

云南省县域森林生态安全评价与空间分析

汤旭^{1,2}, 郑洁¹, 冯彦¹, 李燕坤¹, 王时军¹, 张大红¹

(1. 北京林业大学 经济管理学院, 北京 100083; 2. 中南林业科技大学 经济学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为评估森林生态系统的安全程度, 改进传统的压力-状态-响应(PSR)模型并建立了一个包括森林承载和社会压力 2 类指标的指标体系, 以云南省 129 个区县为样本, 运用模糊物元法来评价该省在 2000, 2005, 2010 和 2015 年的森林生态安全。为动态分析森林生态安全的时空变化规律, 引入了空间相关分析技术。结果表明: ①森林生态安全指数等级最高的区域一般分布在云南省西部和南部, 而最差的在云南省东北部和东南部少数区域。②这 4 个年度的森林生态安全平均值分别为 0.353 4, 0.377 9, 0.311 4 和 0.458 7, 总体呈不断上升趋势。2010 年的平均值意外下降主要是因为国内生产总值(GDP)增长速度过快, 所以应适当降低经济的发展速度。③从时间变化来看, 云南省 99.20% 的县域森林生态安全指数都呈现明显的上升趋势, 其中河口县、屏边县和红河县是改善幅度最大的 3 个县, 这与它们都位于云南省南部的国家重点生态功能区有关。④从空间相关性来看, 4 个年度全局莫兰指数的 $P < 0.01$, 所以云南省各区县森林生态安全指数呈现显著的集聚性, 森林生态安全指数高一高集聚的区县一般分布在云南省西部和南部, 占比 11.63%, 而低—低集聚区县主要分布在东南部和东北部, 占比 10.85%。建议在低值集聚区域限制大型开发, 并进行以植树造林和退耕还林等工程为主的生态修复; 在高值集聚区域可在不破坏生态的前提下适当放宽发展限制。图 3 表 3 参 24

关键词: 生态学; 森林生态安全; 熵权法; 模糊物元法; 空间相关分析; 莫兰指数

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)04-0684-11

County-level forest ecological security evaluation and spatial analysis in Yunnan Province

TANG Xu^{1,2}, ZHENG Jie¹, FENG Yan¹, LI Yankun¹, WANG Shijun¹, ZHANG Dahong¹

(1. School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. College of Economics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: To evaluate forest ecosystem security, this study improved on the traditional “pressure-state-response” (PSR) model and established an index system that included two kinds of indicators: forest carrying capacity and social pressure. Based on samples of 129 counties in Yunnan Province, the fuzzy matter-element method was used to evaluate forest ecological security in the four years of 2000, 2005, 2010, and 2015. To dynamically analyze the temporal and spatial variation of forest ecological security, a spatial correlation analysis technology was introduced and the global Moran index was used. Results revealed that (1) the areas with the highest forest ecological security index level were generally distributed in the west and south of Yunnan; whereas, areas with the worst index level were located in the northeast and southeast. (2) Average values for the forest ecological security index in the four years were 0.353 4 for 2000, 0.377 9 for 2015, 0.311 4 for 2010, and 0.458 7 for 2015 generally showing an upward progression. The average decline in 2010 could mainly be due to the rapid growth of GDP. (3) From a time perspective, 99.20% of the counties in Yunnan showed a clear upward progression in the ecological security index with Hekou, Pingbian, and Honghe, national

收稿日期: 2017-06-27; 修回日期: 2017-11-21

基金项目: 国家林业局 2014 年林业重大问题调研课题(ZDWT201415)

作者简介: 汤旭, 博士研究生, 从事林业经济理论与政策研究。E-mail: 10994254@qq.com。通信作者: 张大红, 教授, 博士生导师, 从事林业经济管理研究。E-mail: zhangdahong591120@163.com

key ecological functional areas in the southern part of Yunnan, having the greatest improvement. (4) For spatial correlation, the global Moran index in the four years measured was $P < 0.01$ with the counties of Yunnan showing strong agglomeration with the forest ecological security index. In the above analysis, the High-High agglomeration counties, generally distributed in western and southern Yunnan, accounted for 11.63%, and the Low-Low agglomeration counties, mainly distributed in southeast and northeast Yunnan, accounted for 10.85%. Thus, large scale development should be restricted in Low-Low agglomeration counties with ecological restoration being carried out based on afforestation and returning farmland to forests, and High-High agglomeration counties could relax development restrictions appropriately without destroying the ecological conditions. [Ch, 3 fig. 3 tab. 24 ref.]

Key words: ecology; forest ecological security; entropy weight method; fuzzy matter element method; spatial correlation analysis; global Moran's index

森林对于人类的可持续发展至关重要。森林不仅能保持生物种群的多样性，还能起到维持生态平衡的作用，然而随着社会经济的发展，人类给森林带来了太多的压力，使得森林不堪重负^[1-2]。人类对林地的占用以及对林木的采伐使得森林的面积与蓄积都在持续减少^[3]，这又会引起水土流失加剧、植被减少、濒危物种消失、气候异常、温室效应增强等后果^[4]，所有这些都威胁人类的可持续发展。对此，人们已逐渐有了清醒的认识。森林是自然生态系统的核心主体，它关系到国家的生态安全。建立一个森林生态安全的监测评估体系具有紧迫性和现实意义。云南地处长江上游，是西南区域的重要生态屏障，但近年来该省经济发展速度较快，连续多年国内生产总值(GDP)增速都保持在 10%以上。该省经济的较快增长是否影响到了森林生态系统的安全，以及森林生态系统在各区县的分布有何特点，对于这些疑问，本研究设计了森林生态安全指数，并结合空间分析技术，动态评估该省森林生态系统状况。MORAES 等^[5]对亚马逊森林的生态安全进行了评价。HAYES 等^[6]对华盛顿地区进行了生态安全评价。刘心竹等^[7]设计了基于省域层面的生态安全综合干扰指数，评估结果为天津、山东极不安全，而海南和西藏属于极安全。陈岩等^[8]通过对全国省域层面林业生态安全的测算，得出新疆、内蒙古、安徽等 9 个区域为预警区域。张智光^[9]认为对于森林生态系统进行监测和预警非常重要。目前，关于县域层面森林生态安全的评价还比较少。对于森林状况的研究，除了应该加强全国和省域层面的研究，还应进一步细化到县域层级，这样才能便于各区县加强林业建设工作。本研究基于云南省 129 个区县在 2000，2005，2010 和 2015 年等 4 个年份的数据，来测算各县域的森林生态安全指数(ecological security index, IES)，并结合 Arc GIS 软件来分析计算结果，然后再借助空间相关分析技术深入研究该省森林生态安全的空间分布特点，并探究适合本地情况的森林生态安全治理政策。

1 评价指标体系构建思路

森林生态安全既包括森林自身的健康程度，也包括它在人类社会压力下的安全程度^[10]，因此，对森林生态安全的考察要从 2 个方面着手(图 1)。一方面，区位条件、森林数量、森林质量、森林灾害等因素决定了森林生态系统的健康程度。另一方面，人类活动对森林发展的影响越来越大，而这种影响既有正面的也有负面的，林地占用、林木采伐、森林旅游对森林的破坏较大，而退耕还林、植树造林、设立自然保护区等又会提高森林生态系统的健康程度^[11]。基于以上分析，本研究从影响森林生态安全的 2 个方面出发，通过设计森林生态安全指数来评估其安全的程度。压力-状态-响应(PSR)模型是评价生态安全最常用的模型。本研究在该模型的基础上进行了改进，将该模型的压力、状态和响应 3 类指标重组为森林承载和人类社会压力 2 类指标。具体指数构建步骤如下：首先采取频度分析法，从

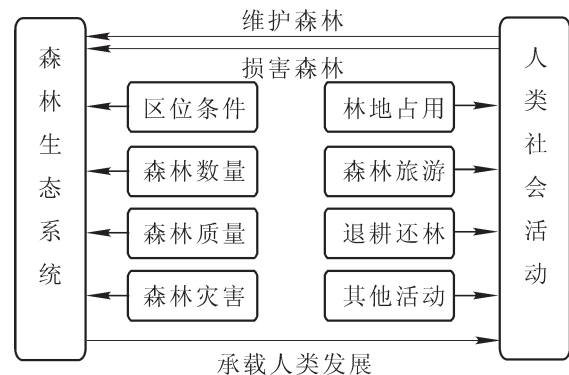


图 1 森林生态安全的影响因素

Figure 1 Influencing factors of forest ecological security

生态安全的定义出发,通过查阅大量引用率高、作者权威度高和期刊级别高的生态安全研究文献^[12-14],初步采纳频率较高的31个指标;然后通过与林学、生态学专家的技术科学及专业模型研究和专家会议咨询,不断修正指标体系,确定了28个指标;最后通过SPSS软件做主成分分析,经旋转后生成9个因子,其累计方差 $\geq 85\%$,然后选取因子负荷系数 ≥ 1.0 的23个指标;最后经过2017年2月对云南省的深入调研,依据数据的可获得性,又删除了可获取度较低的水土流失强度和工业二氧化硫排放量2个指标,最终确定了21个指标。依据指标筛选过程,本研究设计了森林生态安全指标体系,其中森林承载指标15个,社会压力指标6个,具体如表1所示。

表1 森林生态安全指标体系

Table 1 Forestry ecological security index system

结构	亚结构	指标名称	指标性质	公式	指标权重	
森林承载指标	基础条件	年降水量	正向指标	直接获取	0.050 4	
		年平均气温	正向指标	直接获取	0.052 6	
		年日照时数	正向指标	直接获取	0.052 8	
		土壤有机质含量	正向指标	直接获取	0.048 5	
	森林数量	森林覆盖率	正向指标	森林面积/国土面积	0.052 2	
		林地面积占比	正向指标	林地面积/国土面积	0.051 0	
	森林质量	森林单位面积蓄积量	正向指标	森林蓄积量/森林面积	0.050 5	
		公益林占比	正向指标	公益林面积/森林面积	0.050 2	
		天然林占比	正向指标	天然林面积/森林面积	0.050 9	
		混交林占比	正向指标	混交林面积/森林面积	0.045 7	
		天然林单位面积蓄积量	正向指标	天然林蓄积量/天然林面积	0.049 4	
		灾害情况	森林火灾受灾面积占比	逆向指标	森林火灾面积/森林面积	0.053 7
			森林有害生物致灾面积占比	逆向指标	有害生物致灾面积/森林面积	0.053 6
	干旱致灾面积占比		逆向指标	干旱致灾面积/森林面积	0.053 2	
	社会压力指标	一般压力	洪涝致灾面积占比	逆向指标	洪涝致灾面积/森林面积	0.053 5
人口密度			逆向指标	年末人口数/国土面积	0.053 5	
单位面积能源消耗量			逆向指标	能源消耗量/国土面积	0.053 1	
人类维护		林木采伐强度	逆向指标	林木采伐量/森林蓄积量	0.052 4	
		新增造林面积占比	正向指标	年度造林面积/森林面积	0.033 6	
		退耕还林面积占比	正向指标	退耕还林面积/森林面积	0.006 0	
		自然保护区面积占比	正向指标	自然保护区面积/国土面积	0.033 2	

1.1 森林承载指标

森林承载指标反映森林自身的健康程度以及森林支持人类发展的能力,它主要由基础条件、森林数量、森林质量和灾害情况等4类指标构成。基础条件指标中,年降水量、年平均气温以及年日照时数对森林植被的生长有决定性影响。除此之外,土壤有机质含量反映森林土壤的肥沃程度,越肥沃则越有利于植物的生长。以上指标都能正面影响森林覆盖和森林质量,所以它们都属于正向指标。森林数量类指标包括森林覆盖率和林地面积占比2个指标。前者反映森林覆盖的面积,该指标数值越高,则森林面积越大,森林生态系统也就越完备^[15]。后者不仅包括森林,还包括城市公园和苗圃的用地面积,这些超出森林面积的部分不仅可为人类提供休憩场所,还可为人类提供更多的木材和苗木,因此,林地面积占比越高,则森林生态系统越安全。以上2个指标都能正面反映森林生态安全状况,所以它们都属于正向指标。森林质量指标中,森林单位面积蓄积量反映森林的茂密程度和材积密度,它是反映森林质量的核心指标。由于公益林不允许采伐,它的受保护程度较高,所以公益林占比越高则森林系统越安全。天然林的植物群落比人工林更为健全,所以天然林占比越高则森林质量越高^[16-17]。在森林防火以及病虫害防治方面混交林比纯林的效果更好,所以本研究选用混交林占比来反映森林的质量。天然林单位面积蓄积量能反映天然林的树木密度和健康程度^[18]。这5个指标能从不同方面来正面反映森林的质量,属于正向指标。由于森林火灾及病虫害对森林威胁较大,如果灾情没有得到有效控制,则会使森林树木大面积消

亡，所以，本研究考察了森林火灾致灾率和森林有害生物致灾率这2个指标。除此之外，干旱与洪涝也会对森林植被造成负面影响，所以本研究将干旱致灾面积占比与洪涝致灾面积占比这2个指标纳入了对森林生态安全的评价体系。以上4个指标都是从负面反映森林生态安全状况，属于逆向指标。

1.2 社会压力指标

伴随人类经济的发展以及人类活动范围的扩大，森林面积和森林蓄积量急剧下降，但是，当人们意识到这种发展模式不可持续时，又会通过各种生态建设项目来维护森林发展^[19]，因此，对社会压力需要同时考察2个方面指标：一类是一般压力指标，另一类是维护活动指标。一般压力中考察的有人口密度、单位面积能源消耗和林木采伐强度这3个指标。人口密度越大，反映人类对林地的挤占以及对森林资源的索取越大。单位面积能源消耗越大，反映废水废气等各类污染物对森林的损害就越严重。林木采伐强度是森林面临的最直接威胁。以上3个指标都反映森林面临的负面压力，属于逆向指标。随着经济水平的提高和森林保护意识的增强，人类已开始采取各种措施来保护森林，因此，本研究从自然保护区建设、植树造林和退耕还林这3个方面来考察人类的维护活动。无论是自然保护区面积，还是植树造林和退耕还林的面积，都能反映人类对动植物保护的力度和对森林生态修复的重视程度，因此，它们的面积越广，则森林生态系统越安全^[20]。以上3个指标都反映人类对森林的有益维护，属于正向指标。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区域概况

云南省地处中国西南，总面积为39.4万 km^2 ，森林资源丰富，森林覆盖率为54%，活立木蓄积量高达18.75亿 m^3 ，高等植物数量占全国的53.3%，陆地脊椎动物数量占全国的52.8%。云南位于长江上游，属于长江经济带发展区域，生态区位十分重要，该省的森林状况既影响本地的区域发展，也会影响长江中下游的发展。

2.2 数据来源

本研究的样本为云南省129个区县，涉及2000，2005，2010和2015年等4个年份，所有数据来源于生态安全(森林)指数研究项目。数据收集分为5步：首先于2017年2月在昆明组织数据培训会议；云南省林业厅向云南省林业调查规划院和各县分解数据任务；云南省林业调查规划院和各县林业局完成数据上报；云南省林业调查规划院对各县数据进行审核；课题组进行数据改错，所有工作于2017年5月完成。

3 研究方法与模型

由于生态安全概念比较模糊，没有明确的标准，因此，本研究将模糊数学和物元法结合起来采用模糊物元法研究森林生态安全的各项指标。在计算森林生态安全指数时，如何对指标赋权是一个关键问题，由于主观赋权方法受专家判断的影响较大，因此，本研究从客观赋权法中选用熵权法来计算指标权重。

3.1 熵权法

根据信息论基本原理，系统的有序程度可分为有序和无序2种状态，系统的有序程度可用信息来表示，而无序程度则用熵来度量，熵值越小的指标提供的信息量越大。本研究基于信息论熵权原理，先构建判断矩阵，然后对正向指标和逆向指标分别进行标准化，计算每个指标的信息效应价值，最后得出各个指标的权重。

3.2 模糊物元法

由于森林生态安全指标体系指标种类繁多，为解决各类指标不相容的问题，本研究决定采取模糊物元法，该方法用 M ， C ， x 分别表示模糊物元、特征、模糊量值，用 m 和 n 分别表示样本数和指标数， M_i 表示第 i 个样本($i=1, 2, \dots, m$)， C_j 表示第 j 个事物的第 j 项指标($j=1, 2, \dots, n$)， x_{ij} 表示第 i 个样本第 j 项指标的模糊量值($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)，则复合物元 R_m 如式(1)所示。

$$R_{nm} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ C_2 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2.1 计算从优隶属度 采用以下2个公式计算各指标 C_j 相对于标准事物的从优隶属度^[13]。

$$\text{越大越优型指标 } u_{x_j} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad (2)$$

$$\text{越小越优型指标 } u_{x_j} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中: u_{x_j} 表示各指标的从优隶属度($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别表示各指标中的最大值和最小值。标准化后新的模糊物元 R_{nm} 见式(4)。

$$R_{nm} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & u_{11} & u_{21} & \cdots & u_{m1} \\ C_2 & u_{12} & u_{22} & \cdots & u_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & u_{1n} & u_{2n} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2.2 标准模糊物元与差平方模糊物元 因为指标体系中各特征值中 u_{x_j} 的标准化最大值均为1, 所以得出标准模糊物元 R_{0n} :

$$R_{0n} = \begin{bmatrix} N_{0n} \\ C_1 & u_{x_{0n}} \\ C_2 & u_{x_{0n}} \\ \vdots & \vdots \\ C_n & u_{x_{0n}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

差平方模糊物元 R_{Δ} 由 $\Delta_j = (u_{x_j} - u_{x_0})^2$ 和 R_{0n} 来计算得出。

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & \cdots & \Delta_{m1} \\ C_2 & \Delta_{12} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & \Delta_{1n} & \Delta_{2n} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.3 欧氏贴近度与森林生态安全综合评价

欧氏贴近度是通过比较某方案与最优方案的贴近程度来测算该方案的优劣程度, 越接近则该方案越优。在对指标进行熵权法赋权与模糊物元法标准化之后, 本研究采用该方法来计算森林生态安全指数。复合模糊物元 R_{PH} 的欧氏贴近度计算采用 $M(*, +)$ 方法。

$$R_{PH} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ P_{H1} & P_{H1} & P_{H2} & \cdots & P_{Hm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中: $P_{Hi} = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j \Delta_{ij}}$ ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$), w_j 为第 j 个指标的熵权权重, Δ_{ij} 为第 i 个样本县第 j 个指标的差平方。 R_{PH} 为 m 个样本县森林生态安全指数的集合, P_{Hi} 即为第 i 个样本县的森林生态安全指数。

3.4 空间相关分析

空间相关分析属于地理信息的研究方法, 它可以分析各区县的森林生态安全指数是否具有空间上的集聚性。本研究对云南省各县域森林生态安全指数相关程度的测算从全局和局部2个角度来进行。

3.4.1 全局自相关 对全局自相关的检验采用全局莫兰指数(Moran's I), 它能够反映森林生态安全指数在一个区域的集聚程度。该指数取值在-1到1之间。 $I > 0$, 表示空间正相关, 空间集聚性较高; $I < 0$

代表空间负相关，空间离散程度较高； $I=0$ ，表示为随机的空间分布。

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n w_{ik} (y_i - \bar{y})(y_k - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n w_{ik} \right) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式(8)中： I 为全局莫兰指数， n 是区县总数， i 和 k 分别代表第 i 个样本县和第 k 个样本县， w_{ik} 是空间权重矩阵(相邻区县赋值为1，不相邻则赋值为0)， y_i 和 y_k 分别为第 i 个区县与第 k 个区县的森林生态安全指数值， \bar{y} 为云南省129个区县森林生态安全平均值。

3.4.2 局部自相关 局部自相关用局部莫兰指数(LISA, I_i)来检验，主要用来确定区域内各地理单元之间的相关性。该指数的取值也在-1到1之间，数值越高，则该地理单元与临近区域的相关性越高，反之则越低，若取值为0，则不相关。

$$I_i = \frac{(y_i - \bar{y}) \sum_{k=1}^n w_{ik} (y_k - \bar{y})}{S^2} \quad (9)$$

式(9)中： I_i 是局部莫兰指数， n 为样本县的总数， y_i ， y_k 分别为第 i 个样本县和第 k 个样本县的森林生态安全指数值， \bar{y} 为全省所有区县森林生态指数的平均值， w_{ik} 是空间权重矩阵， S^2 为样本方差。

4 结果与分析

4.1 指标权重计算结果

从表1可知：森林火灾致灾面积占比的权重最高，达0.0537，其次是森林有害生物致灾面积占比，再次是人口密度，说明各区县的森林生态安全状况受以上3个指标的影响较大。

退耕还林面积占比的权重最小，仅为0.0060，说明各区县在这个指标上差异较小，因此该指标对综合指数的影响最小。自然保护区面积占比和新增造林面积占比的权重都约为0.0330，说明建立自然保护区或新增造林对森林维护的意义要大于退耕还林，所以各政府森林维护的工作应着重于自然保护区保护和植树造林方面。

4.2 森林生态安全值计算结果与 Arc GIS 分析

本研究运用模糊物元法公式和欧氏接近度式(1)~式(7)，并结合熵权结果，计算2000，2005，2010和2015年云南省各区县的森林生态安全指数，然后运用Arc GIS软件，依据自然断裂法将指数划分为5个等级，并将这4年的森林生态安全值分别用地理信息系统(GIS)图绘制出来(图2)。从图2可见：森林生态安全等级最高的区域一般分布在云南省西部和南部，西部主要以福贡、兰坪、泸水等县为中心，南部主要以景洪、金平等县为中心。森林生态安全等级最差的区域一般分布在云南省东北部和东南部少数区域，东北部以昭通市为中心，东南部以丘北县为中心。4个年度的森林生态安全指数平均值分别为0.3534，0.3779，0.3114和0.4587，反映云南省森林生态安全总体上呈不断上升趋势。2010年的平均值意外下降主要在于单位面积能源消耗量和木材采伐强度这2个逆向指标的大幅上升。这2个指标的权重分别达0.0531和0.0524，在其他19个指标每年变化不大的情况下，森林生态安全指数受这2个指标影响较大，而这2个指标又与GDP增长率密切相关。从2006年开始，云南省GDP加速增长，2006年至2010年间的年均增长率分别达11.9%，12.2%，10.6%，12.1%，12.3%，远远超过2005年9.0%的增长水平。过快的GDP增长必然带来能源消耗量和木材采伐量的增加，所以给森林施加了太多的负面压力，使得森林生态安全指数的平均值意外下降。从2014年开始，云南省GDP增长速度开始下降，2014和2015年增长率分别为8.1%和8.7%，这使得2015年的森林生态安全指数大幅上升。从2000年至2015年的森林生态安全指数平均数的变化可以看出，当经济增长过快时，会对森林生态安全指数有负面影响，而经济的平稳增长则对森林生态安全指数的改善有促进作用，这是因为适当降低经济的发展速度才能更好协调经济发展与生态保护之间的矛盾。从历年最高值来看，2000年森林生态安全指数最高值出现在云南南部的勐腊，2005年森林生态安全指数最高值出现在南部的绿春县，2010和2015年的最高值都在西北部的贡山县，反映2005之前云南省南部的森林生态安全状况较好，自2010年之后，西

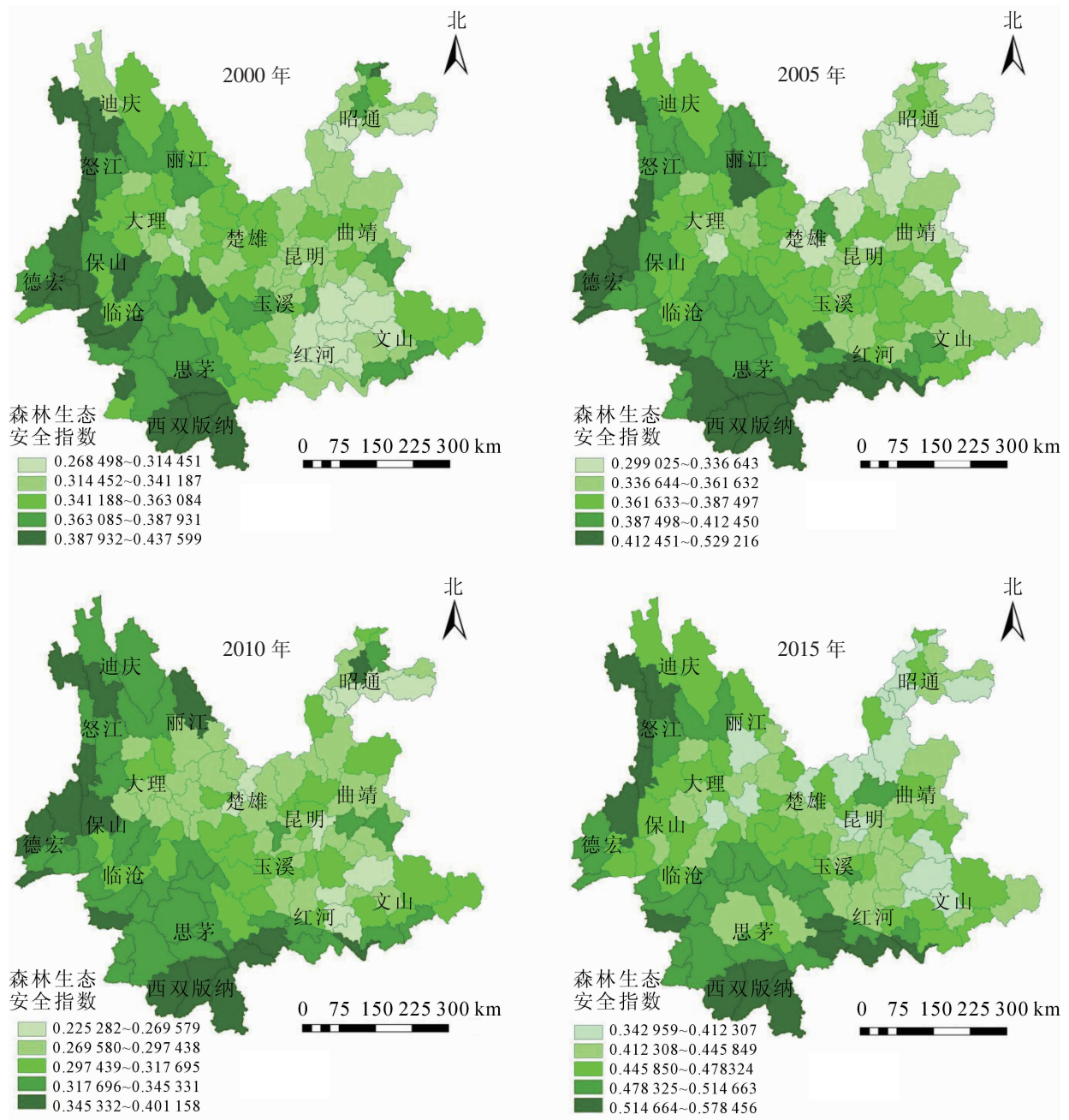


图2 2000, 2005, 2010, 2015年云南省县域森林生态安全空间分布

Figure 2 Forestry ecological security index space distribution of Yunnan from 2000 to 2015

北部的森林生态指数改善较好。从历年最低值来看, 2000, 2005, 2010 和 2015 年的森林生态安全指数最低值分别出现在中东部的弥勒县、东北部的昭通、北部的元谋县、中部的呈贡县, 反映云南省中部、东北部的森林生态安全状况较差。为具体考察各县森林生态安全的变化, 本研究将各县 4 个年度的森林生态安全指数绘制成图 3。

从图 3 可见: 云南省的国家重点生态功能区主要分布在云南省西北部和南部, 西北部生态功能区覆盖贡山、维西、香格里拉、福贡等县。南部生态功能区覆盖勐海、景洪、勐腊等县。这 2 个区域的森林生态安全指数平均数高于其他地区。国家重点开发区主要覆盖中部以昆明市为中心的城市圈。从时间变化来看, 云南省 99.20% 的县域森林生态安全指数都呈现比较明显的上升趋势, 原因在于云南省这几年森林维护的投入较大, 从而使得森林防火、木材采伐的压力较小。与 2000 年比, 增幅最大的是河口县(增幅 65.54%), 其次是屏边县(增幅 64.89%)和红河县(增幅 61.55%), 这 3 个县都位于云南省南部, 基本都属于国家生态功能区范围, 反映这几年南部的森林维护工作较好, 从而使得指数上升较大。

虽然这 4 个年度的总体形势趋好，但东北部的水富县比 2000 年下降了 14.22%，主要是因为这几年经济增长过快。2015 年昆明市盘龙区的森林生态安全指数比 2010 年下降了 4.98%，因为该区属于国家级重点开发区。总体而言，2 个区县森林生态安全指数的下降主要在于这几年能源消耗与采伐强度增加，使得森林发展面临的压力加大。为了解决这个问题，这 2 个区县应适当减缓经济发展步伐，以投入更多精力到退耕还林、植树造林等森林维护工作中去。

4.3 空间相关分析

4.3.1 全局自相关 依据式(8)，运用 GeoDA 软件，得到 4 个年度的检验结果，如表 2 所示。从检验结果来看，都通过了 $P \leq 0.01$ 的检验，表明全局自相关在 99.9% 置信度下是显著的。从时间变化来看，莫兰指数从 2000 年到 2015 年呈下降趋势，表明云南省县域间的集聚状况有所下降。下降的原因在于该省在国家功能区规划的基础上，又新增了省级重点生态功能区和省级重点开发区，而这些区域互相交错相接，使得森林生态安全指数的集聚性下降。

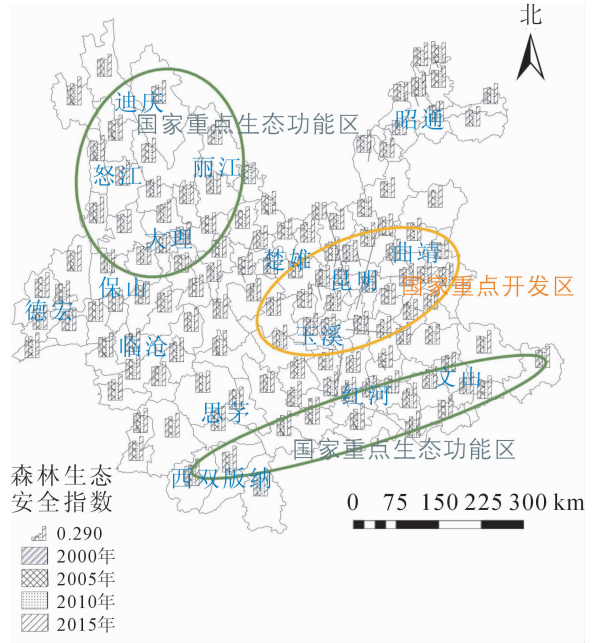


图 3 云南省县域森林生态安全指数及主体功能区
Figure 3 County forest ecological security index and main function areas in Yunnan

表 2 云南省森林生态安全指数全局自相关检验

Table 2 Global autocorrelation test of forest IES in Yunnan

年份	莫兰指数	期望值	平均值	标准误差	T	P
2000	0.557 0	-0.008 1	-0.007 5	0.058 7	9.619 8	0.001
2005	0.517 3	-0.008 1	-0.010 3	0.056 2	9.392 0	0.001
2010	0.504 5	-0.008 1	-0.008 6	0.056 9	9.024 1	0.001
2015	0.459 1	-0.008 1	-0.011 2	0.056 2	8.370 2	0.001

说明：随机性检验使用 999 置换检验

4.3.2 局部自相关 依据局部自相关式(9)进行计算，结果表明：①森林生态安全指数高-高集聚区县一般分布在云南省西部和南部，这与云南省国家重点生态功能区的建设密切相关。低-低集聚区县稍显分散，一般分布在东南部和东北部；②从各年显著聚类的变化来看，2000，2005，2010 和 2015 年高一高集聚区县分别有 24 个、19 个、21 个和 15 个，而低-低集聚区县变化不大，这 4 个年度分别有 2 个、1 个、1 个和 4 个。从表 3 可以看出：高一高集聚区县和低-低集聚区县分布较广，呈现出比较明显的二元结构。针对这个空间分布，各地政府可以采取相应的森林保护政策：在低值集聚区域限制大型开发，并以植树造林和退耕还林等工程为主进行生态修复；在低-高集聚区域应加强以封山育林为主的森林保护工作；在高值集聚区域可在不破坏生态的前提下适当放宽发展限制。

表 3 2015 年森林生态安全指数 LISA 集聚结果

Table 3 LISA results of forest ecological security index in 2015

类型	显著数/个	区县	占比/%
高一高	15	维西、福贡、兰坪、泸水、盈江、梁河、耿马、澜沧、思茅、勐海、景洪、勐腊、江城、绿春、金平	11.63
低-低	14	彝良、昭通、鲁甸、大姚、昆明、呈贡、澄江、晋宁、宜良、丘北、泸西、弥勒、开元、罗平	10.85
低-高	4	德钦、景谷、盈江、个旧	3.10
高一低	7	大理、广南、陆良、巧家、大关、寻甸、绥江	5.43

5 结论与讨论

5.1 结论

从指标体系的权重来看, 21个指标中, 森林火灾致灾面积占比的权重最高, 其次是森林有害生物致灾面积占比和人口密度。权重最小的退耕还林面积占比, 仅为0.0060。

从空间分布来看, 2000, 2005, 2010和2015年这4个年度森林生态安全指数等级最高的区域一般分布在云南省西部和南部, 西部主要以福贡、兰坪、泸水等县为中心, 南部主要以景洪、金平等县为中心。森林生态安全等级最差的区域一般分布在云南省东北部和东南部少数区域, 东北部以昭通市为中心, 东南部以丘北县为中心。

从总体趋势来看, 这4个年度的森林生态安全指数平均值呈不断上升趋势。2010年的平均值意外下降主要在于单位面积能源消耗量和木材采伐强度这2个逆向指标的大幅上升。这2个指标与GDP增长率密切相关, 所以应适当降低经济发展速度以利于处理经济发展与生态保护之间的矛盾。

从各县的时间变化来看, 云南省99.20%的县域的森林生态安全指数都呈现比较明显的上升趋势, 其中增幅最大的是河口县, 其次是屏边县和红河县, 这3个县都位于云南省南部的国家重点生态功能区, 反映这几年南部森林维护成效卓越, 从而使得指数上升较大。总体呈下降趋势的只有东北部的水富县, 需要加强森林维护措施以扭转不利趋势。

从空间相关性来看, 云南省各区县森林生态安全指数呈现比较显著的集聚性, 即森林生态安全指数高值的区县互相集聚, 而低值的区县也互相集聚。森林生态安全指数高-高集聚区县一般分布在云南省西部和南部, 这与云南省国家重点生态功能区的建设密切相关, 而低-低集聚区县稍显分散。

5.2 讨论

本研究的森林生态安全评价指标体系还存在需改进之处: 首先是本研究许多数据都是引用的统计数据, 实测数据较少, 因此, 在评估森林生态安全时难免出现失真的现象; 其次, 该指标体系对区位条件指标考察较少, 纬度、坡度、风向等因素还没有考虑进来, 而这些因素对森林生态安全都有实质影响。除此之外, 本研究在森林生态安全指标体系的赋权方法上也存在一定局限性, 虽然熵权法属于客观赋权方法, 但它只能从数理角度给差异较大的指标赋予较高权重, 而无法识别生态意义上各指标的重要程度, 因此它难以克服权重设置不符合实际的问题。

在后续的研究中: ①引入实测数据, 同时引入更多技术方法并进行结果比较, 使森林生态安全指数的评价方法更加科学^[21-22], 提升森林生态安全评价的理论层次^[23-24]。如引入标准离差法、CRIIC等多种赋权方法, 它们都属于客观赋权法, 其中前者根据标准差的大小来赋权, 而后者依据指标间的冲突来赋权。另外, 引入专家法, 通过综合2类赋权方法来得到一个最符合实际的指标权重。②将不同质量不同林分的森林折算成标准森林面积, 这样可以尽量避免指标选取和指标赋权方面的争议。

6 参考文献

- [1] 米锋, 谭曾豪迪, 顾艳红, 等. 我国森林生态安全评价及其差异化分析[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 107 - 115.
MI Feng, TAN Zenghaodi, GU Yanhong, *et al.* Difference analysis and evaluation of Chinese forest ecological security [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, 51(7): 107 - 115.
- [2] 王金龙, 杨伶, 李亚云, 等. 中国县域森林生态安全指数: 基于5省15个试点县的经验数据[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6636 - 6645.
WANG Jinlong, YANG Ling, LI Yayun, *et al.* The country forest ecological security index of China: empirical data from fifteen experimental unit countries in five provinces [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(20): 6636 - 6645.
- [3] 李国伟, 赵伟, 魏亚伟, 等. 天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 984 - 992.
LI Guowei, ZHAO Wei, WEI Yawei, *et al.* Evaluation on the influence of natural forest protection program on forest ecosystem service function in Changbai Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(4): 984 - 992.
- [4] 吴霜, 延晓冬, 张丽娟. 中国森林生态系统能值与服务功能价值的关系[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 334 - 342.

- WU Shuang, YAN Xiaodong, ZHANG Lijuan. The relationship between forest ecosystem emergy and forest ecosystem service value in China [J]. *Acta Geogra Sin*, 2014, **69**(3): 334 – 342.
- [5] MORAES R, LANDIS W G, MOLANDER S. Regional risk assessment of a Brazilian rain forest reserve [J]. *Hum Ecol Risk Assess*, 2002, **8**(7): 1779 – 1803.
- [6] HAYES E H, LANDIS W G. Regional ecological risk assessment of a near shore marine environment: Cherry Point, WA [J]. *Hum Ecol Risk Assess*, 2004, **10**(2): 299 – 325.
- [7] 刘心竹, 米锋, 张爽, 等. 基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价[J]. *生态学报*, 2014, **34**(11): 3115 – 3127.
- LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, *et al.* Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(11): 3115 – 3127.
- [8] 陈岩, 张智光, 谢煜, 等. 中国省域林业生态安全格局的预警性测度: 生态与产业共生的视角[J]. *农林经济管理学报*, 2015, **14**(5): 480 – 489.
- CHEN Yan, ZHANG Zhiguang, XIE Yu, *et al.* China's provincial spatial distribution for measuring forest ecological security: based on ecology-industry symbiosis [J]. *J Agro-For Econ Manage*, 2015, **14**(5): 480 – 489.
- [9] 张智光. 基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想[J]. *生态学报*, 2013, **33**(4): 1326 – 1336.
- ZHANG Zhiguang. Methodology for measuring forestry ecological security based on ecology-industry symbiosis: a research framework [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(4): 1326 – 1336.
- [10] 刘婷婷, 孔越, 吴叶, 等. 基于熵权模糊物元模型的我国省域森林生态安全研究[J]. *生态学报*, 2017, **37**(15): 4946 – 4955.
- LIU Tingting, KONG Yue, WU Ye, *et al.* Provincial forest ecological security evaluation in China based on the entropy weight of the fuzzy matter-element model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(15): 4946 – 4955.
- [11] 张燕如, 梁丽壮, 牛树奎, 等. 山西省太岳山景观生态质量评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, **33**(4): 599 – 604.
- ZHANG Yanru, LIANG Lizhuang, NIU Shukui, *et al.* Ecological landscape quality of Taiyue Mountain in Shanxi [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(4): 599 – 604.
- [12] 冯彦, 郑洁, 祝凌云, 等. 基于 PSR 模型的湖北省县域森林生态安全评价及时空演变[J]. *经济地理*, 2017, **37**(2): 171 – 178.
- FENG Yan, ZHENG Jie, ZHU Lingyun, *et al.* County forest ecological security evaluation and spatial analysis in Hubei Province based on PSR and GIS [J]. *Econ Geogr*, 2017, **37**(2): 171 – 178.
- [13] 南颖, 吉喆, 冯恒栋, 等. 基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价[J]. *生态学报*, 2013, **33**(15): 4790 – 4798.
- NAN Ying, JI Zhe, FENG Hengdong, *et al.* On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS & GIS [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(15): 4790 – 4798.
- [14] 段彦博, 雷雅凯, 马格, 等. 郑州市生态系统服务价值时空变化特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, **34**(3): 511 – 519.
- DUAN Yanbo, LEI Yakai, MA Ge, *et al.* Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Zhengzhou [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(3): 511 – 519.
- [15] 陈道军, 瞿王龙, 李育才, 等. 甘肃省森林生态安全动态评价研究[J]. *草业学报*, 2016, **25**(12): 188 – 193.
- CHEN Daojun, QU Wanglong, LI Yucai, *et al.* Study on forest ecological dynamic security in Gansu Province [J]. *Acta Pratacul Sin*, 2016, **25**(12): 188 – 193.
- [16] 苏子友, 潘发明, 唐庆良, 等. 川西南山地区主要森林类型生态安全评价研究[J]. *四川林业科技*, 2016, **37**(6): 27 – 31.
- SU Ziyou, PAN Faming, TANG Qingliang, *et al.* A study of the ecological security problem of main forest types in mountainareas in southwest Sichuan [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2016, **37**(6): 27 – 31.
- [17] 周亚东. 基于景观格局与生态系统服务功能的森林生态安全研究[J]. *热带作物学报*, 2015, **36**(4): 768 – 772.
- ZHOU Yadong. Forest ecological security based on landscape pattern analysis and ecosystem service assessment [J]. *Chin J Trop Crops*, 2015, **36**(4): 768 – 772.

- [18] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. 地理科学, 2015, **35**(6): 790 – 797.
XIE Yuchu, GONG Jie, ZHANG Lingling. Dynamics of landscape ecological security based on PSR model in Bai-longjiang River Watershed [J]. *Sci Geogra Sin*, 2015, **35**(6): 790 – 797.
- [19] 郑永贤, 薛菲, 张智光. 森林旅游景区生态安全 IRDS 模型实证研究[J]. 资源科学, 2015, **37**(12): 2350 – 2361.
ZHENG Yongxian, XUE Fei, ZHANG Zhiguang. Ecological security measurement using the IRDS model in forest scenic spots [J]. *Resour Sci*, 2015, **37**(12): 2350 – 2361.
- [20] 侯鹏, 杨旻, 翟俊, 等. 论自然保护地与国家生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, **36**(3): 420 – 428.
HOU Peng, YANG Min, ZHAI Jun, *et al.* Discussion about natural reserve and construction of national ecological security pattern [J]. *Geogr Res*, 2017, **36**(3): 420 – 428.
- [21] 张频, 张邦文, 蔡海生, 等. 江西省林业生态安全物元分析评价[J]. 江西农业大学学报, 2013, **35**(4): 791 – 797.
ZHANG Pin, ZHANG Bangwen, CAI Haisheng, *et al.* Evaluation of forestry ecological security based on matter element analysis [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2013, **35**(4): 791 – 797.
- [21] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 等. 基于 3S 技术的图门将流域湿地生态安全评价与预警研究[J]. 生态学报, 2014, **34**(6): 1379 – 1390.
ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, *et al.* Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(6): 1379 – 1390.
- [22] 李虹, 唐秀美, 赵春江, 等. 基于力矩平衡点法的北京市生态系统服务价值时空分布[J]. 农业机械学报, 2015, **46**(11): 151 – 156.
LI Hong, TANG Xiumei, ZHAO Chunjiang, *et al.* Temporal and spatial distribution of ecosystem service value in Beijing based on torque balance point method [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2015, **46**(11): 151 – 156.
- [23] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱: 基于 Citespace 的计量分析[J]. 生态学报, 2014, **34**(13): 3693 – 3703.
QIN Xiaonan, LU Xiaoli, WU Chunyou. The knowledge mapping of domestic ecological security research: bibliometric analysis based on citespace [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(13): 3693 – 3703.
- [24] 赵筱青, 王兴友, 谢鹏飞, 等. 基于结构与功能安全性的景观生态安全时空变化: 以人工园林大面积种植区西盟县为例[J]. 地理研究, 2015, **34**(8): 1581 – 1591.
ZHAO Xiaqing, WANG Xingyou, XIE Pengfei, *et al.* Spatial-temporal changes of landscape eco-security based on structure and function safety: a case study of a large artificial forest planted area in Ximeng County, China [J]. *Geogr Res*, 2015, **34**(8): 1581 – 1591.