system and its application. Changchun: Jilin University, 2007.
- [46] Qu Y B, Qi W, Shang R, Li L. A study on land eco-security evaluation in mountainous area at county level based on GIS. *China Land Science*, 2008, 22(4): 38-44.
- [47] Yang C H, Zhang Z D, Tian N N, Wu S F, Zhang W M. Evaluation on land ecological security in Shantou based on P-S-R model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 209-214.
- [48] Liu L, Jiang L Y, Gao J X. Evaluation of land eco-security based on pressure-state-response model using matter element methods: a case of Henan Province. *Areal Research and Development*, 2011, 30(4): 117-121.
- [49] Wei W, Wang L, Zhou P, Li Y, Sun Q Y. Multi-variable assessment of river ecosystem health in Tongling of Anhui Province. *China Environmental Science*, 2013, 33(4): 691-699.
- [50] Zhou W H, Wang R S. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3244-3251.
- [51] Hu S H. Pre-warning Study of Ecological Security of Chaohu Basin. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.
- [52] Song Y C, Qi R H, You W H, Wang X R, Zhu L B. A study on indices system and assessment criterion of Eco City. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1999, 12(5): 16-19.
- [53] Zuo W, Wang Q, Wang W J, Liu J J, Yang Y P. Study on regional ecological security assessment index and standard. *Geography and Territorial Research*, 2002, 18(1): 67-71.
- [54] Wang J N, Wu S Z, Cao D, Zhou J S, Zhang T Z. Environmental Security Management: Assessment and Early-warning. Beijing: Science Press, 2007.

参考文献:

- [1] 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): 3-5.
- [2] 李华永, 张小平, 赵明松. 安徽省沿江地区土地生态安全评价. *资源开发与市场*, 2009, 25(3): 233-236.
- [3] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- [4] 王耕, 吴伟. 区域生态安全预警指数——以辽河流域为例. *生态学报*, 2008, 28(8): 3536-3542.
- [5] 傅伯杰. 区域生态环境预警的理论及其应用. *应用生态学报*, 1993, 4(4): 436-439.
- [16] 王军, 赵金龙, 崔秀丽, 甄明涛, 刘宇鹏, 何铃, 董谦. 建立河北省农业生态安全预警机制的理论探讨. *生态经济*, 2007, (5): 130-133.
- [17] 李闯, 刘吉平. 基于 GIS 技术的吉林省西部农业生态安全预警系统设计. *安徽农业科学*, 2011, 39(16): 9980-9981.

- [18] 黎德川, 廖铁军, 刘洪, 郭芙梅, 牟祥, 沈国志. 乐山市土地生态安全预警研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 141-147.
- [19] 陈高潮, 马友华, 赵艳萍, 胡宏祥, 王强, 刘晓莉. 农业生态系统安全性预警与预警系统的建立. 中国农学通报, 2005, 21(10): 330-333.
- [20] 张玉珍, 李延凤, 段勇. 闽江流域生态安全预警研究. 福州大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 132-137.
- [21] 余敦, 高群, 欧阳龙华. 鄱阳湖生态经济区土地生态安全警情研究. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 678-683.
- [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): 295-301.
- [23] 宫继萍, 石培基, 魏伟. 基于 BP 人工神经网络的区域生态安全预警——以甘肃省为例. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 211-216.
- [24] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警. 地理学报, 2012, 67(10): 1411-1422.
- [25] 江勇, 付梅臣, 王增, 汝娘, 张中亚, 张宏杰. 基于能值分析的武安市农业生态安全预警. 农业工程学报, 2011, 27(6): 319-323.
- [26] 王耕, 刘秋波, 丁晓静. 基于系统动力学的辽宁省生态安全预警研究. 环境科学与管理, 2013, 38(2): 144-149.
- [27] 李万莲. 我国生态安全预警研究进展. 安全与环境工程, 2008, 15(3): 78-81.
- [28] 吴冠岑, 牛星. 土地生态安全预警的惩罚型变权评价模型及应用——以淮南市为例. 资源科学, 2010, 32(5): 992-999.
- [29] 朱蕾, 黄敬峰. MATLAB 和 GIS 支持下的模糊物元复合评价模型研究及应用. 科技通报, 2008, 24(3): 361-366.
- [30] 李如忠. 基于模糊物元分析原理的区域生态环境评价. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2006, 29(5): 597-601.
- [31] 齐鹏, 张仁陟, 王晓娇, 陈英, 马国军. 基于物元模型的民勤绿洲土地生态安全评价. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1494-1500.
- [32] 罗文斌, 吴次芳, 汪友结, 吴一洲, 吴泽斌. 基于物元分析的城市土地生态水平评价——以浙江省杭州市为例. 中国土地科学, 2008, 22(12): 31-38.
- [33] 张强, 薛惠锋, 张明军, 刘雪艳. 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. 生态学报, 2010, 30(16): 4277-4286.
- [34] 黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 李冬梅. 基于物元分析的土地生态安全评价. 农业工程学报, 2010, 26(3): 316-322.
- [35] 李辉, 李秀霞, 于娇. 东北地区生态安全评价研究. 吉林大学社会科学学报, 2008, 48(5): 148-154.
- [36] 宋戈, 张文雅, 马和. 森工城市转型期土地集约利用指标体系的构建与评价——以黑龙江省伊春市为例. 中国土地科学, 2008, 22(10): 31-38.
- [37] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)——变权综合原理. 模糊系统与数学, 1995, 9(3): 1-9.
- [38] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(IX)——均衡函数的构造与 Weber-Fechner 特性. 模糊系统与数学, 1996, 10(3): 12-19.
- [39] 姚炳学, 李洪兴. 局部变权的公理体系. 系统工程理论与实践, 2000, 20(1): 106-109, 112-112.
- [40] 文俊. 区域水资源可持续利用预警系统研究. 南京: 河海大学, 2006.
- [41] 朱晔, 叶民强. 区域可持续发展预警系统研究. 华侨大学学报: 哲学社会科学版, 2002, (1): 32-38.
- [42] 蔡文. 物元模型及其应用. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [43] 余健, 房莉, 仓定帮, 朱琳, 卞正富. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260-266.
- [44] 周健, 刘占才. 基于 GM(1,1) 预测模型的兰州市生态安全预警与调控研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 15-19.
- [45] 曾盛. 灰色系统 GM(1,1) 模型的研究与应用. 长春: 吉林大学, 2007.
- [46] 曲衍波, 齐伟, 商冉, 李乐. 基于 GIS 的山区县域土地生态安全评价. 中国土地科学, 2008, 22(4): 38-44.
- [47] 杨春红, 张正栋, 田楠楠, 吴申凤, 张五美. 基于 P-S-R 模型的汕头市土地生态安全评价. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209-214.
- [48] 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. 地域研究与开发, 2011, 30(4): 117-121.
- [49] 魏伟, 王丽, 周平, 李杨, 孙庆业. 安徽铜陵地区河流生态系统健康的多指标评价. 中国环境科学, 2013, 33(4): 691-699.
- [50] 周文华, 王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价. 生态学报, 2005, 25(12): 3244-3251.
- [51] 胡淑恒. 巢湖流域的生态安全预警研究. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [52] 宋永昌, 戚仁海, 由文辉, 王祥荣, 祝龙彪. 生态城市的指标体系与评价方法. 城市环境与城市生态, 1999, 12(5): 16-19.
- [53] 左伟, 王桥, 王文杰, 刘建军, 杨一鹏. 区域生态安全评价指标与标准研究. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 67-71.
- [54] 王金南, 吴舜泽, 曹东, 周劲松, 张天柱. 环境安全管理: 评估与预警. 北京: 科学出版社, 2007.