

DOI: 10.5846/stxb201606151157

顾艳红, 张大红. 省域森林生态安全评价——基于 5 省的经验数据. 生态学报, 2017, 37(18): 6229-6239.

Gu Y H, Zhang D H. Evaluation of the provincial forest ecological security based on empirical data from five provinces. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6229-6239.

省域森林生态安全评价 ——基于 5 省的经验数据

顾艳红^{1,*}, 张大红²

1 北京林业大学理学院, 北京 100083

2 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

摘要:生态安全是国家安全体系的重要组成部分。面对严峻的生态环境形势,以及大气污染、水污染、土壤污染等严重的生态环境问题,改善生态环境的需求和呼声越来越迫切。作为陆地生态系统的主体和重要资源,森林是人类生存发展的重要生态保障,森林关系国家生态安全。基于森林生态系统与自然、人类社会系统的交互关系,从森林资源状况、地理气候条件、地区社会经济压力、人类管护响应状况四个方面构建省域森林生态安全评价指标体系,并建立森林生态安全指数模型。选取我国五个具有代表性的省份:贵州、湖北、浙江、吉林、青海作为试点省份,对其 2004—2014 年的森林生态安全状况进行评价和对比。结果表明:影响森林生态安全状况的最主要因素是森林资源类因子,在研究期内,5 省森林生态安全状况大体上处于改善状态,但省与省之间森林生态安全状况差异显著,吉林省在研究期内森林生态安全整体状况最好,青海省森林生态安全状况较脆弱。在发展经济的同时,应该加强造林,重视对森林资源的管护,尤其要注意对天然林的保护,维护森林生态安全。

关键词:森林生态安全;指标体系;评价模型;评价分析

Evaluation of the provincial forest ecological security based on empirical data from five provinces

GU Yanhong^{1,*}, ZHANG Dahong²

1 College of Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 College of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Ecological security is an important component of national security. The ecological situation in some areas has reached a point of extreme gravity. Air pollution, water pollution, soil pollution, and other environmental problems have garnered increasing attention of the government and citizens. The people in these places are eager to improve the ecological environment. As an important part of the terrestrial ecosystem, forests safeguard the ecology and provide resources for the survival and development of human society; thus, forests play an important role in the national ecological security. Based on the interaction among the forest ecosystem, nature, and human society, an evaluation index system of the provincial ecological security was established from four aspects, such as the status of forest resources, geo-climatic conditions, socio-economic pressure, the level of forest resource management practices and response to pressure. Accordingly, the annual forest ecological security situation (2004—2014) of Guizhou Province, Hubei Province, Zhejiang Province, Jilin Province and Qinghai Province was evaluated based on the forest ecological security index model. The results indicated that the status of forest resources was the major factor among the four indices. The overall situation of the forest ecological security in the

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2015ZCQ-LY-01);国家林业局业务委托项目(ZDWT-2014-16, ZDWT-2015-9)

收稿日期:2016-06-15; 网络出版日期:2017-04-25

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

five provinces listed above tended to improve over the study period. However, significant differences were observed among them. The status of the forest ecological security in Jilin Province was superior to that of the other provinces, while Qinghai exhibited significantly lower values of the Forest Ecological Security Index (FESI). In the process of economic development, afforestation, protection of existing forests, especially the natural forest, should be strengthened to maintain the forest ecological security.

Key Words: forest ecological security; index system; evaluation model; evaluation and analysis

森林是陆地上面积最大、生物总量最高的生态系统,世界上有半数以上的生物都栖息或生长在森林中,对人类来说,森林既是重要的自然资源,又是不可替代的环境资源^[1-2]。森林的生态安全状况直接关系到全球的生态安全和人类的生存与发展,因此维护森林生态安全意义重大。然而,我国的森林资源面临诸多威胁:盗砍滥伐、毁林开荒、非法占用林地、火灾、病虫害、环境污染等,这些有害干扰导致森林正常结构的破坏、生态平衡的失调和生态功能的退化^[3-8],严重威胁着森林生态健康和森林生态安全。森林生态安全问题已引起政府的高度重视^[9],近几年也成为学界研究的重要课题。

目前,国内外森林生态安全研究既有理论探讨又有实证评价,其中森林生态安全评价是学者们研究的重点内容之一。森林生态安全评价是基于一定的需要,对特定时空范围内森林生态安全状况的定性或定量描述^[10]。根据研究对象、研究目的和研究者对森林生态安全概念理解的不同,评价的侧重点和评价指标的选取也存在差异。袁菲等^[11]以汪清林区的 60 个林班为研究对象,基于干扰理论提出了森林生态系统健康评价模型,并从干扰和增益两个方面选取 8 个指标构建了森林生态系统健康评价体系。袁珍霞^[12]以福建三明市森林资源为研究对象,从林分结构、功能效益、自然条件、环境压力和社会投入 5 个方面,构建了包括 24 个指标的县域森林生态安全评价指标体系,刘心竹^[13]等从有害干扰的角度建立了包括 16 个指标的森林生态安全评价指标体系,对我国 31 个省级行政区域的森林生态系统 2011 年的森林生态安全水平进行了实证分析。林分尺度的微观评价侧重于从森林自身的健康状况方面构建指标体系^[11,14],而区域尺度的宏观评价一般把森林生态系统放在自然和社会经济构成的复合生态系统里考虑其安全状况^[15-16]。指标权重的确定方法主要有熵权法^[15-16]、主成分分析法^[13]、层次分析法^[16]等。虽然学者们在森林生态安全研究上做了很多积极有益的探索,但相关理论还需进一步完善和丰富,如森林生态安全的内涵还没有公认的定义、评价指标体系存在指标疏漏和重复的现象、指标权重的确定方法需要创新等。本文基于森林生态系统与自然、社会经济系统的交互关系,揭示省域森林生态安全的内涵,在此基础上构建省域森林生态安全评价指标体系和生态安全指数模型,并选取我国贵州、湖北、浙江、吉林、青海作为代表省份,对其 2004—2014 年的森林生态安全状况进行分析和比较,以此丰富森林生态安全研究的理论,为相关地区林业战略规划和管理提供参考借鉴。

1 研究方法

1.1 省域森林生态安全的内涵及结构模型

迄今为止,学术界对森林生态安全的理解还未形成统一的认识,有的仅从森林生态系统的内部结构和功能层面认识其安全状况^[17],这属于狭义的森林生态安全范畴,有的除了考虑森林生态系统自身安全,还考虑了外界干扰对森林生态系统的影响,这属于广义的森林生态安全范畴^[12-13,15-16]。本研究建立在广义森林生态安全概念之上,不仅指研究区域森林生态健康状态支持社会经济发展和满足人们生态需求的状况,也包括自然、社会经济活动、灾害等对森林生态的影响或造成的压力状况,还包括人类为了改善森林生态状况所作出的努力。结合已有的森林生态安全概念的相关研究成果^[12],本研究的省域森林生态安全是指在省域范围内,在自然环境和人类社会经济活动等外界因素的干扰(包括有害干扰和增益干扰)下,森林生态系统能够进行自我调整,以保持系统结构的完整性、稳定性以及持续支持社会经济发展和满足人类生态需求的状态。森林生

态安全是一个相对的、动态的概念,某区域的森林生态安全状况是各个层次因素综合影响的结果。基于森林生态系统与自然、人类社会系统的交互关系,构建省域森林生态安全资源-气候-压力-响应的结构模型,其构成如下:(1)森林资源子系统,反映森林生态系统的结构以及支持社会经济发展和满足人类生态需求的能力;(2)自然环境(气候)子系统,反映气候对森林生态系统的影响;(3)社会经济(压力)子系统,反映人类对森林生态产品的需求以及社会经济活动对森林生态系统的侵扰;(4)管护响应子系统,反映人类管理和保护森林生态系统的状况。

基于森林生态安全资源-气候-压力-响应的结构模型,本研究构建了省域森林生态安全评价指标体系,并用森林生态安全指数(FESI)综合反映省域范围内森林生态安全的总体状况。其内容包括四部分:一是森林生态安全资源指数,从森林资源的角度评价森林生态系统自身的安全状况;二是气候指数,主要从森林所处的地理区位角度反映气候因子对森林生态系统的影响;三是压力指数,主要评价森林生态系统所承载的社会经济压力;四是管护响应指数,主要评价人类对森林生态系统的管理和维护状况。

1.2 省域森林生态安全评价指标体系

本研究基于省域森林生态安全的内涵及结构模型,借鉴传统的 PSR 模型^[18-19]的思路,通过文献检索和专家咨询,从资源、气候、社会经济压力、管护响应状况 4 个方面选取 11 个指标建立省域森林生态安全评价指标体系(表 1)。

(1) 森林资源类指标

森林资源状况反映了区域森林生态系统的结构以及持续支持地区社会经济发展和满足人类生态需求的能力,是评价森林生态系统最直接也是最常用的指标。基于不同的研究目的和研究尺度,学者们对森林生态系统资源状况进行评价时选取了不同层次的指标体系,考虑到指标的相关性和重复性,结合本研究是省域大尺度评价,在森林资源类指标 A1 中,选取了 3 个二级指标:森林覆盖率 B1、森林单位面积蓄积量 B2、天然林比重 B3。森林覆盖率是指一个国家或地区森林面积占土地面积的百分比,是反映一个国家或地区森林面积占有情况或森林资源丰富程度以及森林资源分布广度的指标^[20]。森林单位面积蓄积量是森林蓄积量与森林面积之比,是反映林地生产力和林分质量的重要指标。天然林比重是天然林面积占森林面积的百分比,是反映森林生态系统复杂性的指标。天然林结构复杂,环境适应能力和自我恢复能力相对较强,天然林比重越大,森林生态系统安全程度越高。

表 1 森林生态安全评价指标体系

Table 1 Index system of forest ecological security

目标层 Target layer	一级指标 First-level index	二级指标 Second-level index	指标性质 Index properties
森林生态安全 forest ecological security	资源类指标 A1	森林覆盖率 B1/%	正指标
		森林单位面积蓄积量 B2/(m ³ /hm ²)	正指标
		天然林比重 B3/%	正指标
	气候类指标 A2	年均气温 B4/℃	正指标
		生物干湿指数 B5	正指标
		社会经济压力指标 A3	人口密度指数 B6/(人/hm ²)
	管护响应类指标 A4	能源消耗指数 B7/(元/hm ²)	负指标
		产业结构指数 B8/%	负指标
		森林火灾受灾率 B9/%	负指标
		森林病虫鼠害发生率 B10/%	负指标
			林业投资指数 B11/(元/hm ²)

(2) 气候类指标

林木是森林生态系统的主体,其生长发育受到诸多环境条件的影响,其中的气候条件起着决定和主导作用,森林的分布在很大程度上取决于气候条件,森林的植被类型反映了气候特点^[21]。气候的热量条件差异导

致我国植被类型由南向北的纬向变化,我国的地理景观从东南沿海向西北内陆呈现森林→森林草原→草原→荒漠的转变,则体现了水分条件对植被的影响,热量和水分共同影响着林木的生长发育和分布^[22-24]。在森林生态安全研究中,气温、降水等气候类因子也开始被纳入森林生态安全评价指标体系^[12,15]。热量是植物生命活动的基础和能量来源,在一定范围内,温度越高植物生长发育越快^[23,25]。一般情况下,年均气温越高的地区,其森林生态状况也越好。水分是植物的基本成分,也是其生理活动的原料,因此生境的干湿程度也是森林生态安全的重要影响因子。基于水热条件的组合状况是决定植被地理分布的生态学原理,根据我国水热同期的特点,本研究采用生物干湿指数 BK ^[26] 来表征森林的生境干湿状况。 BK 值愈大,对应的生境愈湿润,而湿度的增加可促进植被长势^[27]。因此,生物干湿指数 BK 越大,森林生态状况越好。

综上,在自然环境子系统中,选取两个气候类指标反映气象因子对森林生态系统的影响,分别为:年均气温 B_4 、生物干湿指数 B_5 。这两个指标均为正向指标。其中生物干湿指数 BK 的计算公式^[26-27] 如下:

$$BK = \begin{cases} 2P/(BWI + 120) & BWI > 80 \\ P/(BWI + 40) & BWI \leq 80 \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 表示年降水量(mm), BWI 为植物温暖指数^[26-27]。植物温暖指数 BWI 可通过以下公式计算得出:

$$BWI = \sum_{i=1}^n (T - 10) \quad (2)$$

式中, T 为 10℃ 以上的月均气温(℃), n 为月均气温大于 10℃ 的月数。

(3) 社会经济压力指标

森林不仅为人类提供生活和生产所需的木材和其它林产品,同时还提供多种生态服务。人类在与森林互动的过程中,获得各种需求的满足和利益的实现^[1,28]。人类对森林的物质需求会消耗森林资源,在森林资源一定的情况下,人口数越多,给森林生态系统造成的压力也会越大^[29-30]。另外,随着经济发展,能源的需求量和消耗量增加,随之产生的大气污染不仅影响人类的身体健康,也会引起森林生理、生态功能的改变^[31-32],大气污染对森林的影响从 20 世纪 80 年代就引起了学者们的普遍关注^[31-36]。基于以上研究成果,本研究主要从人类对森林资源的需求、消耗,环境污染对森林的影响两个方面选取关键指标反映森林所承受的社会经济压力。社会经济压力指标包括 3 个:人口密度指数 B_6 、能源消耗指数 B_7 、产业结构指数 B_8 。其中人口密度指数是指地区人口数与地区森林面积之比,人口密度指数越大,人类对森林的需求越大,森林生态系统越不安全。能源消耗指数是指地区能源总消耗量与地区森林面积之比,能源消耗指数越大,空气污染越严重,森林生态系统越不安全。产业结构指数是指地区第二产业生产总值与地区生产总值之比,该指数越大,表明该地区第二产业越发达,对森林资源的需求越大,对环境的污染越严重,森林生态系统越不安全。

(4) 管护响应类指标

森林火灾是全球所有森林植被系统的显著干扰因子,深刻影响着森林景观的结构和森林生态系统的正常运转^[36-40]。另外,作为一种生物灾害,森林病虫害严重威胁着森林生态系统的健康^[4]。虽然森林火灾和病虫害发生的原因多样,但一定的防护和管控措施能抑制这些灾害的发生^[4,36],森林火灾和病虫害的受灾情况反映了人类管护森林的力度和水平。另外,林业投资状况反映了政府对林业和生态环境的重视程度,也影响着地区森林生态系统的安全状况。因此,在管护响应类指标中设置如下三个指标:森林火灾受灾率 B_9 、森林病虫害发生率 B_{10} 、林业投资指数 B_{11} 。森林火灾受灾率是森林火灾受灾面积与森林面积之比,森林病虫害发生率是森林病虫害发生面积与森林面积之比,这两个指标值越大,森林生态系统越不安全。林业投资指数是林业投资额与森林面积之比,该指数越高,森林生态系统越安全。

1.3 森林生态安全评价方法

本研究选取我国贵州、湖北、浙江、吉林、青海 5 个省作为研究对象,基于上述省域森林生态安全评价指标体系,用“变异系数法”^[11,41] 确定各个指标的权重,采用综合评价法得到各省的森林生态安全指数,以此对研究区的森林生态安全状况进行分析和比较。

各省某年份森林生态安全指数 $FESI$ 的计算公式为:

$$FESI_i = \sum_{j=1}^{11} w_j y_{ij} \quad (3)$$

式中, $FESI_i$ 表示第 i 个省某年的生态安全指数, y_{ij} 表示对应年份第 i 个省第 j 个指标的无量纲化数值, w_j 表示第 j 个指标的权重。森林生态安全评价指标体系中第 j 个指标的权重 w_j 通过以下公式计算得出:

$$w_j = \frac{v_j}{\sum_{j=1}^{11} v_j} \quad (4)$$

式中, v_j 表示第 j 个指标的变异系数, 可通过以下公式计算得出:

$$v_j = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{y}_j - y_{ij})^2}}{\bar{y}_j} \quad (5)$$

式中, $\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij}$, m 表示第 j 个指标的样本数。

2 五省森林生态安全实证研究

2.1 研究区域的选取及数据来源

基于本研究建立的省域森林生态安全评价指标体系及评价模型, 综合考虑研究区森林资源状况、气候及经济发展水平的差异性, 选择我国贵州、湖北、浙江、吉林、青海五个省作为实证研究对象, 在地理分布上, 涵盖了我国西南地区、中部地区、东南沿海地区、东北地区、西部地区, 形成一个圈状, 这五个省也是中国重要的生态功能区的典型代表。

本研究建立的指标体系共包括 11 个指标, 涉及到的原始指标有 16 个。考虑到地区气候的相对稳定性和气候因子对树木生长影响的滞后性, 在本研究中, 以中国气象数据网公布的“中国地面累年值年值数据集(1981—2010 年)”和“中国地面累年值月值数据集(1981—2010 年)”为基础, 根据各个观测站点的气象数据计算出该省对应的气象指标值。其余数据来自于各省统计年鉴。研究的时间跨度为 2004—2014 年。根据 5 个省 11a 的数据形成 55×11 的指标数据矩阵 $X = (x_{ij})_{55 \times 11}$ 。

2.2 指标数据的标准化

数据标准化常用的方法是功效系数法^[11,13,16], 本研究对传统的功效系数法进行了改进, 对于正向指标, 采用如下公式对数据实行标准化:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times \left(1 - \frac{x_{\min}}{\bar{x}}\right) + \frac{x_{\min}}{\bar{x}} \quad (6)$$

对于负向指标, 数据标准化的公式为:

$$y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \times \left(1 - \frac{\bar{x}}{x_{\max}}\right) + \frac{\bar{x}}{x_{\max}} \quad (7)$$

式中, $x_{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}$, $x_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}$, $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}$, m 为第 j 个指标的样本数。

公式(6)是一个单调递增函数, y_{ij} 随着 x_{ij} 的增大而增大, 由此得到正向指标的标准化数据范围为 $\frac{x_{\min}}{\bar{x}} \leq y_{ij} \leq 1$, 公式(6)避免了传统的功效系数法导致综合评价时忽略数值较小的正向指标的弊端。公式(7)是一个单调递减函数, y_{ij} 随着 x_{ij} 的增大而减小, 由此得到负向指标的标准化数据范围为 $\frac{\bar{x}}{x_{\max}} \leq y_{ij} \leq 1$, 公式(7)避免了传统的功效系数法导致综合评价时忽略数值较大的负向指标的弊端。

按照公式(6)和公式(7), 得到标准化的指标数据矩阵 $Y = (y_{ij})_{55 \times 11}$ 。

2.3 指标权重及主要影响因素

“变异系数法”是根据同一指标数据间的离散程度来给各指标赋权,适用于具有一定差异的研究对象作横向比较和同一对象在不同时点作纵向比较。基于 5 省 2004—2014 年的指标数据,根据“改进的功效系数法”和“变异系数法”得到本研究各级指标的权重(表 2)。

由表 2 可知,在 4 个一级指标中,森林资源类指标权重最大,达到 0.419,管护响应类指标和气候类指标的权重分别排在第二、第三位,社会经济压力类指标权重最小。这说明在本研究中,影响省域森林生态安全指数的最主要因素是森林资源状况,其次是人类对森林的管护投资因素和气候因素。社会经济压力类指标虽然权重最小,但对森林生态安全指数的影响也不容忽视。另外,根据二级指标权重的排序结果,在森林资源类指标中,森林单位面积蓄积量是最主要的影响因子;在气候类指标中,年均气温是最主要的影响因子;社会经济压力类指标的最主要影响因子为人口密度指数;而管护响应类指标的最主要影响因子为林业投资指数。综合整体排序结果,林业投资指数、森林单位面积蓄积量、年均气温是影响森林生态安全的三大单项因素。

表 2 各级影响因子的权重

Table 2 The weight of each influence factor

一级指标及权重 First-level index and weight	二级指标 Second-level index	权重 Weight	指标权重总排序 Overall sequence of index weight
资源类指标 A1(0.419)	森林覆盖率 B1	0.13	4
	森林单位面积蓄积量 B2	0.16	2
	天然林比重 B3	0.129	5
气候类指标 A2(0.175)	年均气温 B4	0.139	3
	生物干湿度指数 B5	0.036	10
社会经济压力类指标 A3(0.125)	人口密度指数 B6	0.056	6
	能源消耗指数 B7	0.054	7
	产业结构指数 B8	0.015	11
	管护响应类指标 A4(0.281)	森林火灾受灾率 B9	0.053
	森林病虫害发生率 B10	0.048	9
	林业投资指数 B11	0.18	1

2.4 5 省森林生态安全评价结果及分析

2.4.1 5 省森林生态安全指数比较

根据 2004—2014 年 5 省森林生态安全指数折线图(图 1)可知,在研究期内,湖北省森林生态安全指数处于持续上升状态,其余四省除了个别年份出现指数下降情况,其余时间段内都处于上升状态,说明在研究期内,5 省森林生态安全状况总体上处于改善状态。

其次,各省森林生态安全指数变化的幅度呈现较大差异。由图 1 可以看出,在 2004—2009 年期间,贵州、湖北、浙江 3 省森林生态安全指数相差不大,吉林省的指数比贵州、湖北、浙江三省略高,但 2010—2014 年期间,这 4 省的森林生态安全指数差异明显。以 2004 年为基年,2014 年为报告年,浙江省森林生态安全指数的绝对增量为 0.232,相对增量为 40.3%,这两项指标在 5 省中均处于最高水平,森林生态安全指数绝对增量最小的是青海省,为 0.038,相对增量最小的是贵州省,为

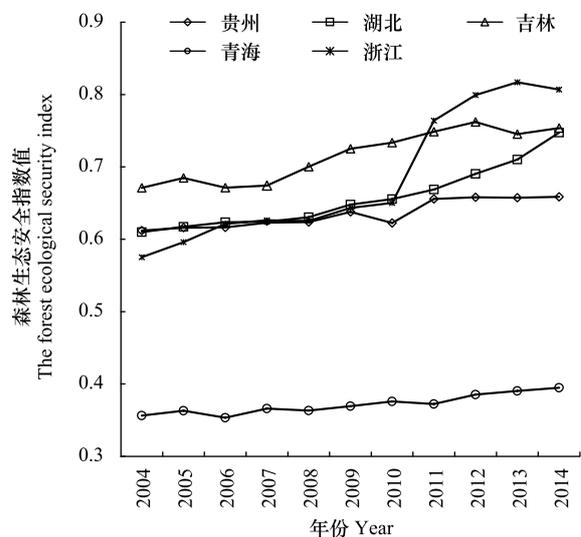


图 1 2004—2014 年 5 省森林生态安全指数折线图

Fig.1 The FESI results of five provinces from 2004 to 2014

7.7%。

另外,5 省 2004—2014 年 11 年森林生态安全指数的平均值差异显著,介于 0.372—0.715 之间,吉林省 11 年的森林生态安全指数平均值最大,青海省最小,浙江、湖北、贵州 3 省的平均值分别为 0.684、0.657、0.635,这 3 个省森林生态安全状况比较接近。

2.4.2 5 省森林生态安全因子分析与比较

根据各评价指标的权重及无量纲化的指标值,基于综合指数法,可以得到 5 省 2004—2014 年 4 个一级指标因子的指数值,即森林资源指数、气候指数、社会经济压力指数和管护响应指数(本部分各指数均为标准化指数,介于 0 与 1 之间)。

本研究选取第七、八、九次全国森林资源清查的起始年份(2004,2009 和 2014 年)作为代表年份,对 5 省森林生态安全一级指标因子状况进行分析,为各省森林生态安全指数的评价结果做进一步解释。

(1) 资源因子分析

图 2 为 2004、2009 和 2014 年贵州、湖北、吉林、青海、浙江 5 省的森林资源指数。由图 2 可知,在 3 个代表年份,吉林省的森林资源指数在 5 省中均处于最高水平。另外,从 2004—2014 年森林资源指数的平均值看,吉林省的平均值达 0.873,说明吉林省森林资源状况很好,相对而言,青海省森林资源指数较低,2004—2014

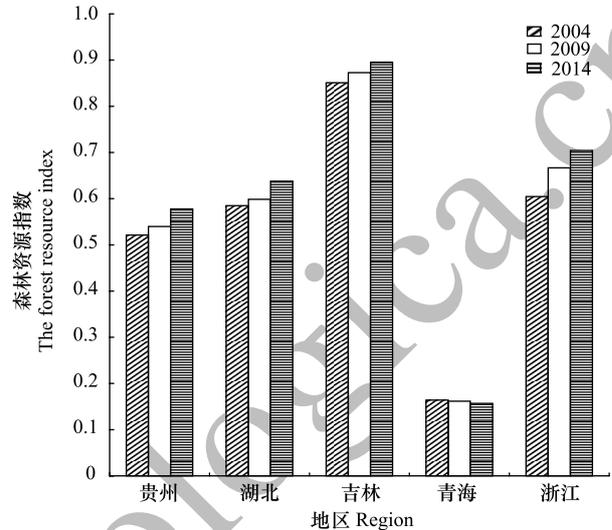


图 2 2004, 2009, 2014 年 5 省森林资源指数

Fig. 2 The forest resource index of five provinces in 2004, 2009, 2014

年的平均值只有 0.161,处于中间水平的是浙江、湖北和贵州,2004—2014 年的平均值分别为 0.661、0.605、0.544,这 3 省的森林资源状况良好。同时从图 2 可以看出,除了生态脆弱的青海省,其余四省森林资源指数呈逐年上升趋势。森林资源状况的改善是提升部分省森林生态安全指数的重要因素之一。

(2) 气候类因子分析

充足的降水和适宜的气温是影响森林生产力和生物多样性的有利条件,也是影响地区森林生态安全状况的重要因子。图 3 为 2004、2009 和 2014 年贵州、湖北、吉林、青海、浙江 5 省的气候指数,指数越大,表明对应地区气候条件越好,森林生态系统越安全。考虑到地区气候的相对稳定性,本研究没有考虑气候因子的年际变化。由图 3 可知,浙江、湖北、贵州气候指数均大于 0.9,说明这 3 省气候条件较好,而吉林和青海气候指数明显偏低,尤其是青海,气候条件恶劣,降水和气温因素严重影响了森林生产力和生物多样性,从而导致青海省森林生态安全状况不佳,森林生态安全指数较低。气候指数的差异是各省森林生态安全指数产生差异的基本因素,气候指数高的地区,森林生态安全指数一般也越高,如浙江、湖北和贵州。

(3) 社会经济压力类因子分析

图 4 为 2004、2009 和 2014 年贵州、湖北、吉林、青海、浙江 5 省的社会经济压力指数。社会经济压力指数与地区经济发展水平呈反向关系,地区社会经济发展水平和人口密度越低,对森林资源的需求、对环境的污染也越小,即森林生态系统承受的社会经济压力越小,此时森林生态系统的社会经济压力指数越高,在其它指数水平相同的情况下,森林生态安全指数会越高,对应森林生态系统越安全。由图 4 可知,在 3 个代表年份,青海省的社会经济压力指数在 5 省中均处于最高水平,从年际变化看,青海省的社会经济压力指数在逐年减小,但减少的幅度不大,说明青海省森林生态系统受到人类社会活动的干扰较小。浙江省作为我国东南部沿海经济发达地区,其压力指数逐年下降,减小的幅度在 5 省中最大。贵州的压力指数逐年上升,说明森林资源改善的幅度大于社会经济发展水平的速度,单位面积森林承载的压力在减小,森林生态安全状况会因此提升。

湖北省的社会经济压力指数呈现先上升再下降的趋势。对大部分省来说,社会经济压力的增加是森林生态安全状况改善的制约因素。

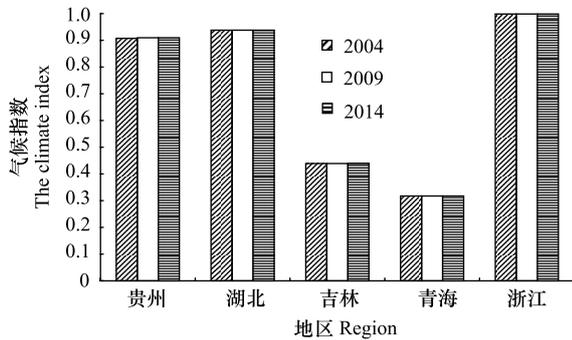


图3 2004,2009,2014年5省气候指数

Fig.3 The climate index of five provinces in 2004,2009,2014

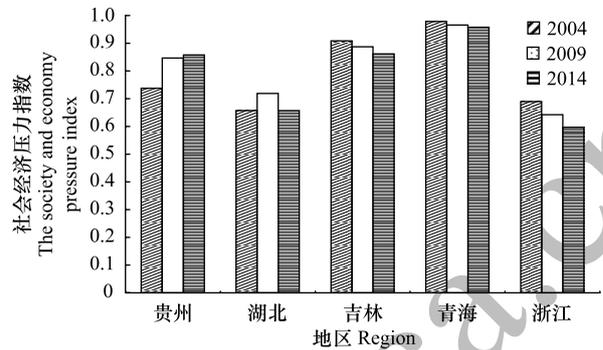


图4 2004,2009,2014年5省社会经济压力指数

Fig.4 The socio-economic pressure index of five provinces in 2004, 2009, 2014

(4) 管护响应类因子分析

图5为2004,2009和2014年贵州、湖北、吉林、青海、浙江5省的管护响应指数,该指数越大,表明人类对森林资源的管护力度越大、管护效果越好,在其它因子不变的情况下,森林生态安全状况会因此提升。从年际变化来看,各省的森林管护响应指数均呈上升趋势,但各省上升的幅度存在较大差异。2004—2009年期间,5省森林管护响应指数的绝对增量介于0.016与0.171之间,浙江省上升幅度最大,其次是吉林,上升幅度最小的是贵州省。2009—2014年期间,管护响应指数的绝对增量介于0.013与0.546之间,浙江省上升的幅度最大,其次为湖北,上升幅度最小的是贵州省。另外,由图5可以看出,浙江省2004年和2009年的森林管护响应指数在5省中均处于最低水平,而2014年的森林管护响应指数跃居5省首位,2004年到2009年浙江省森林管护响应指数的相对改变量为78.7%,2009年到2014年的相对改变量为140.9%,管护响应指数的提升是浙江省森林生态安全指数上升的重要贡献因子。在对管护响应类因子的进一步分析中发现,林业投资指数是导致各省管护响应指数年际变化及省际差异化的最重要影响因子。

2.4.3 5省森林生态安全因子贡献率

根据本研究的综合指数计算法,森林生态安全指数不仅跟各指标的权重存在关系,而且跟各指标值有关。由于资源、气候、管护、压力的实际差异,各生态因子对不同省份森林生态安全指数的影响程度也存在差异。本研究把各生态安全因子指数值占森林生态安全指数的比值定义为生态安全因子贡献率,该比值越大,对应因子对该省森林生态安全指数的贡献越大。图6为贵州、湖北、吉林、青海、浙江5省四大生态安全因子2004—2014年的平均贡献率。从图6可以看出,吉林、浙江、湖北、贵州4省资源类指标的贡献率分别为0.526、0.386、0.372、0.342,远大于其它指标的贡献率,表明在本次森林生态安全评价中,森林资源是这四省的绝对优势因素,而青海省森林资源的贡献率(0.181)仅高于气候类指标的贡献率。在贵州、湖北和浙江省,气候类指标的贡献率位居第二,这表明贵州、湖北和浙江3省气候条件是影响森林生态状况的优势因素,而青海和吉林两省气候类指标的贡献率最小。由于社会经济压力指标的权重较小,在贵州、湖北和浙江省,社会压力类指标的贡献率低于其它指标的贡献率,而青海省社会压力类指标的贡献率仅次于管护响应类指标,说明青海省社会经济压力小是森林生态安全评价中的优势因素。在贵州、湖北和浙江省,管护响应类指标的贡献率仅高于社会经济压力指标的贡献率,而青海省管护响应类指标是贡献率最高的指标,吉林省管护响应类指标的贡献率在4个指标中排名第二,这与政府对森林资源管理和保护的重视,社会对森林资源、生态环境的保护意识普遍增强有重要关系。

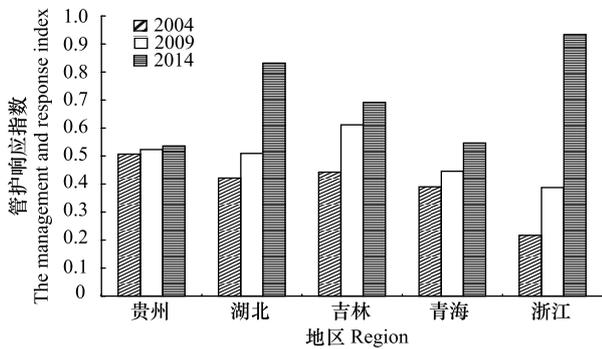


图 5 2004,2009,2014 年 5 省管护响应指数

Fig.5 The management and response index of five provinces in 2004, 2009, 2014

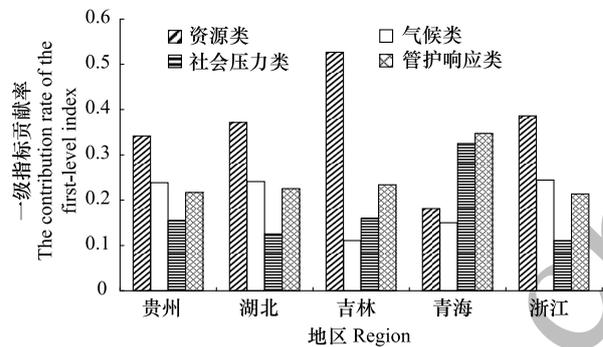


图 6 一级指标贡献率

Fig.6 The contribution rate of the first-level index

2.4.4 5 省森林生态安全状况变动分析

表 3 给出了 2004—2014 年 11a 时间里森林生态安全指数的改变量与 9 个可变单项因子指数值(单项因子的权重与对应指标标准化数值之积)的改变量。从整体情况来看,5 省森林生态安全指数的改变量均为正值,说明和 2004 年相比,5 省 2014 年的森林生态安全状况有了不同程度的改善。在 9 个可变生态因子中,森林覆盖率指数、火灾受灾率指数全面提升,森林单位面积蓄积量指数、林业投资指数、人口密度指数有 4 个省增加,这 5 个因子是改善大部省森林生态安全状况的正面因素,但是天然林比重指数、能源消耗指数等的下降是大部分省在森林生态建设中要注意的问题。另外,从表 3 可以看出,各省森林生态安全指数和各单因子指数的改变量存在一定差异。

表 3 2004—2014 年森林生态安全指数与各单因子指数改变量

Table 3 The change of FESI and each influence factor index from 2004 to 2014

地区 Region	生态安全指数与各单因子指数 Forest ecological security index and each influence factor index									
	生态安全指数	森林覆盖率	森林单位面积蓄积量	天然林比重	人口密度指数	能源消耗指数	产业结构指数	火灾受灾率	病虫害发生率	林业投资指数
贵州	0.047	0.052	0.004	-0.032	0.014	0.001	0	0.01	0.012	-0.014
湖北	0.137	0.027	0.02	-0.025	0.009	-0.009	-0.001	0.007	-0.001	0.11
吉林	0.083	0.007	0.017	-0.006	0.001	-0.005	-0.001	0.001	-0.001	0.071
青海	0.038	0.004	-0.002	-0.005	0.002	-0.003	-0.001	0.001	0.012	0.031
浙江	0.232	0.01	0.028	0.003	-0.001	-0.012	0.001	0.044	0	0.158

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究基于森林生态系统与自然、人类社会系统的交互关系,结合森林生态相关研究成果,构建了一套省域森林生态安全评价指标体系,运用改进的功效系数法和变异系数法对指标进行客观赋权,采用综合评价法对我国五个代表省份的森林生态安全状况进行评价,并详细分析了其变动趋势和差异情况。

(1) 研究期内,湖北省森林生态安全指数持续上升,其余四省除了个别年份出现下降,但总体上也处于上升状态。研究结果表明,在研究期内 5 省森林生态安全状况整体上处于改善状态。

(2) 5 个代表省份森林生态安全状况差异显著。吉林省森林生态安全状况最好,森林生态安全指数历年的均值为 0.715,青海省森林生态较脆弱,森林生态安全指数历年的均值只有 0.372,浙江、湖北、贵州 3 省森林生态安全状况处于较好的状态,森林生态安全指数历年的均值分别为 0.684、0.657、0.635。

(3)从本研究看,影响森林生态安全状况的最主要因素是森林资源类因子,其次为管护响应类因子和气候因子,而社会经济压力对森林生态安全的影响程度相对较小。吉林省的地理位置和地形地貌决定了其气候指数明显偏低,但是吉林省的森林资源丰富、林分质量高,良好的森林资源状况决定了吉林省在研究期内森林生态安全指数的均值最高。浙江省经济发展水平较高,社会经济压力较大,但因其有良好的森林资源和气候条件,足以抵消负面因素对森林生态安全的影响,加上从2011年开始林业投资指数的大幅提升,浙江省森林生态安全指数在2011—2014年期间跃居第一位。青海省社会经济压力较小,但因其生态条件脆弱、森林资源匮乏、林分质量不高,青海省森林生态安全状况相对较差。因此,在经济发展的过程中,应该加强造林,重视对森林资源的管护,尤其要注意对天然林的保护,切实维护我国森林生态安全。

3.2 讨论

本文基于森林生态系统与自然、人类社会系统的交互关系,构建了涵盖资源、气候、压力、响应四部分的森林生态安全结构模型,在此基础上构建了包括11个具体指标的森林生态安全评价指标体系,和相关研究^[12]相比,指标体系有所简化,数据可获性好,同时比较全面地涵盖了影响森林生态安全状况的关键因素。本文建立的指标体系比较适合于空间差异较大的大尺度森林生态安全评价与比较。对不同的研究区域,影响森林生态安全的驱动因素和敏感因子可能不尽相同,如本研究考虑了水热条件对森林生态的影响,但是考虑相对粗略,不同植物种类对水热组合的胁迫响应机制各不相同^[42-44],因此下一步要根据研究对象及时间跨度进一步分类探讨森林生态安全评价指标体系,以期对相关地区提供更具针对性更有应用价值的参考。

本文采用变异系数法确定评价指标的权重,这种方法依赖客观数据,避免了人为主观因素的干扰。在此基础上得到的5省森林生态安全指数值与相关研究结果^[15]基本一致,基本符合研究区的实际状况,说明该方法具有科学性和可行性,能应用于省域森林生态安全研究。除了本文的研究方法,其它的一些方法也可以考虑,如熵权法^[15-16]、生态足迹法^[45]、模糊集对模型等^[46-47]。对相同的研究区域,今后可以考虑在同一指标体系下用不同的方法作对比研究,在此基础上对森林生态安全评价的方法进行进一步创新,以期使评价结果更接近实际状况。

森林生态安全评价是森林生态安全研究的重要内容,可以帮助相关人员了解区域森林生态安全的现状和水平,能为相关地区林业战略规划提供参考和借鉴。为了能更好地了解区域森林生态的现状和未来可能的变化趋势,做好森林生态风险防范工作,应进一步在森林生态安全阈值和生态安全预警^[48]方面进行探索。

参考文献 (References):

- [1] Ritter E, Dauksta D. Human-forest relationships; ancient values in modern perspectives. *Environment, Development and Sustainability*, 2013, 15(3): 645-662.
- [2] Zhang B, Gao J X, Xie G D, Lu C X. Forest soil conservation based on eco-service provision unit method and its value in Anji County, Huzhou, Zhejiang, China. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(2): 405-415.
- [3] 袁菲, 张星耀, 梁军. 基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建. *生态学报*, 2012, 32(3): 964-973.
- [4] Ji L Z, Wang Z, Wang X W, An L L. Forest insect pest management and forest management in China: an overview. *Environmental Management*, 2011, 48(6): 1107-1121.
- [5] Ren W, Tian H Q, Tao B, Chappelka A, Sun G, Lu C Q, Liu M L, Chen G S, Xu X F. Impacts of tropospheric ozone and climate change on net primary productivity and net carbon exchange of China's forest ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(3): 391-406.
- [6] Yu D P, Zhou L, Zhou W M, Ding H, Wang Q W, Wang Y, Wu X Q, Dai L M. Forest management in northeast China: history, problems, and challenges. *Environmental Management*, 2011, 48(6): 1122-1135.
- [7] Niu R Y, Zhai P M. Study on forest fire danger over Northern China during the recent 50 years. *Climatic Change*, 2012, 111(3/4): 723-736.
- [8] 张永生, 房靖华. 森林与大气污染. *环境科学与技术*, 2003, 26(4): 61-63.
- [9] 刘德伦. 对维护森林生态安全相关理论问题的探讨——学习习近平同志关于林业工作重要讲话及批示指示精神的体会. *林业经济*, 2014, (12): 6-11.
- [10] 汪朝辉, 田定湘, 刘艳华. 中外生态安全评价对比研究. *生态经济*, 2008, (7): 44-49
- [11] 袁菲, 张星耀, 梁军. 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价. *生态学报*, 2013, 33(12): 3722-3731.
- [12] 袁珍霞. 基于3s技术的县域森林生态安全评价研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [13] 刘心竹, 米锋, 张爽, 苏立娟, 顾艳红, 张大红. 基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价. *生态学报*, 2014, 34(11): 3115-3127.

- [14] Oszlányi J. Forest health and environmental pollution in Slovakia. *Environmental Pollution*, 1997, 98(3): 389-392.
- [15] 米锋, 谭曾豪迪, 顾艳红, 鲁莎莎, 张大红. 我国森林生态安全评价及其差异化分析. *林业科学*, 2015, 51(7): 107-115.
- [16] 王金龙, 杨伶, 李亚云, 张大红. 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. *生态学报*, 2016, 36(20), doi: 10.5846/stxb201502220376.
- [17] 洪伟, 闫淑君, 吴承祯. 福建森林生态系统安全和生态响应. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2003, 32(1): 79-83.
- [18] Ye H, Ma Y, Dong L M. Land ecological security assessment for Bai Autonomous Prefecture of Dali based using PSR model-with data in 2009 as case. *Energy Procedia*, 2011, 5: 2171-2177.
- [19] 南宁, 梅凡民, 周昊峰. 榆林市压力-状态-响应模型的生态安全评价. *西安工程大学学报*, 2016, 30(1): 47-51.
- [20] 邵志忠. 从自然资源因素看红水河流域少数民族地区的贫困——广西红水河流域少数民族地区贫困原因研究之一. *广西民族研究*, 2010, (1): 172-178.
- [21] Fang J Y, Yoda K. Climate and vegetation in China V. effect of climatic factors on the upper limit of distribution of evergreen broadleaf forest. *Ecological Research*, 1991, 6(1): 113-125.
- [22] Sarris D, Christodoulakis D, Körner C. Impact of recent climatic change on growth of low elevation eastern Mediterranean forest trees. *Climatic Change*, 2011, 106(2): 203-223.
- [23] 高洪娜, 高瑞馨. 气象因子对树木生长量影响研究综述. *森林工程*, 2014, 30(2): 6-9.
- [24] 肖风劲, 欧阳华, 傅伯杰, 牛海山. 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用. *地理学报*, 2003, 58(6): 803-809.
- [25] 赵西平, 郭明辉, 朱熙岭. 温度对树木生长与木材形成影响的研究进展. *森林工程*, 2005, 21(6): 1-4, 31-31.
- [26] 倪健. KIRA 指标的拓展及其在中国植被与气候关系研究中的应用. *应用生态学报*, 1997, 8(2): 161-170.
- [27] 高大伟, 张小伟, 蔡菊珍, 何月, 林建忠. 浙江省植被覆盖时空动态及其与生态气候指标的关系. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1518-1522.
- [28] 徐蕊, 王芹, 王岩. 森林社会效益内涵及主要指标的计量方法. *林业科技*, 2009, 34(4): 70-72.
- [29] Riswan S, Hartanti L. Human impacts on tropical forest dynamics. *Plant Ecology*, 1995, 121(1/2): 41-52.
- [30] Linares J C, Carreira J A, Ochoa V. Human impacts drive forest structure and diversity. Insights from Mediterranean mountain forest dominated by *Abies pinsapo* (Boiss.). *European Journal of Forest Research*, 2011, 130(4): 533-542.
- [31] Taylor G E, Johnson D W, Andersen C P. Air pollution and forest ecosystems: a regional to global perspective. *Ecological Applications*, 1994, 4(4), 662-689.
- [32] Wang H, Long H L, Li X B, Yu F. Evaluation of changes in ecological security in China's Qinghai Lake Basin from 2000 to 2013 and the relationship to land use and climate change. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(2): 341-354.
- [33] Johnson D W, Taylor G E. Role of air pollution in forest decline in Eastern North America. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1989, 48(1): 21-43.
- [34] McLaughlin S, Percy K. Forest health in North America: some perspectives on actual and potential roles of climate and air pollution. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, 116(1): 151-197.
- [35] Matyssek R, Schaub M, Wieser G. Air pollution and climate change effects on forest ecosystems: new evidence. *European Journal of Forest Research*, 2010, 129(3): 417-419.
- [36] 陶玉柱, 邸雪颖, 金森. 我国森林火灾发生的时空规律研究. *世界林业研究*, 2013, 26(5): 75-80.
- [37] 田国华, 杨松. 我国 31 个地区森林火灾时空分布特征. *森林防火*, 2013, (2): 10-14.
- [38] 任乐, 马秀枝, 李长生. 林火干扰对土壤性质及温室气体通量的影响. *生态学杂志*, 2014, 33(2): 502-509.
- [39] Rumann C S, Morgan P. Repeated wildfires alter forest recovery of mixed-conifer ecosystems. *Ecological Applications*, 2016, 26(6): 1842-1853.
- [40] Harvey B J, Donato D C, Turner M G. Burn me twice, shame on who? Interactions between successive forest fires across a temperate mountain region. *Ecology*, 2016, 96(9): 2272-2282.
- [41] 刘轩, 岳德鹏, 马梦超. 基于变异系数法的北京市山区小流域生态环境质量评价. *西北林学院学报*, 2016, 31(2): 66-71, 294-294.
- [42] 李小燕. 黄土高原植被对水热状况的响应研究. *地理科学*, 2013, 33(7): 865-872.
- [43] 徐兴奎, 林超晖, 薛峰, 曾庆存. 气象因子与地表植被生长相关性分析. *生态学报*, 2003, 23(2): 221-230.
- [44] Charney N D, Babst F, Poulter B, Record S, Trouet V M, Frank D, Enquist B J, Evans M E K. Observed forest sensitivity to climate implies large changes in 21st century North American forest growth. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1119-1128.
- [45] Wang H M, Wang H E, Sun H Y, Wang X L, Liao X Y, Chen Z J, Li X W. Assessment of the ecological security in the three gorges reservoir area by using the ecological footprint method. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(6): 891-900.
- [46] Su S L, Chen X, DeGloria S D, Wu J P. Integrative fuzzy set pair model for land ecological security assessment: a case study of Xiaolangdi Reservoir Region, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010, 24(5): 639-647.
- [47] Lu X C, Zhang J Q, Li X Z. Geographical information system-based assessment of ecological security in Changbai Mountain region. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(1): 86-97.
- [48] Wu K Y, Hu S H, Sun S Q. Application of fuzzy optimization model in ecological security pre-warning. *Chinese Geographical Science*, 2005, 15(1): 29-33.