

文章编号: 1008 - 2786 - (2016) 5 - 580 - 11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000165

# 基于可拓 - 马尔科夫模型的贵州省生态安全预警

潘真真<sup>1</sup> 苏维词<sup>1 2 3\*</sup> 王建伟<sup>4</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 2. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001;

3. 重庆市三峡库区地表过程与环境遥感重点实验室, 重庆 400047;

4. 中国地质大学 生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 基于 1990—2013 年贵州省生态安全的相关数据, 从压力、状态、响应三个方面构建贵州省生态安全预警指标体系, 运用惩罚型变权 - 可拓模型对 1990—2013 年贵州省生态安全预警等级进行测度, 并运用马尔科夫模型对贵州省 2014—2020 年生态安全警情进行预测。结果表明: 1) 贵州省 1990—2013 年生态安全等级分为: 巨警、向重警转换、重警、向中警转换、中警、向轻警转换, 整体呈波动上升的趋势, 指示灯由“红色”演化为“待定”; 2) 贵州省 2014—2020 年生态安全预警等级为: 中警和轻警, 指示灯为“黄色”和“蓝色”, 生态安全状况具有恶化的趋势; 3) 影响贵州省生态安全水平的主要因素包括人口自然增长率、农民人均纯收入、GDP 增长率、石漠化面积比重、水土流失治理比例等, 是今后调控的重点。研究结果可为贵州省生态安全的维护提供参考。

**关键词:** 可拓马尔科夫模型; 生态安全; 预警模型; 贵州省

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

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<sup>[1]</sup>。它已成为当前灾害学、地球科学、环境学等研究的前沿和重要领域<sup>[2]</sup>。生态安全预警则是生态安全研究的重点和难点, 它是指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<sup>[3]</sup>。

## 1 生态安全预警研究现状

目前, 国外关于生态安全预警的研究主要集中在生态系统<sup>[4]</sup>、生态风险评价、生态敏感区等方面, 并形成了相对完善的概念体系与预警方法<sup>[4-5]</sup>。

如: B. H. Kemp 把俄罗斯科学院地理所编制的全俄尖锐生态状况分布图(1:800 万) 作为国家生态预报的基础; 欧美国家和国际性组织分别从不同侧面对生态安全系统进行单项和综合预警体系研究<sup>[6]</sup>。国内学者主要从区域生态安全预警的理论、指标、评价与测度、预警模型等方面展开研究<sup>[7-9]</sup>。如: 傅伯杰等对生态环境预警的原理和方法进行较深入研究<sup>[8]</sup>; 石明奎、彭昱等以珠江上游为例, 对脆弱农业区域的生态安全预警指标体系进行研究<sup>[9]</sup>; 宫继萍、石培基等运用 BP 神经网络模型对较干旱的甘肃省进行生态预警分析研究, 给出生态环境质量量化与预警分析方法<sup>[10]</sup>; 徐美等运用 RBF 模型对湖南省土地生态安全进行预警, 并分析影响因素且提

收稿日期( Received date): 2015 - 11 - 16; 改回日期( Accepted): 2015 - 12 - 28。

基金项目( Foundation item): 国家自然科学基金( 41261038); 贵州应用基础重大科技专项( JZ [2014] 200206); 贵州省科技创新人才团队( [2014] 4014); 重庆市研究生科研创新项目( CYS14138)。[National Natural Science Foundation of China( 41261038); Science and Technology Projects of Guizhou Province( JZ [2014] 200206); Science and Technology Innovation Talents Team of Guizhou Province( [2014] 4014); Graduate Student Research Innovation Project of Chongqing( CYS14138) . ]

作者简介( Biography): 潘真真( 1990 - ), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 研究方向: 区域发展与城乡规划。[Pan Zhenzhen, ( 1990 - ) female, born in Luohe, Henan, M. Sc candidate, major in regional development and urban-rural planning. ] E-mail: 746299901@qq.com

\* 通信作者( Corresponding author): 苏维词, 男, 研究员, 主要从事生态环境与可持续发展研究。[Su Weici, male, professor, mainly engaged in ecological environment and sustainable development study. ] E-mail: suweici@sina.com

出相应解决措施<sup>[11]</sup>;王耕等运用系统动力学模型对辽宁省生态安全进行预警研究<sup>[12]</sup>。

上述研究为生态安全预警研究提供了有价值的系列研究方法。但是在处理级别区间内部差异、白化信息和确定权重方面在某些不足,且对历史年份和未来年份进行预警多采用单一预警方法,较少运用多种预警模型的综合对比,在一定程度上降低了预警精度。鉴于此,本文采用可拓 - 马尔科夫模型对贵州省生态安全进行等级评价和预测分析。可拓分析法则是对事物状态的一种评价方法,马尔科夫过程实际上是一个将系统的“状态”和“状态转移”定量化的系统状态转换的数学模型<sup>[13]</sup>。因此,可以利用可拓分析法对贵州省生态安全等级进行评价作为马尔科夫“状态”和“状态转移”分析的依据,将 2 个模型进行有效衔接,从而实现对贵州省生态安全等级的有效预测<sup>[13]</sup>。该方法在流域健康评价、环境质量评价等方面已广泛应用,然而,应用于区域生态安全预警方面的详细研究相对较少,在西南山地。尤其是喀斯特地貌最为显著的贵州省相关研究中鲜有报道。为此,本研究在对 PSR 模型进行改进扩展的基础上,运用此模型对研究区进行等级评价和预测,以期对喀斯特地区生态安全保护提供依据。

## 2 研究区概况

贵州省位于长江和珠江的上游,处于 24°37' ~ 29°13'N, 103°36' ~ 109°35'24E,是全国唯一没有平原支撑且喀斯特地貌最发育、分布面积最广泛的省份。地貌类型以高原、山地为主,地表崎岖,且碎片化现象严重,山地面积占全省面积的 61.7%,喀斯特地貌占全省面积的 73.8%,属典型的生态环境脆弱区。面临石漠化和水流失问题仍然比较突出、土壤侵蚀严重、地下水污染、人地矛盾尖锐等突出的生态问题。这种脆弱的生态环境不仅直接影响、制约着贵州的农业、工业、旅游、交通等方面的建设,而且还因喀斯特山区地处长江、珠江上游的分水岭地带,生态环境的恶化,间接威胁长江、珠江下游沿岸地区经济社会的可持续发展<sup>[14]</sup>。因此,加强贵州省生态安全预警研究具有典型性、特殊性和现实意义。

## 3 方法与数据

### 3.1 可拓分析方法

#### 3.1.1 构造生态安全物元模型

根据可拓物元分析理论,将生态安全记作  $N$ ,  $N$  的特征即生态安全特征记作  $C$ ,  $N$  关于  $C$  的量值记作  $V$ , 则共同构成有序三元组  $R = (N, C, V)$ , 即生态安全物元。

#### 3.1.2 生态安全的经典域与节域矩阵

生态安全的经典域物元矩阵可表示为  $R_j = (N_j, C_j, V_{ji})$ , 式中  $R_j$  为经典域,  $N_j$  为所划分生态安全的第  $j$  个评价等级,  $C_j$  为第  $i$  个评价指标,  $V_{ji}$  为第  $i$  个特征向量对应等级  $j$  的量值范围。

生态安全的节域物元矩阵可表示为  $R_p = (N_p, C_i, V_{pi})$ , 式中  $R_p$  为节域物元,  $N_p$  为生态安全评价等级的全体,  $V_{pi}$  为  $N_p$  关于  $C_i$  所取的量值范围。

#### 3.1.3 关联函数及单指标关联度的计算:

$$K_j(V_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, V_{ij})}{|V_{ij}|} & v_i \in V_{ij} \\ \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{\rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij})} & v_i \notin V_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

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

式中  $K_j(v_j)$  为第  $i$  项指标对应于第  $j$  项生态安全等级的关联度,  $\rho_{ij}(v_i, V_{ij})$  为点  $v_i$  与对应特征向量有限区间  $V_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$  的距离;  $\rho_{pi}(v_i, V_{pi})$  为点  $v_i$  与对应特征向量节域  $V_{pi} = [a_{pi}, b_{pi}]$  的距离;  $|V_{ij}| = |b_{ij} - a_{ij}|$ ;  $v_i, V_{ij}, V_{pi}$  分别表示待评生态安全物元的量值、经典域物元的量值范围、节域物元的量值范围。

### 3.2 惩罚型变权权重

由变权理论可知<sup>[15-16]</sup>, 惩罚型变权向量  $W_{(X)} = (w_1(X), w_2(X), w_3(X), \dots, w_m(X))$  可表示为  $W$  和  $S_{(X)}$  的归一化的阿达玛乘积, 即

$$W_{(X)} = \frac{w_1 s_1(X), w_2 s_2(X), \dots, w_m s_m(X)}{\sum_{j=1}^m w_j s_j(X)} = \frac{w_j s_j(X)}{\sum_{j=1}^m w_j s_j(X)} \quad (3)$$

式中  $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$  为常数变量,  $S(X) = (S_1(X), S_2(X), S_3(X), \dots, S_n(X))$  为状态变权向量; 本文采用熵权法来确定静态常权权重, 具体计算步骤参考相关文献。

### 3.3 综合关联度及安全等级评定

$$K_j(N_X) = \sum_{i=1}^m w_X K_j(v_i) \quad (4)$$

式中  $w_X$  为各指标的变权权重,  $K_j(N_X)$  表示为预警对象  $N_X$  关于安全等级  $j$  的综合关联度,  $K_j(v_i)$  为第  $i$  项指标关于第  $j$  项生态安全等级的关联度。

### 3.4 马尔科夫预测模型

马尔科夫模型可通过分析某一变量的现在状况和动向来预测该变量未来某个时期的状况和动向<sup>[13]</sup>。根据马尔科夫链原理可知,未来年份贵州省生态安全的等级预测概率为:

$$P(n) = P(0) P^n \quad (5)$$

式中  $P(n)$  为  $n$  年后的状态概率转移矩阵,  $P(0)$  为初始时刻的状态概率矩阵。

### 3.5 预警方法构建

#### 3.5.1 数据来源

本研究的数据主要从 1990—2014 年《贵州省水资源公报》<sup>[17]</sup>、《贵州省环境状况报告》<sup>[18]</sup>《贵州省石漠化状况公报》<sup>[19]</sup>、《贵州统计年鉴》<sup>[20]</sup> (1990—2014 年) 中获得。

#### 3.5.2 生态安全预警等级的划分

参考已有的生态安全评价体系研究成果以及相关研究<sup>[17 20-23]</sup>,将贵州省生态安全等级划分为五个,即巨警、重警、中警、轻警、无警,分别用 I、II、III、IV、V 表示,对应的指示灯分别为红色、橙色、黄色、蓝色、绿色(表 1)。

#### 3.5.3 预警指标阈值

预警值阈值主要依据以下标准确定<sup>[21 24-29]</sup>: 1) 国家、地方、行业规定的环境质量标准,如:工业废水排放达标率、污水集中处理率等; 2) 同时参考本底标准,如:贵州省水土流失本底值、石漠化本底值等; 3) 类比标准,以未受人类严重干扰的相似生态环境或以相似自然条件下的原生自然生态系统作为类比标准,以类似条件的生态因子和功能作为类比标准,如类似生境的生物多样性、植被覆盖率等<sup>[21]</sup>; 4) 生

态省或生态县、生态示范区或生态文明建设的一些标准,如:公众环保满意率、恩格尔系数等; 5) 结合贵州省实际情况,如经济社会发展计划、生态建设规划、石漠化综合防治规划、GDP 增长率、环保投资占 GDP 比例、石漠化治理面积比例等; 6) 通过对贵州省 1990—2013 年的历史数据统计分析以及已有研究成果等综合确定各预警指标阈值(表 2)。

#### 3.5.4 预警指标体系的构建

PSR 模型能为生态安全预警指标构造提供逻辑基础,但由于生态安全的系统性、复杂性、动态性等特点,生态安全预警指标体系是一个受人口、生态、资源、环境、经济和社会等多方面因素的共同作用复合系统<sup>[17]</sup>。单纯的压力、状态、响应已不能满足生态安全预警的需要,因此需要在此模型的基础上进行改进扩展。国内外关于 PSR 模型的改进扩展有很多,如“驱动力-状态-响应”(DSR)模型、“驱动力-压力-状态-影响-响应”(DPSIR)模型,它是在 PSR 和 DSR 结合的基础上发展的模型、“驱动力-压力-状态-暴露-影响-响应(DPSEEA)”模型、“驱动力-压力-状态-暴露-响应(DPS-ER)”模型等。DSR 模型与 PSR 模型类似,但侧重于对生态安全原动力的研究,对生态安全的状态和响应的研究略有不足<sup>[22]</sup>; DPSIR、DPSEEA、DPSER 模型的优点是可以更加清晰地反映系统各指标之间的因果关系,但对生态安全的复杂性考虑较少,没有突出强调生态安全系统是一个受资源、环境、经济、社会等多方面因素共同作用的复合系统,因此,运用以上模型在研究中会对影响生态安全的影响因素有所忽略或者研究不够全面。

表 1 贵州省生态安全预警等级及指示灯划分标准

Tab. 1 Criterion of ecological security early-warning degree and indicator lamp in Guizhou province

等级	警度状态	指示灯	生态系统特征
V	无警	绿色	区域生态系统基本未受到破坏,无明显的生态胁迫因子,生态压力小,生态服务功能良好,系统恢复再生能力强,生态灾害少,资源丰富,能够实现社会、经济和环境的协调发展。
IV	轻警	蓝色	区域生态系统较少受到破坏,有轻微生态胁迫因子,生态压力较小,生态服务功能较好,生态系统恢复能力较强,生态灾害不大,社会、经济和环境基本能实现协调发展。
III	中警	黄色	区域生态系统受到一定破坏,有一定的生态胁迫因子,生态压力较大,生态服务功能有一定的退化,生态灾害时有发生,区域社会、经济和环境的协调发展受到影响。
II	重警	橙色	区域生态系统受到较大破坏,生态胁迫因子较多,生态压力很大,生态服务功能严重退化,生态灾害较多,系统恢复能力较差,区域社会、经济和环境较难实现协调发展。
I	巨警	红色	区域生态系统受到严重破坏,生态胁迫因子很多,生态压力巨大,服务功能退化严重,生态灾害频繁发生,生态系统破坏后不能恢复,无法实现社会、经济和环境的协调发展。

鉴于此, 本文在传统 PSR 模型的基础上基于脉冲理论的思路进行改进扩展, 即生态系统是一个自然 - 社会 - 经济复合系统<sup>[1-2]</sup>, 组成生态系统的任何组分的变化都可能影响生态系统的安全, 即相当于生态系统受到某个或几个因子影响, 生态系统整体的安全性都可能发生变化, 因此, 将 PSR 与生态 - 环境 - 经济 - 社会相结合来构建生态安全预警指标体系, 即 PSR - EEES 模型, 可以更好更全面地反映生态系统的真实变化。改进后的模型强调生态、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, 此模型更关注的是生态系统与人类活动、社会经济、自然之间的相互作用机理, 能够全面反映生态安全各指标之间的连续反馈机制。此外, 该模型更能够清晰揭示区域生态安全的“压力”引起的区域生态“状态”的改变, 从而影响人类活动, 最终促使一系列“响应”措施的实施这三方面的完整因果关系链, 有利于全面诠释区域生态安全的系统演变过程, 从而为区域生态安全预警提供较好的研究模式<sup>[22-24]</sup>(图 1)。

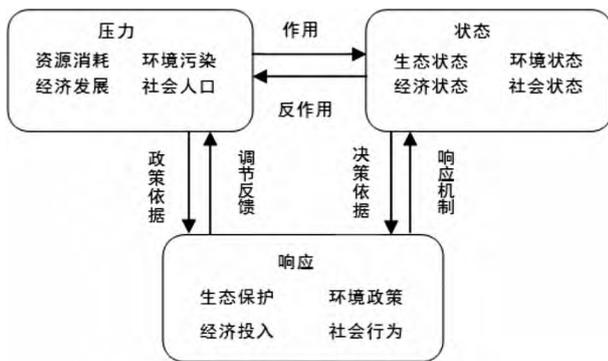


图 1 基于 PSR - EEES 模型的生态安全预警运行机制  
Fig.1 Operation mechanism of ecological security early-warning based on PSR - EEES model

### 3.5.5 指标选取

预警指标的选取首先应遵循指标选取的地域性、客观性、科学性原则。由于本文研究背景是喀斯特区域最为典型的贵州省, 因此, 选取指标要尽量能反映贵州省生态环境的重要因子, 比如坡度大于 25°山地面积比重(影响水土保持效果、退耕还林和生态脆弱性的重要指标, 贵州省山地丘陵占 92.5%, 平均地表坡度 16.9°)、石漠化比重、石漠化治理比重、水土流失治理比重(贵州省环境脆弱性相对较强, 石漠化、水土流失较为严重)、地下水(喀斯特地区特殊的二元结构水文系统)等<sup>[14 25-26]</sup>。

其次, 根据 PSR - EEES 模型, 压力、状态、响应都体现有生态、环境、经济、社会 4 个方面的指标, 压力指标主要反映自然因素、人为因素以及社会发展水平给生态环境所带来的负荷影响<sup>[20]</sup>, 指标主要从资源消耗、环境污染、经济发展、社会人口 4 个方面选取, 主要选择人均水资源量、人均耕地面积、石漠化比重、环境污染直接损失、人均 GDP、人口密度等 13 个指标; 状态指标主要反映贵州省资源环境情况及社会经济的发展情况<sup>[17]</sup>, 主要选择物种多样性、空气质量综合指数、第二产业占 GDP 比重、城市化率等 12 个指标; 响应指标主要反映为保证生态安全, 人们从制度、技术、投资、经济所采取的对策和措施<sup>[21]</sup>, 指标主要从生态保护、环境政策、经济投入、社会行为 4 个方面选取, 主要选取石漠化治理比例、环保投资占 GDP 比例、城镇居民人均可支配收入、万人科技人员数等 12 个指标。遵循指标选取的可获取性以及可靠性等原则, 最终选取 37 个指标来构建贵州省生态安全预警指标体系(表 2)。

## 4 结果与分析

运用上述公式得到 1990—2013 年贵州省生态安全等级结果(表 3), 贵州省生态安全压力、状态、响应指标预警状况(表 4、5、6)。

### 4.1 生态安全预警结果分析

由表 3 可知, 1990—2013 期间贵州省生态安全等级经历了“巨警” - “重警” - “向重警转换” - “重警” - “向中警转换” - “中警” - “向轻警转换”的过程, 生态安全水平整体呈逐步好转的趋势, 相应的指示灯颜色由“红色”演化为“待定”, 可见生态环境保护工作成效显著<sup>[30-32]</sup>。1990—1994 年期间贵州省生态安全等级较低, 都处于“巨警”状态, 但具有向“重警”和“中警”变化的趋势。到 1995 年达到“重警 II”, 指示灯为“橙色”, 实现了由“巨警”到“重警 II”的重要转变。1995—2004 年, 贵州省生态安全等级基本上处于“重警 II”, 其中, 1997—1998 和 2003 年生态安全等级为“向重警 II 转换”。2005 年首次出现了“向中警 III 转换”的生态安全等级。生态环境有所改善, 这主要得益于退耕还林、石漠化和水土流失治理初见成效<sup>[25]</sup>。2006—2009 这 4 a 期间警度为“中警 III”, 指示灯为“黄色”。2010 年实现了由“中警 III”到“向轻警 IV 转换”的关键性转变, 年限缩短, 说明贵州省加大生态环境保护力度且

效果显著。2010—2013 年生态安全等级均为“向轻警Ⅳ转换”,但具有向“中警”变化的趋势,生态环境压力仍很大<sup>[30]</sup>。

整体上分析,1990—2013 年期间,贵州省生态安全状况有所好转<sup>[31]</sup>。研究结果符合贵州省生态安全水平的实际情况,表明了惩罚型变权—可拓模

表 2 贵州省生态安全预警评价指标体系

Tab. 2 Eco-security assessment index system for early-warning in Guizhou Province

目标层	准则层	指标层	巨警	重警	中警	轻警	无警	权重
贵州省生态安全评价	压力	人均水资源量 $C_1 / (m^2 / 人)$	[160 ~ 600]	[600 ~ 2 200]	[2 200 ~ 5 200]	[5 200 ~ 12 000]	[12 000 ~ 15 000]	0.021 8
		坡度大于 25° 山地面积比重 $C_2 / \%$	[25 ~ 40]	[20 ~ 25]	[15 ~ 20]	[10 ~ 15]	[0 ~ 10]	0.022 9
		人均耕地面积 $C_3 / (hm^2 / 人)$	[0 ~ 5.3]	[5.3 ~ 7.5]	[7.5 ~ 10]	[10 ~ 22]	[22 ~ 30]	0.035 6
		石漠化面积比重 $C_4 / \%$	[1.5 ~ 2]	[1 ~ 1.5]	[0.75 ~ 1]	[0.5 ~ 0.75]	[0.2 ~ 0.5]	0.037 0
		公众环保满意率 $C_5 / \%$	[0.5 ~ 0.6]	[0.6 ~ 0.7]	[0.7 ~ 0.8]	[0.8 ~ 0.9]	[0.9 ~ 1]	0.023 1
		环境污染直接损失 $C_6 / (万元)$	(5 000 ~ 10 000]	(2 200 ~ 5 000]	(1 200 ~ 2 200]	(600 ~ 1200]	(0 ~ 600]	0.026 7
	经济	地下水质量 $C_7 / \%$	[0 ~ 40]	[40 ~ 60]	[60 ~ 80]	[80 ~ 95]	[95 ~ 100]	0.031 1
		三产比重 $C_8 / \%$	[0 ~ 13]	[13 ~ 23]	[23 ~ 33]	[33 ~ 43]	[43 ~ 53]	0.030 8
		人均 GDP $C_9 / (万元)$	[0.1 ~ 0.6]	[0.6 ~ 1]	[1 ~ 2]	[2 ~ 3]	[3 ~ 8]	0.035 5
		恩格尔系数 $C_{10}$	[50 ~ 55]	[40 ~ 50]	[30 ~ 40]	[25 ~ 30]	[15 ~ 25]	0.032 1
		人口密度 $C_{11} / (km^2 / 人)$	[600 ~ 800]	(500 ~ 600]	(400 ~ 500]	(300 ~ 400]	(200 ~ 300]	0.011 7
		农村劳动力受教育程度 $C_{12} / \%$	[0 ~ 70]	[70 ~ 80]	[80 ~ 90]	[90 ~ 95]	[95 ~ 100]	0.020 9
		城镇登记失业率 $C_{13} / \%$	(4.5 ~ 5]	(4 ~ 4.5]	(3 ~ 4]	(3 ~ 2]	(1 ~ 2]	0.010 9
状态	生态	物种多样性 $C_{14} / \%$	[10 ~ 20]	[10 ~ 20]	[20 ~ 35]	[35 ~ 50]	[50 ~ 200]	0.041 5
		森林覆盖率 $C_{15} / \%$	[4 ~ 12]	[12 ~ 32]	[32 ~ 42]	[42 ~ 52]	[52 ~ 62]	0.021 0
		成灾/受灾面积 $C_{16} / \%$	(90 ~ 100]	(70 ~ 90]	(50 ~ 70]	(30 ~ 50]	[0 ~ 30]	0.030 3
	环境	空气质量综合指数 $C_{18}$	(3.9 ~ 5]	(2.9 ~ 3.9]	(1.9 ~ 2.9]	(1 ~ 1.9]	(0.5 ~ 1]	0.022 0
		环保投入强度 $C_{17}$	[0.003 ~ 0.006]	[0.006 ~ 0.02]	[0.02 ~ 0.03]	[0.03 ~ 0.045]	[0.045 ~ 0.06]	0.043 1
		水环境指数 $C_{19}$	[0.07 ~ 1]	(0.05 ~ 0.07]	(0.03 ~ 0.05]	(0.02 ~ 0.03]	(0 ~ 0.02]	0.040 2
		农民人均纯收入 $C_{20} / (元/人)$	[0 ~ 1500]	[1 500 ~ 2 500]	[2500 ~ 3500]	[3 500 ~ 5 000]	[5 000 ~ 10 000]	0.012 1
		第二产业占 GDP 比重 $C_{21} / \%$	[0 ~ 33]	[33 ~ 38]	[38 ~ 43]	[43 ~ 50]	[50 ~ 60]	0.020 1
		GDP 增长率 $C_{22} / \%$	[14 ~ 16]	(12 ~ 14]	(10 ~ 12]	(8 ~ 10]	(0 ~ 8]	0.042 0
		从业人员比重 $C_{23} / \%$	[33 ~ 38]	[38 ~ 43]	[43 ~ 48]	[48 ~ 53]	[53 ~ 60]	0.030 9
社会	城市化率 $C_{24} / \%$	[70 80]	(55 70]	(40 ~ 55]	(30 ~ 40]	(15 ~ 30]	0.011 6	
	机械程度 $C_{25} / \%$	[0 ~ 33]	[33 ~ 43]	[43 ~ 63]	[63 ~ 83]	[83 ~ 100]	0.012 4	
	响应	石漠化治理面积比例 $C_{26} / \%$	[0 ~ 5]	[5 ~ 10]	[10 ~ 15]	[15 ~ 20]	[20 ~ 25]	0.020 4
生态环境管理水平 $C_{27} / \%$		[0.5 ~ 0.6]	[0.6 ~ 0.7]	[0.7 ~ 0.8]	[0.8 ~ 0.9]	[0.9 ~ 1]	0.031 5	
水土流失治理面积比例 $C_{28} / \%$		[0 ~ 4]	[4 ~ 8]	[8 ~ 13]	[13 ~ 18]	[18 ~ 25]	0.026 4	
环保投资占 GDP 比例 $C_{30} / \%$		[0 ~ 0.1]	[0.1 ~ 0.2]	[0.2 ~ 0.4]	[0.4 ~ 1]	[1 ~ 1.6]	0.043 7	
污水集中处理率 $C_{29} / \%$		[33 ~ 43]	[43 ~ 53]	[53 ~ 63]	[63 ~ 73]	[73 ~ 80]	0.030 7	
工业废水达标排放率 $C_{31} / \%$		[0 ~ 45]	[45 ~ 65]	[65 ~ 80]	[80 ~ 90]	[90 ~ 100]	0.031 0	
经济	城镇居民人均可支配收入 $C_{32} / (万元)$	[0 ~ 0.3]	[0.3 ~ 0.8]	[0.8 ~ 1.5]	[1.5 ~ 2.5]	[2.5 ~ 3.5]	0.014 4	
	第三产业占 GDP 比重 $C_{33} / \%$	[12 ~ 22]	[22 ~ 32]	[32 ~ 38]	[38 ~ 42]	[42 ~ 45]	0.018 9	
	经济密度 $C_{34} / (10^4 元/km^2)$	[0 ~ 50]	[50 ~ 100]	[100 ~ 200]	[200 ~ 280]	[280 ~ 600]	0.034 1	
	每万人大学生人数 $C_{35} / 人$	[35 ~ 110]	[110 ~ 210]	[210 ~ 260]	[260 ~ 320]	[320 ~ 400]	0.022 4	
	社会	人口自然增长率 $C_{36} / \%$	[5.5 ~ 8]	(3.5 ~ 5.5]	(2.5 ~ 3.5]	(1 ~ 2.5]	(0.7 ~ 1]	0.036 0
万人科技人员数 $C_{37} / 人$		[100 ~ 200]	[200 ~ 350]	[350 ~ 450]	[450 ~ 600]	[600 ~ 800]	0.023 2	

表 3 贵州省 1990—2013 年生态安全等级综合预警结果

Tab. 3 Comprehensive early-warning results of ecological security in Guizhou Province during 1990—2013

年份	关联函数值					等级	指示灯	变化趋势
	I	II	III	IV	V			
1990	0.067	-0.375	-0.443	-0.512	-0.634	巨警 I	红色	重警 II
1991	0.102	-0.310	-0.3623	-0.412	-0.542	巨警 I	红色	重警 II
1992	0.113	-0.187	-0.214	-0.347	-0.612	巨警 I	红色	中警 III
1993	0.127	-0.220	-0.322	-0.403	-0.534	巨警 I	红色	中警 III
1994	0.132	-0.453	-0.206	-0.332	-0.444	巨警 I	红色	重警 II
1995	-0.012	0.225	-0.332	-0.364	-0.401	重警 II	橙色	巨警 I
1996	-0.101	0.176	-0.212	-0.232	-0.240	重警 II	橙色	中警 III
1997	-0.231	-0.113	-0.370	-0.380	-0.432	向重警 II 转换	待定	中警 III
1998	-0.573	-0.296	-0.334	-0.476	-0.488	向重警 II 转换	待定	中警 III
1999	-0.297	0.155	-0.322	-0.376	-0.396	重警 II	橙色	巨警 I
2000	-0.417	0.045	-0.160	-0.212	-0.333	重警 II	橙色	中警 III
2001	-0.322	0.101	-0.228	-0.303	-0.360	重警 II	橙色	中警 III
2002	-0.101	0.131	-0.197	-0.223	-0.243	重警 II	橙色	巨警 I
2003	-0.116	-0.019	-0.231	-0.332	-0.365	向重警 II 转换	待定	中警 III
2004	-0.116	0.063	-0.113	-0.288	-0.313	重警 II	橙色	巨警 I
2005	-0.210	-0.101	-0.078	-0.132	-0.213	向中警 III 转换	待定	重警 II
2006	-0.421	-0.212	0.100	-0.312	-0.299	中警 III	黄色	重警 II
2007	-0.300	-0.216	0.114	-0.176	-0.206	中警 III	黄色	巨警 I
2008	-0.143	-0.112	0.088	-0.190	-0.108	中警 III	黄色	重警 II
2009	-0.506	-0.333	0.002	-0.217	-0.321	中警 III	黄色	轻警 IV
2010	-0.321	-0.434	0.2315	-0.110	-0.228	中警 III	黄色	重警 II
2011	-0.490	-0.332	-0.304	-0.210	-0.311	向轻警 IV 转换	待定	中警 III
2012	-0.523	-0.453	-0.213	-0.131	-0.227	向轻警 IV 转换	待定	轻警 IV
2013	-0.440	-0.304	-0.211	-0.018	-0.220	向轻警 IV 转换	待定	中警 III

型为贵州省生态安全预警提供另一可行性研究。

#### 4.2 生态安全压力指标预警状况

在压力指标系统中(表 4),人均耕地面积、人均粮食产量、石漠化面积比重等指标在 1990—2013 年期间总体安全等级基本呈波动上升的趋势,并对贵州省生态环境的改善,安全等级的提高起到了促进作用<sup>[32]</sup>。贵州省 1990 年人均耕地面积为 0.11 hm<sup>2</sup>,2013 年人均耕地面积 0.161 hm<sup>2</sup>,增长了 46%,但 2000—2010 年期间,人均耕地面积生态安全预警等级呈停滞不前状态,这主要是因为由于城市化进程的加快,出现了“开发区热”“房地产圈地热”等现象。整体上贵州省人均粮食产量增长较快,得益于贵州省围绕“确保粮食安全,发展特色农业”的方针,提高耕地质量,加强耕地质量检测,大

力改造中低产田土等措施都取得了很大成效,并为生态安全水平的提高起到了一定的促进作用<sup>[33]</sup>。1990—2000 年贵州省石漠化面积呈增长趋势,之后实施退耕还林和石漠化专项工程的综合治理,但治理成效还不明显;2005—2010 年期间贵州石漠化发生根本变化,石漠化面积开始减少,2010 年石漠化面积减少到 36 473 km<sup>2</sup>,2013 年石漠化面积减少到 30 238 km<sup>2</sup>。整体上看虽然石漠化扩展速度逐渐得到遏制,但由于石漠化治理工程实施年限较短,治理成效还未完全显现,局部地区恶化现象依然存在,防治形势依然严峻,并在一定程度上影响了贵州生态安全水平<sup>[33]</sup>。贵州省应通过退耕还林、种植生态经济型林草等方面加大对生态环境的改善。

#### 4.3 生态安全状态指标预警状况

表 4 贵州省 1990—2013 年生态安全压力指标预警结果

Tab. 4 Pressure early-warning results of ecological safety in Guizhou Province during 1990—2013

压力指标	关联函数值					年份							
	I	II	III	IV	V	1990	1995	2000	2004	2009	2010	2011	2013
C <sub>1</sub>	-0.343	0.210	-0.598	-0.773	-0.465	II	I	II	III	II	IV	IV	V
C <sub>2</sub>	0.282	-0.553	-0.423	-0.709	-0.340	I	II	II	III	II	II	II	II
C <sub>3</sub>	0.554	-0.766	-0.807	-0.322	-0.254	I	II	II	I	III	IV	IV	V
C <sub>4</sub>	0.881	-0.403	-0.243	-0.432	-0.530	I	II	III	III	III	III	IV	V
C <sub>5</sub>	0.179	-0.408	-0.549	-0.632	-0.289	I	III	II	III	III	IV	V	IV
C <sub>6</sub>	-0.223	-0.776	-0.541	0.114	-0.733	IV	II	IV	III	III	IV	IV	IV
C <sub>7</sub>	0.126	-0.221	-0.302	-0.109	-0.544	I	II	II	III	III	III	IV	V
C <sub>8</sub>	-0.359	0.167	-0.505	-0.238	-0.665	II	III	IV	III	IV	IV	IV	IV
C <sub>9</sub>	0.102	-0.429	-0.343	-0.662	-0.292	I	II	II	III	IV	III	IV	IV
C <sub>10</sub>	-0.033	0.090	-0.089	-0.102	-0.123	II	I	II	I	III	IV	IV	IV
C <sub>11</sub>	-0.120	-0.402	0.212	-0.338	-0.203	III	I	III	II	I	III	IV	IV
C <sub>12</sub>	-0.211	0.122	-0.389	-0.231	-0.109	II	I	IV	II	IV	I	III	IV
C <sub>13</sub>	0.020	-0.289	-0.390	-0.412	-0.233	I	I	II	III	III	III	IV	III

在状态指标系统中(表 5),农民人均纯收入、GDP 增长率、城市化率、公众环保满意率等因素主要对状态系统的影响较大。1990 年贵州省农民人均纯收入为 312 元,2013 年农民人均纯收入为 5 650 元,位居第 28 位,说明农业生产方式的改变、农民收入水平的提高,有利于对生态环境的保护,缓解生态压力<sup>[33]</sup>。通过农业产业结构优化调整,大力实施工业强省和城镇化带动战略,使得贵州省 1990 年 GDP

增长率为 9.14%,2013 年 GDP 增长率为 12.5%,且增长率位居全国前列。1990 年贵州省城市化率为 19.24%,2013 年城市化率为 37.8%,期间城市化率呈线性增长的趋势。但公众环保满意率等级却逐渐呈下降的趋势,表明贵州省在经济增长的同时,应加强公民环保意识,政府加大环境保护投资力度,提高公众环保满意率,减少生态安全压力,实现经济、社会和生态的协调发展<sup>[33-35]</sup>。

表 5 贵州省 1990—2013 年生态安全状态指标预警结果

Tab. 5 State early-warning results of ecological security in Guizhou Province during 1990—2013

状态指标	关联函数值					年份							
	I	II	III	IV	V	1990	1995	2000	2004	2009	2010	2011	2013
C <sub>14</sub>	0.313	-0.440	-0.002	-0.655	-0.772	I	II	II	II	III	III	IV	V
C <sub>15</sub>	0.010	-0.219	-0.301	-0.321	-0.201	I	III	II	I	II	III	IV	IV
C <sub>16</sub>	-0.213	0.102	-0.091	-0.290	-0.301	II	I	III	IV	II	III	IV	IV
C <sub>17</sub>	-0.201	0.311	-0.108	-0.322	-0.201	II	I	IV	III	IV	III	IV	IV
C <sub>18</sub>	-0.301	0.002	-0.212	-0.325	-0.302	II	II	I	II	III	III	IV	IV
C <sub>19</sub>	0.646	-0.309	-0.527	-0.612	-0.119	I	III	I	III	II	IV	IV	V
C <sub>20</sub>	-0.564	0.155	-0.006	-0.210	-0.708	II	II	I	I	III	II	III	III
C <sub>21</sub>	-0.770	0.201	-0.332	-0.406	-0.558	II	III	II	II	IV	IV	V	V
C <sub>22</sub>	-0.424	-0.209	0.476	-0.661	-0.003	III	III	II	III	III	II	III	I
C <sub>23</sub>	0.115	-0.308	-0.002	-0.410	-0.172	I	I	II	II	III	III	IV	IV
C <sub>24</sub>	0.201	-0.322	-0.432	-0.403	-0.551	I	II	III	III	II	III	IV	III
C <sub>25</sub>	0.188	-0.003	-0.306	-0.512	-0.232	I	I	IV	I	III	III	IV	V

表 6 贵州省 1990—2013 年生态安全响应指标预警结果

Tab. 6 Response early-warning results of ecological security in Guizhou Province during 1990—2013

响应指标	关联函数值						年份						
	2013	II	III	IV	V		1990	1995	2000	2004	2009	2010	2011
C <sub>26</sub>	0.115	-0.673	-0.430	-0.565	-0.112	I	II	III	IV	III	III	IV	V
C <sub>27</sub>	-0.502	0.232	-0.089	-0.603	-0.544	II	I	II	III	IV	V	V	V
C <sub>28</sub>	0.121	-0.893	-0.773	-0.565	-0.221	I	III	V	III	II	III	III	III
C <sub>29</sub>	0.023	-0.343	-0.462	-0.141	-0.335	I	I	II	II	III	III	IV	V
C <sub>30</sub>	-0.723	0.530	-0.423	-0.212	-0.622	II	II	II	III	IV	II	IV	IV
C <sub>31</sub>	0.210	-0.233	-0.453	-0.407	-0.667	I	III	III	III	II	IV	IV	IV
C <sub>32</sub>	-0.824	0.632	-0.006	-0.512	-0.853	II	II	II	II	IV	III	III	III
C <sub>33</sub>	-0.435	0.111	-0.707	-0.356	-0.521	II	II	III	II	IV	III	III	IV
C <sub>34</sub>	-0.370	-0.201	0.039	-0.201	-0.350	III	I	II	III	III	IV	IV	III
C <sub>35</sub>	0.123	-0.102	-0.201	0.339	-0.265	I	III	III	I	IV	I	IV	III
C <sub>36</sub>	-0.20	0.201	-0.099	-0.522	-0.202	II	I	III	III	I	IV	III	V
C <sub>37</sub>	0.204	-0.234	-0.557	-0.677	-0.343	I	I	II	II	II	II	III	IV

4.4 生态安全响应指标预警状况

在响应指标系统中(表 6) 污水集中处理率、环保投资占 GDP 比重、人口自然增长率、水土流失治理比例、石漠化治理比例等因素在 1990—2013 年间生态安全预警等级呈上升趋势。1990 年贵州省污水集中处理率为 32% 2013 年污水集中处理率上升到 78.4%; 环保投资比重也不断加大, 从 1990 年的 0.03% 增长到 2012 年的 1.21%, 说明了贵州省加大环境保护力度, 并取得了显著成效。贵州省人口自然增长率从 1990 年的 16.6‰ 下降到 2013 年的 5.9‰, 在一定程度上减轻了对生态环境的压力。另外, 在国家支持和贵州省林业部门的共同努力下“珠防林”、天然林保护等工程相继实施且取得成效, 2000—2010 期间, 贵州省水土流失面积由 73 179.01 km<sup>2</sup> 减少到 55 269.40 km<sup>2</sup>; 2012 年, 贵州省水土流失面积比例由 55.32% 下降到 31.37%, 森林覆盖率由 1990 年的 25.3% 增长到 2013 年的 48%, 水土保持生态环境改善明显<sup>[31]</sup>。1990—2000 年贵州石漠化年变化速率为 5.3%, 2000—2013 年石漠化增长速率明显下降, 主要由于贵州省 2008 年开始在 78 个喀斯特县启动石漠化治理工程, 2013 年已完成石漠化治理面积 4 826 km<sup>2</sup>, 在一定程度上减缓了石漠化发展的速度, 促进了生态安全水平的提高。

4.5 生态安全预测

利用 1990—2012 年贵州省生态安全警度和公

式(5) 运用马尔科夫模型可计算得出 2014—2020 年贵州省生态安全预警概率预测(表 7)。

表 7 贵州省 2014—2020 年生态安全警度概率预测

Tab. 7 Probability prediction of ecological security warning index in Guizhou Province from 2014 to 2020

年份	巨警	重警	中警	轻警	无警
2014	0.140 1	0.152 1	0.287 9	0.281 6	0.138 3
2015	0.125 9	0.192 0	0.290 8	0.281 1	0.110 2
2016	0.180 9	0.201 3	0.261 0	0.271 2	0.085 6
2017	0.127 0	0.130 2	0.273 0	0.288 0	0.181 8
2018	0.168 4	0.190 2	0.260 1	0.278 0	0.103 3
2019	0.150 5	0.203 4	0.298 0	0.247 7	0.100 4
2020	0.110 2	0.201 1	0.292 1	0.270 2	0.126 4

由表 7 可知, 2014 和 2015 年贵州省生态安全等级预测中, 中警概率分别为 0.287 9、0.290 8, 轻警概率分别为 0.281 6、0.281 1, 说明 2014 和 2015 年贵州省生态安全等级为“中警 III”, 指示灯为“黄色”, 且具有向“轻警 IV”变化的趋势, 生态环境整体好转; 2016—2018 年贵州省生态安全等级预测中, 轻警概率分别为 0.271 2、0.288 0、0.278 0, 说明 2016—2018 年贵州省生态安全等级均为“轻警 IV”, 对应的指示灯为“蓝色”; 2019—2020 年, 贵州省生态安全等级预测中, 中警概率分别为 0.298 0、0.292 1, 轻警概率为 0.247 7、0.270 2, 表明 2019—

2020年贵州省生态安全等级为“中警Ⅲ”,相比2016—2018年生态安全状况具有恶化的趋势,发展形势依然严峻,因为伴随着生态文明的推进,生态环境逐渐好转,但城市化率、人口自然增长率、第三产业比重等部分短板因素影响整体生态安全等级的提高<sup>[17,30]</sup>。因此,在保护生态环境的同时,仍需平衡经济社会的健康发展,才能保证实现贵州省生态安全等级达到“无警Ⅴ”<sup>[34]</sup>。

## 5 结论与讨论

1) 1990—2013年贵州省生态安全预警等级整体呈上升趋势,个别年份略有下降。贵州省1990—2013年生态安全预警等级从“巨警Ⅰ”演变为“向轻警Ⅳ转换”,指示灯由“红色预警”逐渐变为“待定”。利用马尔科夫预测模型得到:2014—2015年贵州省生态安全预警等级为“中警Ⅲ”,指示灯为“黄色”;2016—2018年生态安全等级为“轻警Ⅳ”,指示灯为“蓝色”;2019—2020年生态安全预警等级为“中警Ⅲ”,指示灯为“黄色”,生态安全状况具有恶化的趋势。

2) 从贵州省生态安全预警单指标的物元分析研究可知:人口自然增长率、农民人均纯收入、人均耕地面积、环保投资占GDP比重、GDP增长率、石漠化面积比重、水土流失比重等因素严重制约着贵州省生态安全水平的提高。需要在控制人口数量,提高人口素质;优化农业结构,提高农民收入、农民素质及生态意识;加大环境保护力度;改变经济发展方式;进一步实施退耕还林还草,封山育林,坡改梯及生物护坎工程,减少水土流失和石漠化比重等方面加大重视,以促进区域生态水平的提高。

3) 运用可拓—马尔科夫模型计算所得到的研究结果与贵州省实际情况及其他模型研究结果大致一致<sup>[29-31]</sup>,与运用RS、GIS对TM/ETM+遥感影像数据进行贵州省生态安全度变化评价研究结果具有可比性(除1998年计算结果有较小偏差)<sup>[29]</sup>,可证明运用可拓—马尔科夫模型对贵州省生态安全预警研究具有可行性。

利用可拓物元法计算过程中,指标等级刻度的量化(经典域)是结合贵州的实际情况,通过对历史数据的统计分析,参考本底标准、类比标准以及国家、地方规定的环境质量标准和其他标准(如生态示范区建设标准、生态省建设标准等)而得到的经

典域、节域、关联度,避免了评价过程中刻板统一性的影响,具有科学性和客观性。利用惩罚型变权取得权重也弥补了其他静态权重的不足,具有更能及时、准确、动态的反映生态安全预警信息,能够充分考虑生态安全预警各因素的权重、各影响因素状态值之间的组态水平、以及凸显个别因素的明显变化的优势。但由于该模型本身的限制,使本研究存在进一步改进的方向:指标等级刻度量化的确定缺乏统一的标准,这影响到该方法的普遍推广性;由于生态安全系统本身的复杂性和动态性,实际的生态安全等级的演变会受到更多因素的影响,比如在预测期间范围内,贵州省自然灾害的发生,以及经济发展、生态建设等政策的调整,进而导致马尔科夫预测的不确定性,马尔科夫模型的“无后效性”和“平稳性”只能是相对而言的,具体应用中还有待识别。

## 参考文献(References)

- [1] Liu Hong, Wang Hui, Zhang Xingwei. Research review on ecological security assessment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25 (1): 74-78 [刘红,王慧,张兴卫.生态安全评价研究述评[J].生态学杂志,2006,25(1):74-78]
- [2] Wang Geng, Wang Li, Wu Wei. Recognition on regional ecological security definition and assessment system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(4): 1627-1637 [王耕,王利,王伟.区域生态安全概念及评价体系的再认识[J].生态学报,2007,27(4):1627-1637]
- [3] Li Zhongcai, Liu Linde, Sun Yufeng, et al. Assessment method of regional ecological security based on Pressure-State-Response model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6495-6503 [季中才,刘林德,孙玉峰,等.基于PSR方法的区域生态安全评价[J].生态学报,2010,30(23):6495-6503]
- [4] Guyonnet T, Roy S, Koutitonsky V G, et al. Integrating multiple spatial scales in the carrying capacity assessment of a coastal ecosystem for bivalve aquaculture [J]. Journal of Sea Research, 2010, 64 (3): 341-359
- [5] Rajarama T, Das T. Screening for EIA in India: enhancing effectiveness through ecological carrying capacity approach [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92: 140-148
- [6] Dong Wei, Zhang Xianghui, Su De, et al. Progress on forewarning of ecological security [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(12): 97-100 [董伟,张向晖,苏德,等.生态安全预警进展研究[J].环境科学与技术,2007,30(12):97-100]
- [7] Li Xiaoya, Ma Keming, Fu Bojie, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): designing principles and method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 1055-1062 [黎晓亚,马克明,傅伯杰,等.区域生态安全格局:设计原则与方法[J].生态学报,2004,24(5):1055-1062]
- [8] Fu Bojie. Early warning theory on regional eco-environmental issues and its application [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 33(10): 114-119 [傅伯杰.区域生态环境预警的理论及其应

- [J]. 应用生态学报, 1993, 4(4): 436-439]
- [9] Shi Mingkui, Peng Yu, Li Endong, et al. 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 [J]. China Population Resources and Environment, 2005, 15(6): 50-54 [石明奎, 彭昱, 李恩东, 等. 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 [J]. 中国人口、资源与环境, 2005, 15(6): 50-54]
- [10] Gong Jiping, Shi Peiji, Wei Wei. Early warning of ecological safety based on BP artificial neural network—A case study of Gansu Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 211-223 [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 [J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 211-223]
- [11] Xu Mei, Zhu Xiang, Liu Chunla. Early warning of land ecological security in Hunan Province based on RBF [J]. Acta Geographical Sinica, 2012, 67(10): 1411-1422 [徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警 [J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1411-1422]
- [12] Wang Geng, Wu Wei. Research on Region ecological security early warning index: a case of Liaohe River watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3536-3542 [王耕, 吴伟. 区域生态安全预警指数——以辽河流域为例 [J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3535-3542]
- [13] Liu Yaobin, Zhu Shufen. Dynamic assessment and forecasting of provincial eco-environmental quality from matter element model and Markov chain—a case study of Jiangxi Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2): 364-368 [刘耀彬, 朱淑芬. 基于可拓物元-马尔科夫模型的省域生态环境质量动态评价与预测 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 364-368]
- [14] Su Weici. Eco-environmental fragility in Guizhou Karst mountain region and its ecological rehabilitation [J]. China Environmental Science, 2000, 20(6): 547-551 [苏维词. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性及其生态整治 [J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 547-551]
- [15] Guo Yongqi. Forewarning evaluation of farmland ecological security based on punished variable weight: a case of Xinjiang Production and Construction Corps [J]. Areal Research and Development, 2014, 33(5): 149-154 [郭永奇. 基于惩罚型变权的农地生态安全预警评价——以新疆生产建设兵团为例 [J]. 地域研究与开发, 2014, 33(5): 149-154]
- [16] Wu Guancen, Niu Xing. Application of an evaluation model based on punishing variable weight for early warning of land ecological security [J]. Resources Science, 2010, 32(5): 992-999 [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——以淮安市为例 [J]. 资源科学, 2010, 32(5): 992-999]
- [17] Zhao Hongbo, Ma Yanji. 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 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4720-4733 [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 [J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4720-4733]
- [18] Zhang Mengjie, Guan Dongjie, Su Weici. Scenarios simulation and indices thresholds determination of ecological security in Three Gorges Reservoir based on System Dynamics [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 1-15 [张梦婕, 管冬杰, 苏维词. 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定 [J]. 生态学报, 2015, 35(14): 1-15]
- [19] Borja A, Bald J, Franco J, et al. Using multiple ecosystem components in assessing ecological status in Spanish (Basque Country) Atlantic marine waters [J]. Mar Pollute Bull, 2009, 59(123): 54-64
- [20] Zhang Qiang, Xue Huifeng, Zhang Mingjun, et al. Early warning model based on extension analysis for Ecological Security and its application: case study of Shanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4277-4286 [张强, 薛惠锋, 张明军, 等. 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 [J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4277-4286]
- [21] Zhao Hongbo, Ma Yanji. 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 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4720-4733 [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 [J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4720-4733]
- [22] Zhang Mengjie, Guan Dongjie, Su Weici. Scenarios simulation and indices thresholds determination of ecological security in Three Gorges Reservoir based on System Dynamics [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 1-15 [张梦婕, 管冬杰, 苏维词. 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定 [J]. 生态学报, 2015, 35(14): 1-15]
- [23] Borja A, Bald J, Franco J, et al. Using multiple ecosystem components in assessing ecological status in Spanish (Basque Country) Atlantic marine waters [J]. Mar Pollute Bull, 2009, 59(123): 54-64
- [24] Zhang Qiang, Xue Huifeng, Zhang Mingjun, et al. Early warning model based on extension analysis for ecological security and its application: case study of Shanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4277-4286 [张强, 薛惠锋, 张明军, 等. 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 [J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4277-4286]
- [25] Gao Hongjuan, Cai Guangpeng, Luo Xuqiang, et al. Study on warning of farmland ecological security in Guizhou from 2000 to 2010 based on the energy analysis [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(6): 307-310 [郜红娟, 蔡广鹏, 罗绪强, 等. 基于能值分析的贵州省 2000—2010 年耕地生态安全预警研究 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 307-310]
- [26] Wei Xiaodao, Zhou Zhongfa, Wang Yuanyuan. Research on the karst ecological security based on gridding GIS: a case study on the demonstration areas of the rock desertification integrated management in Huajiang of Guizhou [J]. Mountain Research, 2012, 30(6): 681-687 [魏小岛, 周忠发, 王媛媛. 基于格网 GIS 的喀斯特生态安全研究——以贵州花江石漠化综合治理示范区为例 [J]. 山地学报, 2012, 30(6): 681-687]
- [27] Cao Xinxiang. A study on ecological security assessment of tourism destination—the case of Kaifeng City in Henan Province [J]. En-

- vironmental Science and Management 2006 31(3): 39–43 [曹新向. 旅游地生态安全预警评价指标体系与研究方法——以开封市为例[J]. 环境科学与管理 2006 31(3): 39–43]
- [28] Zhang Yuzhen, Li Yanfeng, Duan Yong. Study of ecological security early warning in Minjiang watershed [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition 2012 40(1): 132–137 [张玉珍, 李延风, 段勇. 闽江流域生态安全预警研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版 2012 40(1): 132–137]
- [29] Luo Wenbin, Wu Cifang, Wu Yizhou. Assessment on ecological level of urban land based on matter element analysis: a case study of Binzhou City in Shandong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009 29(7): 3818–3827 [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]
- [30] Yu Fei, Gu Xiaoping, Yuan Shujie J, et al. Evaluation of agro ecological safety in Guizhou Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2011 20(4): 165–171 [于飞, 谷晓平, 袁淑杰, 等. 贵州省农业生态安全性评价[J]. 自然灾害学报 2011 20(4): 165–171]
- [31] An Heping. Present situation and its preventive strategies of soil and water loss in Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996 16(5): 57–64 [安和平. 贵州省水土流失现状及防治对策[J]. 水土保持通报, 1996 16(5): 57–64]
- [32] Chen Qiwei, Xiong Kangning, Lan Anjun. Karst rocky desertification evolution of Guizhou under ecological controlling project [J]. Guizhou Agricultural Sciences 2013 41(7): 195–199 [陈起伟, 熊康宁, 兰安军. 生态工程治理下贵州喀斯特石漠化的演变[J]. 贵州农业科学 2013 41(7): 195–199]
- [33] Yi Wuying, Su Weici. Evaluation of ecological security in the Wujiang river basin using remote sensing and GIS technologies [J]. Carsologica Sinica 2014 33(3): 308–318 [易武英, 苏维词. 基于 RS 和 GIS 的乌江流域生态安全度变化评价[J]. 中国岩溶, 2014 33(3): 308–318]
- [34] Gao Hongjuan, Zhang Chaoqiong. Assessment of landscape ecological risk of Guizhou Province from 2000 to 2020 [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2015 33(2): 144–152 [郭红娟, 张朝琼. 2000–2020 年贵州省景观生态风险评估[J]. 四川农业大学学报 2015 33(2): 144–152]
- [35] Yi Wuying, Su Weici, Zhou Wenlong, et al. An ecological security early warning simulation city based on the CA Model in Huaxi District of Guiyang City, China [J]. Journal of Zhejiang A&F University 2015 32(3): 369–375 [易武英, 苏维词, 周文龙, 等. 基于元胞自动机模型的贵阳市花溪区生态安全预警模拟研究[J]. 浙江农林大学学报, 2015 32(3): 369–375]

## Early-warning Model Based on Extension and Markov for Ecological Security in Guizhou

PAN Zhenzhen<sup>1</sup>, SU Weici<sup>1, 2, 3</sup>, WANG Jianwei<sup>4</sup>

(1. Geography and Tourism College, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. Institute of Mountain Resources of Guizhou Province, Guiyang 550001, China;

3. Key Laboratory of Earth Surface Processes and Environmental Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400047, China;

4. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the related data of ecological security in Guizhou Province from 2002 to 2012, this paper constructed an early-warning index system for Guizhou Province, China from three aspects: pressure, state and response. Testing early warning degrees of ecological security in Guizhou Province from 1990 to 2013 by using the method of punished variable weight and extension analysis model, forecasting ecological security state in Guizhou Province from 2014 to 2020 by the Markov model. The results indicated that: 1) The security grade of Guizhou Province from 1990 to 2013 are divided into: Huge alarm, converting into Heavy alarm, Heavy alarm, converting into Medium alarm, Medium alarm, converting into Light alarm. Overall, the level of ecological security showed an upward trend and the indicator light turned from “red” to “pending”. 2) The warning degree will be Medium alarm and Light alarm in Guizhou Province from 2014 to 2020, the indicator light will be “Yellow” and “Blue”, But it has the trend of deterioration. 3) The main factors which influence the ecological security of Guizhou Province include natural population growth rate, net income of rural households, GDP growth rate, proportion of Rocky desertification, improvement rate of soil and water loss. These are focus of ecological security regulation in the future. These findings could provide a reference for ecological security maintenance for Guizhou province.

**Key words:** Extension and Markov model; ecological security; early-warning model; Guizhou province