

DOI: 10.5846/stxb201604280805

刘婷婷,孔越,吴叶,祝凌云,张大红.基于熵权模糊物元模型的我国省域森林生态安全研究.生态学报,2017,37(15):4946-4955.

Liu T T, Kong Y, Wu Y, Zhu L Y, Zhang D H. Provincial forest ecological security evaluation in China based on the entropy weight of the fuzzy matter-element model. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 4946-4955.

基于熵权模糊物元模型的我国省域森林生态安全研究

刘婷婷,孔 越,吴 叶,祝凌云,张大红*

北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

摘要:近年来随着经济社会的快速发展,森林资源锐减和生态环境恶化等问题日益威胁到人们的生产生活,在建设生态文明的背景下研究我国省域森林生态安全状况,是关系国计民生和可持续发展的重要议题。在整理现有生态安全研究体系的基础上,独创性地提出森林生态安全压力-承压模型,应用 SPSS、EXCEL 等软件,通过主成分分析、熵权法和物元分析等手段对 2014 年我国 31 个省级行政单位的森林生态安全水平进行实证研究。结果表明:在压力方面,19 个省级行政单位承受了较大森林生态安全压力;在承压方面,12 个省级行政单位的承压能力较强;在综合评价方面,14 个省级行政单位的森林生态安全水平较高。在深入探讨分析评价结果的同时,为提高我国森林生态安全水平提出对策和建议。

关键词:森林生态安全;熵权法;模糊物元模型;指标体系;省域

Provincial forest ecological security evaluation in China based on the entropy weight of the fuzzy matter-element model

LIU Tingting, KONG Yue, WU Ye, ZHU Lingyun, ZHANG Dahong*

Economics and Management Institute of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Recently, with the rapid development of the economy and society, the decline of forest resources and deterioration of ecological environments have threatened human productivity and lifestyles. In the context of ecological progress, research on the condition of provincial forest ecological security in China has become a fundamental issue, since it plays a vital role in the sustainable development and national economy, affecting the livelihood of people. After analyzing the existing ecological security systems, the pressure-pressure bearing capacity model was proposed. Using software, such as SPSS and EXCEL, the forest ecological security standards of 31 provinces in China were empirically analyzed and evaluated using the principal component analysis, entropy method, and matter-element analysis based on the data from 2014. Results showed that in the pressure evaluation, 19 provinces (61.29%) are under high forest ecological security pressure, which means that most provinces face a high ecological security risk, including Hebei, Chongqing, Hubei, Shanxi, and Xinjiang. In contrast, Tibet, Shanghai, Hainan, Gansu and Heilongjiang face lower pressure. Evaluation of pressure-bearing capacity revealed that 12 provinces (38.71%) are under better bearing conditions, which means that the average pressure-bearing capacity of China is relatively low. Fujian, Yunnan, Jiangxi, Hainan and Zhejiang have the highest pressure-bearing capacities, whereas Qinghai, Ningxia, Xinjiang, Gansu and Tianjin have the lowest. In a comprehensive evaluation of forest ecological security, 14 provinces (45.16%) showed high forest ecological security, mostly the southern provinces, including Tibet, Hainan, Fujian, Yunnan and Jiangxi, which are in relatively good condition. However, Ningxia, Qinghai, Xinjiang, Hebei and Shanxi indicated low forest ecological security. Therefore, measures such as strengthening the protection of natural forests, exploring alternatives to wood resources, and establishing a forest ecological security early

收稿日期:2016-04-28; 网络出版日期:2017-03-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangdahong591120@163.com

warning system, should be taken. In addition, measures to improve ecological security should be implemented in consideration of the specific needs of each province.

Key Words: forest ecological security; entropy method; fuzzy matter-element model; indicator system; provincial ecological management

近年来,随着人口的增加和对经济发展的迫切需要,以牺牲资源环境为代价的粗放式经济发展随处可见,这种忽视自然规律的选择带来的是水土资源流失、臭氧层空洞以及资源枯竭等严重后果,日益威胁到人类的生存和发展,至此生态安全问题应运而生^[1]。森林作为陆地上最大的自然生态系统,是重要的基因库、碳贮库、蓄水库和能源库,对于维持生态安全具有重要作用,其安全状况影响人类社会可持续发展^[2]。然而,我国森林面积锐减,全国森林采伐量和消耗量远远超过林木生长量,森林生态安全问题的恶化严重制约了资源环境可持续发展,因此加强对森林生态安全的研究具有重大意义。

国外方面,生态安全的概念始见于 1996 年的《地球公约》,随后国际应用系统分析研究所(IIASA)在 1989 年对生态安全的概念进行了广义和狭义上的划分。对于生态安全的研究分为宏观和微观两个层次,宏观方面主要集中于概念以及与国家安全、军事战略、可持续发展和全球化的关系^[3-5],微观方面体现在化学品的使用对农业生态系统健康及生态安全的影响^[6]。在生态安全评价方面,研究较少,主要集中在生态风险评价^[7]和生态系统健康评价两方面^[8],评价模型主要有 PSR、DPSEEA 和 ECCO 等^[7-9]。

国内相关研究起步较晚,多数学者主要从广义和狭义两个角度对其内涵进行探讨,广义的森林生态安全强调在自然和人类社会的双重干扰下,森林生态系统在维持自身结构和功能相对稳定的基础上,为人类的可持续发展提供生态服务功能;狭义的森林生态安全强调在与其他生态系统相协调的前提下其自身的安全^[10]。很多学者将森林生态系统健康和森林生态系统安全等同,认为森林生态系统的监测和评估可以在很大程度上反映生态安全状况^[11]。在生态安全评价指标体系方面,EES 模型、PSR 模型及其扩展形式和生态足迹法被广泛应用于土地生态安全、湿地生态安全、城市生态安全以及森林生态安全评价等诸多领域^[12-17]。

通过对相关模型和指标体系的梳理发现,森林生态系统状况因素和森林生态系统为人类社会提供生态服务等因素被考虑在内,人类对森林生态系统的反作用未被提及。同时传统模型的广泛使用也制约着森林生态安全评价方面的突破和创新。生态安全研究尺度主要集中在地区、省市和县域^[18-19]等,鲜有国家层面上的省级森林生态安全研究。

基于以上分析,为了客观反映我国省域森林生态安全现状,本研究基于广义森林生态系统安全的概念,从森林生态系统和人类社会系统交互的内在机理出发,全面考量森林生态系统各参与部分间的相互影响,独创性地提出森林生态系统压力—承压模型,从正向和负向两个角度考虑森林生态安全的影响因素。研究结果丰富了森林生态安全研究的相关方法和模型,补充了我国省域森林生态安全的研究。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究所用数据来自《中国统计年鉴》(2014)和《中国林业统计年鉴》(2015)中 31 个省(市、自治区)的相关数据(尚未有港澳台地区数据),涉及火灾发生次数、有害生物寄主树面积、森林蓄积量和工业三废排放量在内的 44 类原始数据。

1.2 评价指标体系构建

为了全面反映我国森林生态安全现状,在考虑到原始数据可获取性的基础上,本研究从森林生态系统压力和森林生态系统承压两个相反的方向构建我国省域森林生态安全评价指标体系,包括森林生态系统压力(B1)和森林生态系统承压(B2)2 个项目,经济社会类指标(C1)、灾害类指标(C2)、污染类指标(C3)、抗灾类

指标(C4)、森林状态类指标(C5)和气象类指标(C6)6个因素以及33个具体指标。通过SPSS软件的主成分分析功能,经方差最大化旋转后生成8个主因子,累计方差贡献率大于85%,在旋转后的主成分因子负荷矩阵中,初步选取负荷系数和 ≥ 1.00 的18个指标,在咨询相关专家的前提下,最终选取了单位森林面积火灾发生率、森林人口密度、森林旅游开发强度、单位森林面积蓄积量等在内的21个具体指标(表1)。

表1 森林生态安全评价指标体系

Table 1 The indicator system of forest ecological security evaluation

目标层 Target layer	项目层 Project layer	因素层 Factor layer	指标层 Indicator layer	单位 Units
森林生态安全评价 指标(A)	森林生态系统压力 指标(B1)	经济社会类指标(C1)	森林人口密度(D1)	人/hm ²
			人类干扰指数(D2)	%
			森林采伐强度(D3)	%
			森林旅游开发强度(D4)	%
		灾害类指标(C2)	单位面积森林火灾发生率(D5)	次/万hm ²
			森林病灾发生率(D6)	%
			森林虫灾发生率(D7)	%
			森林鼠灾发生率(D8)	%
			有害生物危害率(D9)	%
		污染类指标(C3)	SO ₂ 排放强度(D10)	t/万km ²
			氮氧化物排放强度(D11)	t/万km ²
			PM _{2.5} 排放强度(D12)	t/hm ²
			固体废弃物排放强度(D13)	t/hm
	森林生态系统承压 指标(B2)	消灾类指标(C4)	森林虫灾防治率(D14)	%
		森林状态类指标(C5)	单位森林面积蓄积量(D15)	m ³ /hm ²
			森林覆盖率(D16)	%
			天然林比重(D17)	%
			单位森林面积林业投资完成额(D18)	万元/hm ²
		气象类指标(C6)	年降水量(D19)	mm
			年平均气温(D20)	℃
			年日照时数(D21)	h

森林生态系统压力(B1)指人类和自然活动等对森林生态系统产生的不利影响因素,为负向指标,包括经济社会类指标(C1)、灾害类指标(C2)和污染类指标(C3);森林生态系统承压(B2)指森林生态系统本身及在人类和自然活动的影响下利于森林生态系统可持续发展的因素,为正向指标,包括抗灾类指标(C4)、森林状态类指标(C5)和气象类指标(C6)。

经济社会类指标(C1)下设4个具体指标,指由于人类生产生活的开展造成的对森林资源的干扰和破坏。森林人口密度(D1)指行政区内人口数量与森林面积之比,表征施加在单位森林面积上的人类社会需求。人口越多,对森林资源及其生态服务等的需求就越大。人类干扰指数(D2)指建设用地面积与行政区面积之比,是目前极具代表性的人类开发利用自然资源、改造生态系统水平的指数。由于土地资源有限,对建设用地的需求往往导致对森林用地的侵占,其较好地反映了人类建设活动对生态环境造成的压力^[15]。森林采伐强度(D3)指主要木材和竹林产品采伐量之和占森林蓄积量之比,林木采伐是目前人类开发利用森林资源的主要方式之一,当森林采伐量超过森林蓄积量时,森林资源将逐步减少。森林旅游开发强度(D4)指已开发的森林公园面积与森林总面积之比,森林旅游是对森林资源可持续利用的主要方式之一,随着生态旅游向纵深发展,人类在森林游憩过程中对森林资源的影响将逐步扩大。

灾害类指标(C2)下设5个具体指标,指各种灾害对森林资源造成的破坏,包括单位面积森林火灾发生率(D5)、森林病灾发生率(D6)、森林虫灾发生率(D7)、森林鼠灾发生率(D8)和有害生物危害率(D9),指火灾

发生次数、森林病虫鼠灾和有害生物发生面积与森林面积之比,衡量一个国家或地区森林资源受各类灾害威胁的程度。以上灾害的发生可能受人类活动影响,多以天灾的形式出现,发生率越高森林生态系统越不安全。

污染类指标(C3)下设4个具体指标,表征污染物排放对森林资源造成的威胁。 SO_2 排放强度(D10)指 SO_2 排放量与行政区面积之比,当 SO_2 浓度达到一定水平,将以酸雨的形式对森林等资源造成破坏,因而反映了 SO_2 排放浓度对森林资源的威胁程度。氮氧化物排放强度(D11)指氮氧化物与行政区面积之比,与 SO_2 浓度作用机理类似,其浓度的增加会增加降水的酸度,同时造成光化学烟雾等空气污染,反映了氮氧化物浓度对森林资源的威胁程度。 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度(D12)指 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值与森林面积之比,森林资源净化空气的能力是有限的,反映可入肺颗粒物浓度施加在森林资源上的压力。固体废弃物排放强度(D13)指一般工业固体废弃物产生量与森林面积之比,固体废弃物的排放会产生多种有害的气体 and 液体进而对土壤等资源造成威胁,制约森林生态系统的发展。

消灾类指标(C4)表征由于人类的积极干预,从而对森林病虫鼠灾等的发生起到的遏制作用,是人类为维护森林生态安全所做的努力。因森林病灾防治率、森林鼠灾防治率和有害生物寄主树防治率对结果影响不显著,因而只选取了森林虫灾防治率这一个指标。森林虫灾防治率(D14)指防治的虫灾发生面积占虫灾发生总面积的比,反映了在人类的干预下森林生态系统抵御虫灾的能力和水平。

森林状态类指标(C5)下设4个具体指标。单位森林面积蓄积量(D15)指森林蓄积量与森林面积之比,表征了单位森林面积的森林蓄积能力,是森林质量的重要指标。森林覆盖率(D16)指森林面积与行政区面积之比,是森林资源丰富程度的重要指标。天然林比重(D17)指天然林面积占森林面积之比,相比较于人工林,天然林在物种多样性和维持自身结构和功能稳定性等方面具有显著优势。单位森林面积林业投资完成额(D18)指林业投资完成额与森林面积之比,它反映了政府部门对林业建设的重视程度,林业投资完成率为森林资源的保护提供资金上的支持,为森林资源的永续发展保驾护航。

气象类指标(C6)下设3个具体指标,表征当地森林资源的区位条件。年降水量(D19)指一年中月平均降水量之和。降水对于森林植物的生长以及物种分布具有重要影响,我国属于大陆季风气候,一般而言,降水越多森林生产力越高,生物多样性越丰富。年平均气温(D20)在一定范围内,气温越高森林生产力越高,同时生物多样性越丰富。年日照时数(D21)对森林植物的生产能力具有重要作用,日照时数越长对森林植物生长越有利。

1.3 评价方法

森林生态安全是一个典型的模糊概念,其评价过程涉及多个指标,且指标间可能存在不相容的问题。物元分析理论以促进事物转化和解决不相容问题为核心,主要思想是用“事物、特征、量值”3个要素来描述事物,适用于多指标评价问题。本研究基于物元分析原理,融入模糊集和欧式贴近度的概念,将信息论中的熵值理论引入到权重计算中,建立基于熵权的模糊物元评价模型,有效避免了评价标准不确定带来的影响^[20]。

1.3.1 模糊物元与复合模糊物元

在物元分析中对于给定事物 M ,其特征向量 C 和量值 x ,以有序三元组 $R=(M, C, x)$ 作为表述事物的基本物元,若量值 x 具有模糊性,则称为模糊物元。事物 M 有 n 个特征向量 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 和相应的量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,则称 R 为 n 维模糊物元。 M 个事物的 n 维物元组合在一起,便构成了 m 个事物的 n 维复合模糊物元 R_{mn} ^[20, 21],即:

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

式中, R_{mn} 为 m 个事物的 n 个模糊特征的复合物元; M_i 为第 i 个事物 ($i=1, 2, \dots, m$); C_j 为第 j 个特征 ($j=1, 2, \dots, n$); x_{ij} 为第 i 个事物第 j 个特征对应的模糊量值。

1.3.2 从优隶属度原则

按照从优隶属度原则, 各单项指标 C_n 相应的模糊量值隶属于标准方案对应评价指标相应模糊量值的程度称为从优隶属度。各评价指标对于评价方案而言, 分为越大越优型指标和越小越优型指标, 分别采用如下公式进行计算:

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

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

式中, u_{ij} 为从优隶属度, $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别为各评价方案中每一评价指标的最大值和最小值, 在此基础上建立从优隶属度模糊物元 R_{mn} 。

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

1.3.3 标准模糊物元与差平方模糊物元

标准模糊物元 R_{0n} 由从优隶属度模糊物元 R_{mn} 中各评价指标从优隶属度的最大值和最小值构成。经公式 (2) (3) 处理, 本文以最大值为最优, 即各评价指标的从优隶属度均为 1。

$$R_{0n} = \begin{bmatrix} & N_0 \\ C_1 & u_{x_{01}} \\ C_2 & u_{x_{02}} \\ \vdots & \vdots \\ C_n & u_{x_{0n}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

以 Δ_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 表示标准模糊物元与复合从优隶属度模糊物元中各项差的平方, 称为差平方复合模糊物元 R_{Δ} , 即 $\Delta_{ij} = (ux_{0j} - u_{ij})^2$, 可表示为:

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

1.3.4 熵权法确定指标权重

各评价指标对评价结果的贡献度不同, 因而需要对指标赋予不同的权重。确定权重的方法主要有主观赋权法和客观赋权法两类, 主观赋权法与专家的知识层次、经验积累和偏好密切相关; 客观赋权法与评价数据的内在特征紧密相关, 有效避免了因人为认识的差别而对评价结果造成的影响^[22]。为了使评价结果更客观, 本文引入熵权法确定权重系数。本研究用信息熵评价所获系统信息的有序度及效用, 即用评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重^[23], 计算步骤如下:

(1) 构建 m 个事物 n 个评价指标的判断矩阵 $R = (x_{ij})_{mn}$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)

(2) 对判断矩阵进行归一化处理, 得到判断矩阵 B ,

$$\text{对于越大越优型指标: } b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (7)$$

$$\text{对于越小越优性指标: } b_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (8)$$

式中, $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 为同一评价指标下不同事物中的最满意和最不满意者(越大越满意或越小越满意)。

(3) 根据熵的定义, m 个评价事物 n 个评价指标的熵为:

$$H_i = - \frac{\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln m} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

$$\text{式中, } f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + b_{ij})}。$$

(4) 计算评价指标的熵权 w_i 和权重 W :

$$W = (w_i)_{1 \times n}$$

$$\text{式中, } w_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i}, \text{ 且满足 } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (10)$$

1.3.5 欧式贴合度和综合评价

欧式贴合度指被评价样品与标准样品间相互接近的程度, 其值越大表示两者越接近, 反之则越远, 从而可以根据贴合度的大小对各样本进行优劣排序^[20]。本研究运用 $M(*, +)$ 算法计算和构建欧式贴合度的复合模糊物元 R_{PH} :

$$R_{PH} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ PH_j & PH_1 & PH_2 & \cdots & PH_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中, } PH_i = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^n w_i \Delta_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

本研究从森林生态安全压力和承压两个角度进行评价。其中, 森林生态安全压力得分为森林生态系统压力指标项目层下 13 个因素层指标的计算结果; 森林生态安全承压得分为森林生态系统承压指标项目层下 8 个因素层指标的计算结果; 综合评价结果为 21 个因素层指标的综合计算结果。

2 结果与分析

2.1 评价指标权重

通过熵权法对我国省域森林生态安全评价的各层指标进行赋权, 指标权重的计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 森林生态系统压力指标和承压指标权重均接近 0.5, 较全面地反映了森林生态安全水平。在因素层指标中, 权重最大的是森林状态类指标、气象类指标和灾害类指标, 表明森林资源本身的状态和区位条件是决定森林资源安全程度的主要因素。在指标层指标中, 权重最大的森林覆盖率、年降水量和天然林比重均为森林生态系统承压指标, 进一步印证了森林资源本身的状态对于生态安全水平的影响。森林采伐强度、森林鼠灾发生率和有害生物危害率则构成了压力的主要来源。

2.2 各省(市、自治区)森林生态安全评价结果

表 3 包括森林生态安全评价的压力得分、承压得分和综合得分及各自排名。压力数据经过负向化处理, 得分越高代表承受的压力越小; 承压得分越高, 承压能力越强; 综合得分越高, 森林生态安全水平越高。

表 2 各指标权重值

Table 2 Weight of each index

目标层 Target layer	项目层 Project layer	因素层 Factor layer	指标个数 Indicator number	指标层 Indicator layer
森林生态安全 评价指标(1)	森林生态系统压力 指标(0.455739)	经济社会类指标(0.157297)	4	森林人口密度(0.02335)
				人类干扰指数(0.03319)
				森林采伐强度(0.06267)
				森林旅游开发强度(0.03809)
		灾害类指标(0.189257)	5	单位面积森林火灾发生率(0.03688)
				森林病灾发生率(0.02458)
				森林虫灾发生率(0.03328)
				森林鼠灾发生率(0.04894)
				有害生物危害率(0.04558)
		污染类指标(0.109186)	4	SO ₂ 排放强度(0.02737)
				氮氧化合物排放强度(0.02393)
				PM2.5 排放强度(0.02843)
			固体废弃物排放强度(0.02946)	
	森林生态系统承压 指标(0.544261)	消灾类指标(0.061461)	1	森林虫灾防治率(0.06146)
		森林状态类指标(0.275044)	4	单位森林面积蓄积量(0.05524)
				森林覆盖率(0.08651)
				天然林比重(0.06905)
				单位森林面积林业投资完成额(0.06424)
气象类指标(0.207756)		3	年降水量(0.08425)	
		年平均气温(0.06733)		
		年日照时数(0.05617)		

表 3 我国省域森林生态安全评价结果*

Table 3 Provincial forest ecological safety evaluation of China

省份 Provinces	综合得分 Comprehensive score	综合排名 Comprehensive ranking	压力得分 Pressure score	压力排名 Pressure ranking	承压得分 Pressure bearing capacity score	承压排名 Pressure bearing capacity ranking
北京	0.275355	13	0.386686	17	0.614052	7
天津	0.210273	25	0.386176	18	0.503121	27
河北	0.183041	28	0.347959	31	0.507796	26
山西	0.198679	27	0.365911	28	0.510054	24
内蒙古	0.245746	18	0.427086	7	0.50942	25
辽宁	0.224204	24	0.37563	24	0.539542	20
吉林	0.243107	19	0.373685	25	0.575011	16
黑龙江	0.288	10	0.436151	5	0.565239	17
上海	0.303361	7	0.479521	2	0.536959	21
江苏	0.230786	21	0.390971	16	0.530133	22
浙江	0.317032	6	0.425654	10	0.630443	5
安徽	0.258433	15	0.385921	19	0.584273	14
福建	0.345329	3	0.426829	8	0.683662	1
江西	0.321036	5	0.413764	12	0.65748	3
山东	0.205639	26	0.372811	26	0.512513	23
河南	0.226771	23	0.376428	22	0.542789	19
湖北	0.254479	17	0.365116	29	0.609202	8
湖南	0.296523	9	0.406332	13	0.622591	6

续表

省份 Provinces	综合得分 Comprehensive score	综合排名 Comprehensive ranking	压力得分 Pressure score	压力排名 Pressure ranking	承压得分 Pressure bearing capacity score	承压排名 Pressure bearing capacity ranking
广东	0.280867	11	0.401642	15	0.601101	9
广西	0.297924	8	0.426343	9	0.595242	10
海南	0.357109	2	0.469087	3	0.637452	4
重庆	0.234695	20	0.360199	30	0.580063	15
四川	0.263111	14	0.385113	20	0.593897	11
贵州	0.256629	16	0.379614	21	0.590461	13
云南	0.339157	4	0.430087	6	0.665467	2
西藏	0.434723	1	0.662319	1	0.546668	18
陕西	0.276252	12	0.402945	14	0.590932	12
甘肃	0.230051	22	0.443603	4	0.467793	28
青海	0.159059	30	0.422567	11	0.388647	31
宁夏	0.15874	31	0.375883	23	0.435911	30
新疆	0.161234	29	0.36926	27	0.447103	29

* 尚未统计到港、澳、台数据

2.2.1 森林生态安全压力评价

由表 3 知,在各省(市、自治区)森林生态安全压力评价中,西藏(0.662319)、上海(0.479521)、海南(0.469087)、甘肃(0.443603)和黑龙江(0.436151)得分较高,森林资源承受的压力较小;河北(0.347959)、重庆(0.360199)、湖北(0.365116)、山西(0.365911)和新疆(0.36926)得分较低,森林资源承受的压力较大。全国森林生态安全压力平均水平为 0.408751,高于这一水平的有 19 个省份。结果表明,相比较而言多数省份承受了较大的森林生态安全压力,且各省份承受的森林生态安全压力存在较大差别。

进一步对表 3 进行分析可知,环渤海及华北平原大部分省份承受的森林生态安全压力较大,而南部沿海和西北地区(除新疆)承受的压力相对较小。环渤海及华北平原大部分地区人口密度较大,对森林资源和土地资源的需求旺盛,人均资源量相对不足,森林人口密度、人类干扰指数和森林采伐强度高于全国平均水平;较高的经济发展水平和发达的工业导致氮氧化合物和固体废弃物的排放水平高于全国平均水平。因此该地区承受了较大的森林生态安全压力。南部沿海地区更加注重轻工业的发展,对环境造成的污染相对较小;由于水热条件好、森林资源丰富,单位森林面积承受的压力较小。因此该地区承受的森林生态安全压力较小。西北地区(除新疆)森林资源较少,但人口密度小、经济发展水平低,对资源环境造成的干扰和破坏相对较小。新疆地区沙漠众多,森林覆盖率仅为 4.24%,为全国最低水平,森林虫灾和森林鼠灾的发生率高于全国平均水平,因此承受了较大的森林生态安全压力。

2.2.2 森林生态安全承压评价

在各省(市、自治区)森林生态安全承压评价中,福建(0.68366)、云南(0.665467)、江西(0.65748)、海南(0.637452)和浙江(0.630443)得分较高,森林资源承压能力较强;青海(0.388647)、宁夏(0.435911)、新疆(0.447103)、甘肃(0.467793)和天津(0.503121)得分较低,森林资源承压能力较差。全国森林生态安全承压平均水平为 0.408751,高于这一水平的有 12 个省份。结果表明,相比较而言少数省份的森林生态安全承压能力较强,各省份间承压能力存在一定差别,且承压能力较强的省份多为在南方水热条件好的省份。

南方地区森林生态安全承压能力普遍偏高,尤其是福建和云南等地,这与当地水热条件好,森林资源丰富密切相关。东北及内蒙古地区天然林较多,森林资源丰富且保护较好,因此承载能力较强。西北地区承压能力较差可能与当地森林覆盖率低,林木生长环境差以及森林保护意识较差和病虫害的防治水平低相关。

2.2.3 森林生态安全综合评价

各省(市、自治区)森林生态安全综合评价中,西藏(0.434723)、海南(0.357109)、福建(0.345329)、云南

(0.339157)和江西(0.321036)得分较高,森林生态安全水平较高;宁夏(0.15874)、青海(0.159059)、新疆(0.161234)、河北(0.183041)和山西(0.198679)得分较低,森林生态安全水平较低。全国森林生态安全平均水平为0.260559,高于这一水平的有14个省份。总体而言,与森林生态安全承压评价一致,受森林生态安全压力评价的影响。

西藏地区森林覆盖率一般,但单位森林面积蓄积量很高,人口稀少对于森林资源的干扰破坏少,且病虫害发病率低,多方面的因素导致西藏的森林生态安全水平最高。值得注意的是,南方省份的森林生态安全水平普遍高于北方省份,且在高于全国平均水平的14个省份中,除黑龙江、陕西和北京,其余省份均为南方省份。黑龙江境内大小兴安岭地区森林资源丰富、天然林占比高,且经济发展和人口压力较小;陕西境内秦岭地区森林资源丰富且保护水平高,自然保护区的建立进一步促进了森林资源的保护;而北京地区生态安全水平较高则与政策性因素相关。

3 结论与讨论

本研究综合运用生态学和经济学的相关理论,在PSR模型和EES模型的基础上,独创性地提出森林生态安全压力—承压模型,从正向和负向两个角度进行相关指标的构建。运用熵权法对指标进行赋权,通过对31个省级行政单位森林生态安全状况的评价和分析,得出如下结论并提出对策和建议。

(1)森林生态安全压力、承压和综合评价结果表明,当前多数省份面临较大的森林生态安全压力,尤其是环渤海和华北平原地区,而森林生态安全承压能力水平一般。因此,应充分重视森林生态安全。在控制生态安全压力方面,努力做到将对森林资源的需求控制在森林可承受范围内,积极寻找相关森林资源替代品并支持鼓励相关技术的研发和应用;在提高承压能力方面,扩大对于森林资源保护及可持续发展的宣传教育,逐步树立起全民生态的观念和意识,同时鼓励植树种草,做好对滥砍滥伐等破坏森林资源的相关惩罚措施和制度安排。

(2)森林生态安全评价结果呈现地区差异。总体而言,南方省份的森林生态安全水平高于北方省份,东部地区的森林生态安全水平高于西部地区。具体而言,东北地区、西北地区、华东地区、华南地区和西南地区的森林生态安全压力和承压水平呈现不同的区域特点。因而,在提高当地森林生态安全水平时,应因地制宜,根据不同的情况采取相应的措施。

(3)通过对森林生态安全压力评价、承压评价和综合评价的对比可以发现,森林生态系统本身的健康程度在很大程度上决定了当地的森林生态安全水平。因此,要加强森林生态安全水平除了在可持续发展的前提下利用森林资源外,更重要的是加强对森林资源的保护,认真落实造林护林工作,尤其是对于森林资源相对贫瘠的地区,应积极响应国家号召进一步提高森林资源质量和水平。

根据以上分析和当前森林生态安全现状,本研究提出以下提高森林生态安全水平的对策和建议:加强对森林公园的相关管制,在标准制定方面力求科学合理全面,此外进一步加强对森林游憩过程的约束,落实好相关惩罚措施,努力将可能对森林资源造成的破坏和干扰降到最低;鼓励支持新科技的发展,积极寻找森林资源替代产品,提高森林抗病抗虫和抗灾的能力和水平;建立相关的森林生态安全预警机制,及时检测和管理森林资源,并对可能的风险进行防范和处理。

参考文献(References):

- [1] 朱教君,刘足根.森林干扰生态研究.应用生态学报,2004,15(10):1703-1710.
- [2] Lorenz M, Mues V. Forest health status in Europe. The Scientific World Journal, 2007, 7(S1): 22-27.
- [3] Mathews J T. Redefining security. Foreign Affairs, 1989, 68(2): 162-177.
- [4] Rogers K S. Ecological Security and Multinational Corporations. Environmental Change and Security Project Report. Washington, DC: Woodrow Wilson Center, 1997: 29-36.
- [5] Helman G B, Ratner S R. Saving failed states. Foreign Policy, 1992-1993, (89): 3-20.

- [6] 邹长新, 沈渭寿. 生态安全研究进展. 农村生态环境, 2003, 19(1): 56-59.
- [7] Hunsaker C T, Graham R L, Suter G W II, O'Neill R V, Barnhouse L W, Gardner R H. Assessing ecological risk on a regional scale. *Environmental Management*, 1990, 14(3): 325-332.
- [8] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington, DC: Island Press, 1992: 234-246.
- [9] Dennis P. *Ecological Security: Micro-Threats to Human Well-Being*. Occasional Paper No. 13, 1996: 234-246.
- [10] 袁珍霞. 基于 3S 技术的县域森林生态安全评价研究. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [11] 黄莉莉, 米锋, 孙丰军. 森林生态安全评价初探. 林业经济, 2009, (12): 64-68.
- [12] 张小虎, 雷国平, 袁磊, 李辉, 田庆昌. 黑龙江省土地生态安全评价. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(1): 88-93.
- [13] 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. 生态学报, 2009, 29(7): 3818-3827.
- [14] 高兴国, 王磊, 齐代华, 陈家德, 王世敏, 张福生. 基于 PSR 模型的湿地生态安全评价——以大山包湿地为例. 湖南师范大学自然科学学报, 2013, 36(1): 86-90.
- [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] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价. 生态学报, 2013, 33(16): 5090-5100.
- [17] Wackernagel M, Rees W. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Philadelphia, PA: New Society Publishers, 1996.
- [18] 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.
- [19] 杨伶, 张大红, 王金龙, 李亚云. 中国县域森林生态安全评价研究——以 5 省 15 县为例. 生态经济, 2015, 31(12): 120-124.
- [20] 张斌, 雍歧东, 肖芳淳. 模糊物元分析. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [21] 蔡文. 物元模型及其应用. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [22] 吕洪德. 城市生态安全评价指标体系的研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [23] 邱菀华. 管理决策与应用熵学. 北京: 机械工业出版社, 2002.