

引用格式:廖冰,张智光. 林业生态安全指标-指数的耦合实证测度研究[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1777-1791. [Liao B, Zhang Z G. The empirical measurement of coupling from indicators to indexes of forestry ecological security[J]. *Resources Science*, 2017, 39(9): 1777-1791.] DOI: 10.18402/resci.2017.09.15

# 林业生态安全指标-指数的耦合实证测度研究

廖冰<sup>1,2</sup>, 张智光<sup>1,2</sup>

(1. 南京林业大学经济管理学院, 南京 210037; 2. 南京林业大学环境与发展系统工程研究所, 南京 210037)

**摘 要:**研究林业生态安全测度评价对管理者制定林业生态安全预警、监管和控制措施以深入推进生态文明建设具有重要意义。为克服已有研究的不足,本文立足于林业生态安全的广义内涵——产业与生态互利共生,在分析林业产业压力与森林生态相互关系的基础上,利用2004-2015年全国及31省域面板数据,运用结构化PSIR和定量化SEM方法确定了林业生态安全指标及其权重,通过Lotka-Volterra方法得到了具有生态经济意义的林业生态安全共生度指数及其判据,实现由指标向指数的耦合集成,最后对全国及31省域林业生态安全实证测度,并根据测度的“系列指数”追溯“指标变量”以找出林业生态安全问题的原因,实现由指数向指标的回溯解耦。研究结果表明:①整个中国林业产业压力与森林生态处于非绿色共生模式导致林业生态安全处于预警状态,这将产生潜在的林业生态安全隐患,亟需引起高度重视,要实现林业绿色安全仍任重道远;②31省域中,处于林业生态安全预警省域的数量(18省域,占比58%)要多于处于林业生态安全省域的数量(13省域,占比42%);③林业生态安全不仅依赖于林业自然资源禀赋能力,还取决于林业产业压力与森林生态的共生协调状态。

**关键词:**森林生态;林业产业压力;生态与产业共生;林业生态安全;指标体系;特征指数;耦合与解耦

DOI: 10.18402/resci.2017.09.15

## 1 引言

人类已踏进生态文明的“康庄大道”<sup>[1]</sup>,生态文明理念更是深入人心。生态安全是生态文明的一个重要属性<sup>[2]</sup>,而林业生态安全在维持国家或地区生态安全中占据首要、基础和重要地位<sup>[3]</sup>。狭义的林业生态安全仅指森林生态安全,强调森林生态系统自身的健康、完整和可持续性;广义的林业生态安全包括森林生态安全、林业产业安全及林业产业与森林生态共生的安全<sup>[3]</sup>,强调的是森林生态系统为人类提供生态服务的安全,即将自然、经济、生态和社会安全看成一个复合生态系统的整体安全。对林业生态安全的研究,最为关键的是对其测度和评价研究<sup>[3]</sup>。在生态环境状况不断恶化的压力下,开展林业生态安全测度和评价研究可为管理者制

定林业生态安全预警和监控措施以深入推进生态文明建设提供参考借鉴依据。

近年来,关于林业生态安全评价的研究不断增加,国内要比国外晚几十年。国外主要局限于森林生态系统健康方面,德国于20世纪70年代末率先提出森林生态健康概念并进行测度,澳大利亚<sup>[4]</sup>、加拿大<sup>[5]</sup>、美国<sup>[6]</sup>、新西兰<sup>[7]</sup>、墨西哥<sup>[8]</sup>等国学者先后对森林生态健康测度,国内学者针对森林生态健康和森林(林业)生态安全展开了评价研究<sup>[9]</sup>,包括国家<sup>[10]</sup>、省域<sup>[11]</sup>、县域<sup>[12]</sup>、区域<sup>[13-15]</sup>森林(林业)生态安全指标构建及其评价<sup>[16,17]</sup>等,起源于21世纪初,至今仍处于初探阶段。指标体系已覆盖产业、经济、生态、环境、资源、社会等多领域,常通过指标体系法(如专家打分和模糊数学分析法<sup>[15]</sup>、层次分析法<sup>[18]</sup>、熵权

收稿日期:2016-11-06; 修订日期:2017-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(71173107、71673136);江苏省高校哲学社会科学优秀创新团队建设项目(苏教社政2013-8-2-1);2016年江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划项目(KYZZ16\_0314)。

作者简介:廖冰,男,江西高安人,博士生,主要研究领域为林业管理工程。E-mail: liaobing1002@126.com

通讯作者:张智光, E-mail: zzg@njfu.com.cn

法<sup>[19]</sup>、投影寻踪模型法<sup>[20]</sup>、模型综合评价法<sup>[9]</sup>等)来选取,包括直观筛选法和结构模型法:直观筛选法简便易行,但缺乏科学依据,结构模型法以PSR<sup>[21]</sup>、DSR<sup>[22]</sup>、DPSIR<sup>[23]</sup>、DPSEEA<sup>[24]</sup>为代表,但前两者过于简单,后两者过于复杂,亟需综合改进这些模型。指标还可通过特征指数法(如耦合模型<sup>[25-30]</sup>、生态足迹法<sup>[31]</sup>、能值分析法<sup>[32]</sup>、能值生态足迹法<sup>[33]</sup>等)来选取。但指标体系法在确定权重时,通常主观性较大,虽然现在的研究已经越来越避免这个问题了,但或多或少仍存在主观性问题;每一种特征指数只能从某一个侧面反映生态安全状态,缺乏综合性,亟需找到能够克服两者缺点的生态安全评价方法。对于测度结果的判定,常人为主观根据综合得分排名或者林业生态安全综合指数来划分等级,有的仅划分为安全与否两级标准,这种划分局限性太强,有的根据底线和临界值划分出更细化的等级,但是至于划分的理论依据并未提及。

以上研究为本文提供了极大的参考价值,也为本文奠定了强大的根基,但仍存在以下不足。已有研究未聚焦林业生态安全的本质属性——产业与生态共生,未综合考虑生态与产业的共生性来测度评价林业生态安全,存在“就生态论生态”和“就产业论产业”的预警滞后性;多数学者根据不同区域或不同时期林业生态安全测度结果,人为主观地确定“安全与否”两级判据准则,这种划分较狭窄,不能全面反映林业生态安全的内涵,正如“不生病不一定健康”一样,若非安全也可能处于其他预警状态,但其他预警状态并未提出。

为弥补以上不足,本文拟测度评价中国及31省域林业生态安全状态及预警等级<sup>[3,26]</sup>,并提出以下技术构想:①立足于林业生态安全的广义内涵——产业与生态互利共生,综合考虑产业与生态的共生性来测度评价林业生态安全;②先定性分析林业产业压力与森林生态影响复合系统结构及相互作用机理,据此构建林业生态安全PSIR(压力-状态-影响-响应)理论结构模型以初选指标体系,然后采用SEM计量方法筛选初始指标以得最终指标及其权重;③以权重作为衔接桥梁,建立指标-指数耦合化Lotka-Volterra方法,依次算得具有生态经济意义的林业生态安全“系列指数”,包括基本指数 $[F(t)$ 、 $C$

$(t)$ 和 $E(t)]$ 、产业受力指数 $S_F(t)$ 、生态受力指数 $S_E(t)$ 和共生度指数 $S(t)$ ;④根据生态受力指数 $S_E(t)$ 和共生度指数 $S(t)$ ,从林业生态安全原理上得到林业生态安全状态及预警等级判据准则;⑤对全国及31省域林业生态安全进行实证,根据实证结果且通过指数-指标的逆向解耦,回溯导致林业生态安全问题的原因变量。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 整体方法概述及初始指标体系建立

本文拟采用指标-指数耦合的方法来测度评价林业生态安全<sup>[3,26]</sup>。首先,在分析林业产业压力与森林生态相互关系的基础上,运用PSIR系统结构模型选取涵盖压力-状态-影响-响应的林业生态安全初始指标体系;其次,通过SEM计量方法对初始指标体系进行筛选和优化以得最终指标及作用路径系数,并对作用路径系数进行归一化处理后得到各指标的权重;再次,以指标权重为衔接桥梁,采用林业Lotka-Volterra共生模型得到林业生态安全测度的“系列指数”及其判据准则,实现指标-指数的耦合;最后,对中国及31省域林业生态安全实证测度,并通过从指数到指标的回溯,实现指数-指标的解耦,从而发现导致林业生态安全问题的原因。

根据以上方法概述,首先初选林业生态安全测度评价指标体系。参照林业生态安全广义内涵<sup>[3]</sup>和相关文献<sup>[26]</sup>,基于PSIR理论框架选取了如图1所示的林业生态安全初始指标体系。与文献[26]相比,图1增加了森林生态效益影响子系统I对林业产业与社会发展压力子系统P的直接和间接作用关系。

在图1中,P代表林业产业与社会发展压力子系统,初选林业总产值及占GDP比重、林业二产比重、人均GDP、城市化水平五个压力指标。其中,林业总产值及占GDP比重除反映林业产业经济总体发展水平外,还间接反映为促进林业产业经济发展而消耗利用森林资源并在一定程度上造成生态破坏、环境损害的压力;林业二产比重除反映林产工业对林业产业经济发展贡献度、林业产业结构特征外,还间接反映为发展林产工业而排放污染废弃物、CO<sub>2</sub>等导致生态破坏、环境损害的压力;人均GDP、城市化水平除反映一般社会经济发展水平外,还间接反映为发展社会经济开发利用森林资

2017年9月

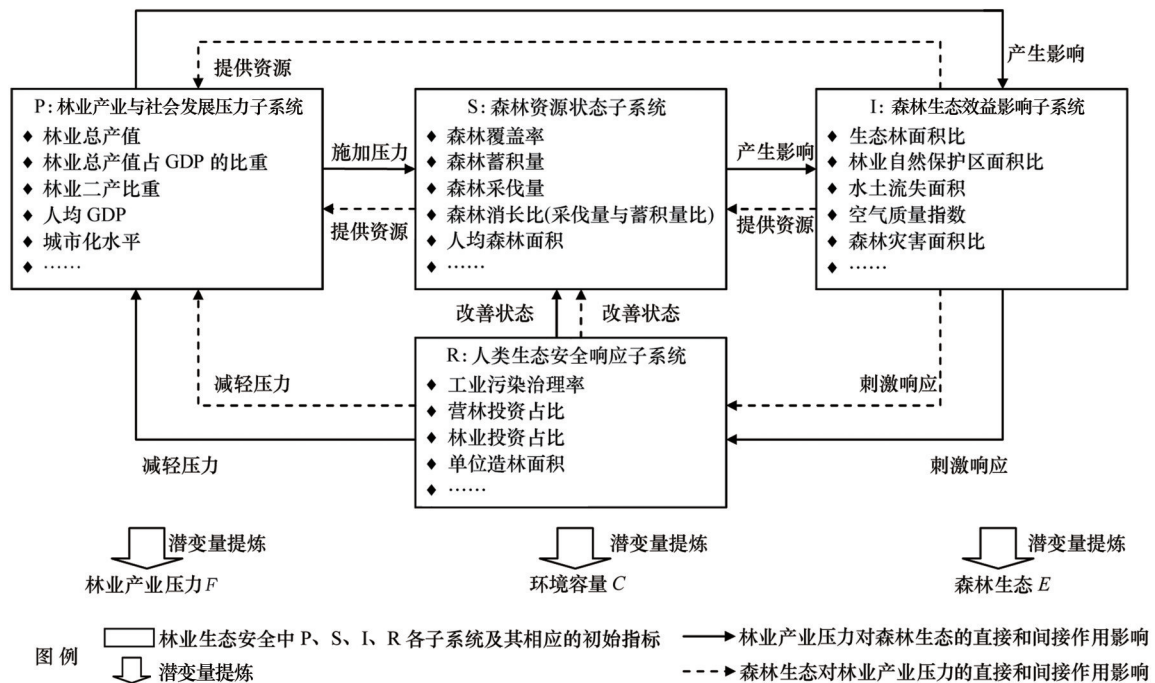


图1 基于PSIR理论框架的林业产业压力、环境容量和森林生态初始指标体系

Figure 1 Original indicators among forestry industry pressure, environment capacity and forest ecology based on PSIR framework

源、加工利用木材等而破坏生态、损害环境的压力。

S表示在压力P作用下森林资源的状态子系统,初选森林覆盖率、森林蓄积量、森林采伐量、人均森林面积、森林消长比五个状态指标。其中,森林覆盖率间接反映资源禀赋强弱;森林蓄积量反映森林资源总供给能力;森林采伐量反映森林资源利用水平;森林消长比间接反映木材利用、供给、森林结构、质量以及资源更能能力状况;人均森林面积间接反映森林资源禀赋强弱、森林固碳制氧能力。

I表示在压力P和状态S作用下森林生态效益所受到的影响子系统,初选生态林面积比、林业自然保护区面积比、水土流失面积、空气质量指数、森林灾害面积比五个影响指标。其中,生态林面积比反映森林结构对森林生态效益的影响,间接反映森林资源禀赋强弱、森林结构特征;林业自然保护区面积比反映森林资源禀赋对森林生态效益的影响,间接反映森林资源禀赋强弱;水土流失面积反映水土流失对森林生态效益的影响,间接反映森林质量、森林资源更新力;空气质量指数反映大气生态状况对森林生态效益的影响,间接反映森林质量、固碳制氧能力;森林灾害面积比反映森林灾害对森

林生态效益影响,间接反映森林质量。

R表示人类为降低森林生态效益所受的影响而采取的积极响应子系统,初选工业污染治理率、营林投资占比、林业投资占比、单位造林面积四个响应指标。其中,单位造林面积反映人工造林力度、绿色发展状况,间接反映森林质量、资源更新力;营林投资占比或林业投资占比间接反映人工造林资本投入力度,间接反映林业一产结构及对林业的贡献;工业污染治理率间接反映绿色循环经济发展水平。

在图1中,参考相关文献<sup>[26]</sup>并运用因子分析法,根据P子系统提取公因子林业产业压力 $F$ ,根据S子系统和R子系统提取公因子环境容量 $C$ ,根据I子系统提取公因子森林生态 $E$ 。这些指标仅为初始指标,还需通过SEM筛选以得最终指标且最终指标并非直接用于测度评价,还要通过Lotka-Volterra模型耦合成林业生态安全“系列指数”以反映其本质属性<sup>[2]</sup>进而达到对林业生态安全预警的目的。

## 2.2 研究区域、数据来源及处理

本文研究对象为中国及其31省(直辖市、自治区),共32个研究样本。由于数据获取困难,本次研



究不包括香港、台湾与澳门。

根据图1选取的初始指标来收集数据。限于数据的要求,选择11年间的数据,数据均来源于《中国统计年鉴》<sup>[34]</sup>(2005-2015年)、《中国林业统计年鉴》<sup>[35]</sup>(2004-2014年)、《中国环境统计年鉴》<sup>[36]</sup>(2004-2014年)、各省域《国民经济与社会发展统计公报》<sup>[37]</sup>(2004-2014年)和各省域《统计年鉴》<sup>[38]</sup>(2005-2015年)。

数据收集后,需对其做如下相关处理。

(1)缺失值处理:统计资料中有些样本数据是缺失的,若缺失数据与样本其他数据不存在任何关联,则直接删除此样本数据;若缺失数据与样本中其他数据存在一定关联,则采取均值替代法或回归分析法等处理此缺失数据。

(2)标准化处理:采用直线型功效系数法<sup>[39]</sup>对缺失处理后的数据进行标准化处理,正向和负向指标处理公式分别为:

$$\begin{aligned} Z_{X_i}(t) &= [X_i(t) - X_i(t)_{\min}] / [X_i(t)_{\max} - X_i(t)_{\min}] \\ Z_{X_i}(t) &= [X_i(t)_{\max} - X_i(t)] / [X_i(t)_{\max} - X_i(t)_{\min}] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $X$ 可分别为林业产业压力 $F$ 、森林生态 $E$ 、环境容量 $C$ ;  $X_i(t)$ 为 $X$ 的第 $i$ 个指标在时间 $t$ 的实际值;  $Z_{X_i}(t)$ 为 $X_i(t)$ 的无量纲标准化值 $[0 \leq Z_{X_i}(t) \leq 1]$ ,  $X_i(t)_{\max}$ 和 $X_i(t)_{\min}$ 分别为 $X_i(t)$ 最大值和最小值。

(3)信、效度检验。①先用SPSS软件进行信度分析。Cronbach's  $\alpha$ 是目前最常用的信度检验系数,最好在0.8以上,0.7~0.8之间可以接受。经检验,林业产业压力 $F$ 各显变量的Cronbach's  $\alpha$ 最小为0.705,最大为0.869,平均值为0.826;环境容量 $C$ 各显变量的Cronbach's  $\alpha$ 最小为0.729,最大为0.873,平均值为0.815;森林生态 $E$ 各显变量的Cronbach's  $\alpha$ 最小为0.718,最大为0.895,平均值为0.849,表明数据较可靠。②进行效度分析,效度包括内容效度、准则效度和结构效度。选择一个合适的准则往往十分困难,准则效度检验受到限制。内容效度是检验显变量如何能够反映所属潜变量,这一点已在2.1章节中说明,还由于通过问卷调查等

方式获得的数据主观性较强,准确性降低,而统计年鉴数据的完整性较好,容易获得时间序列和空间分布二维数据,故本文中选择相对客观和准确的统计年鉴指标和数据。采用SPSS软件中因子分析方法的KMO和Bartlett球形度进行结构效度检验。KMO值0.9以上,非常适合做因子分析;0.8~0.9很适合;0.7~0.8适合;0.6~0.7尚可;0.5~0.6表示很差;0.45以下表示应该放弃。经检验,林业产业压力 $F$ 各显变量的KMO值最小为0.736,最大为0.878,平均值为0.839;环境容量 $C$ 各显变量的KMO值最小为0.742,最大为0.895,平均值为0.856;森林生态 $E$ 各显变量的KMO值最小为0.741,最大为0.879,平均值为0.818,表明数据的聚集效度较好。

## 2.3 基于SEM的指标体系优化及指标权重值确定

### 2.3.1 SEM的构建

目前,多数研究采用指标体系法和特征指数法对林业生态安全测度评价。和已有林业生态安全测度评价方法相比,SEM能同时处理多个潜变量且允许潜变量和显变量具有测量误差,拥有较大的测量弹性,还可以通过作用路径系数<sup>1)</sup>来判断显变量与潜变量间的隶属关系和程度,保留关联较强而剔除关联较弱的显变量,故本文选择SEM来对上述初始指标进行筛选以得最终指标。

而林业产业发展和森林生态建设必须依托森林资源环境而产生作用,故引入环境中介变量,提出环境容量分别作为部分和完全中介作用的理论假设模型SEM<sub>p</sub>和SEM<sub>c</sub>(图2)。在图2中,当虚线全部增加时,表示建立的是环境容量作为部分中介的SEM<sub>p</sub>,即两者之间不仅有直接相互关系,还通过环境容量发生间接相互关系;当虚线全部剔除时,表示建立的是环境容量作为完全中介的SEM<sub>c</sub>,即两者只通过环境容量产生间接相互作用而非直接相互作用。在图2中, $F$ 、 $C$ 、 $E$ 为潜变量,不可直接观察,分别表示林业产业压力、环境容量和森林生态; $F_i$ 、 $C_i$ 、 $E_i$ 为显变量,可直接观察,分别反映所属潜变量 $F$ 、 $C$ 、 $E$ 的特性; $\lambda_{Fi}$ 、 $\lambda_{Ci}$ 、 $\lambda_{Ei}$ 为作用路径系数,分别表

1) AMOS软件中的专用术语,即因素负荷量,值越大,影响程度越大,反之则越小。在测量模型中,表示显变量在多大程度上能够反映潜变量的特征,在结构模型中,用来衡量各潜变量之间的影响关系系数。标准化路径系数是AMOS软件自动对路径系数进行标准化处理而输出,便于在同一模型中进行不同系数的对比。故在实证模型研究中为了便于比较、检验拟合参数,均选择输出标准化作用路径系数值。

2017年9月

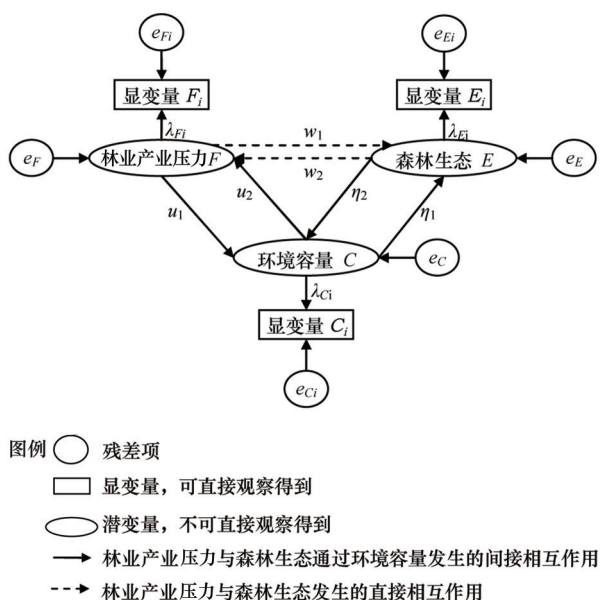


图2 林业产业压力与森林生态相互作用的理论假设模型  
SEM<sub>F</sub>和SEM<sub>C</sub>

Figure 2 Hypothesis models SEM<sub>F</sub> and SEM<sub>C</sub> based on interaction between forestry industry pressure and forest ecology

注:  $\lambda_{Fi}$ 、 $\lambda_{Ci}$ 、 $\lambda_{Ei}$  为作用路径系数值;  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别表示  $F$  对  $E$ 、 $E$  对  $F$ 、 $F$  对  $C$ 、 $C$  对  $F$ 、 $C$  对  $E$ 、 $E$  对  $C$  的影响系数;  $i$  表示显变量个数。

示  $F_i$ 、 $C_i$ 、 $E_i$  在多大程度上能反映所属潜变量  $F$ 、 $C$ 、 $E$  的特性;  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别表示潜变量  $F$  对  $E$ 、 $E$  对  $F$ 、 $F$  对  $C$ 、 $C$  对  $F$ 、 $C$  对  $E$ 、 $E$  对  $C$  的影响系数;  $e_{Fi}$ 、 $e_{Ci}$ 、 $e_{Ei}$ 、 $e_F$ 、 $e_C$ 、 $e_E$  反映一个变量在多大程度上无法反映另一个变量的特性, 为误差干扰项,  $i$  为显变量个数。

### 2.3.2 基于SEM的指标体系与路径系数的确定

采用SEM对初始指标进行筛选, 过程如下。

(1) 提取公因子(潜变量)。运用聚类分析法将具有相似特性的显变量归类, 再用因子分析法提取各类显变量的公因子, 由图1和表1第1列可知共提取了三个潜变量。各类显变量能够共同反映潜变量特性, 它们之间存在一定的相关性, 若非相关, 它们就无法共同来描绘潜变量特性, 当然也不是完全相关, 若完全相关, 则很可能出现共线性等问题, 为避免共线性出现, 本文已采用SPSS软件进行处理。

(2) 初选。根据SEM和已有数据, 将各显变量按其在潜变量中的相对重要性排序, 对各潜变量均等地选取排名3~5位的显变量, 把对应的数据代入SEM专用软件AMOS 17.0中试运行, 用最大似然对

数法进行参数估计。

(3) 参数检验、终选。对拟合参数进行适配度检验, 需人为根据拟合参数是否处于适配度指标范围内来判断和筛选指标, 选择那些通过显著性检验的指标而剔除那些未通过显著性检验的指标, 再依次新增指标替代已剔除的指标重新进行参数拟合、判断和筛选, 直到新增指标能使拟合参数通过显著性检验为止。由于筛选过程繁琐且篇幅较大, 不详述, 最终林业产业压力  $F$ 、环境容量  $C$  和森林生态  $E$  筛选的指标及详细释义(表1第3和第4列), 同时也得到了作用路径系数  $\lambda_{xi}$ (表1第5列)。

### 2.3.3 基于路径系数的指标权重的确定

在2.3.2章节得到  $\lambda_{xi}$  的同时亦可得到拟合参数, 对拟合参数进行适配度检验即可验证先前提出的假设模型SEM<sub>F</sub>和SEM<sub>C</sub>。经检验, SEM<sub>C</sub>的拟合参数有80%未通过适配度统计量检验, 而SEM<sub>F</sub>的拟合参数均在合理的适配度统计量范围内, 表明SEM<sub>F</sub>和数据匹配良好, 故选择SEM<sub>F</sub>而排除SEM<sub>C</sub>(图3, 见1783页)。

从图3可见, 林业产业压力与森林生态不仅具有直接相互作用, 还通过环境容量变量产生间接相互作用; 实线箭头表示林业产业压力对森林生态的直接和间接作用, 虚线箭头表示森林生态对林业产业压力的直接和间接作用; 环境容量在林业产业压力与森林生态相互作用关系中扮演着部分中介的角色, 符合模型SEM<sub>F</sub>中的作用路径。图3(见1783页)中, 由  $e_{Fi}$ 、 $e_{Ci}$ 、 $e_{Ei}$ 、 $e_F$ 、 $e_C$ 、 $e_E$  指向各变量的数值  $e_{F1}$ 、 $e_{F4}$ 、 $e_{C1}$ 、 $e_{C6}$ 、 $e_{E1}$ 、 $e_{E4}$ 、 $e_F$ 、 $e_C$ 、 $e_E$  为残差项; 由潜变量指向显变量的数值  $\lambda_{Fi}$ 、 $\lambda_{Ci}$ 、 $\lambda_{Ei}$  为路径系数值, 表示显变量  $F_i$ 、 $C_i$ 、 $E_i$  在多大程度上能够分别反映所属潜变量  $F$ 、 $C$ 、 $E$  的特性;  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  的数值分别表示潜变量  $F$  对  $E$ 、 $E$  对  $F$ 、 $F$  对  $C$ 、 $C$  对  $F$ 、 $C$  对  $E$ 、 $E$  对  $C$  的影响方向及程度。但是, 图3(见1783页)中所有这些数值并非指标权重系数  $W_{xi}$ ,  $W_{xi}$  还须由  $\lambda_{xi}$  通过公式(2)变换得到(结果见表1第6列)。

$$W_{xi} = \lambda_{xi} / \sum_{i=1}^n \lambda_{xi} \quad (2)$$

式中  $W_{xi}$  分别为林业产业压力  $F$ 、环境容量  $C$ 、森林

表1 通过SEM筛选得到的林业生态安全最终指标及其作用路径系数

Table 1 Final indicators screened out by SEM of forestry ecological security and their operation paths coefficients

| 潜变量                | 初始指标  | 最终指标          | 指标释义   | $\lambda_{x_i}$ <sup>①</sup> | $W_{x_i}$ <sup>②</sup> |
|--------------------|---|---------------|--|------------------------------|------------------------|
| 林业产业压力 $F$ (压力指标)  | 林业总产值 $X_1$ 、林业二产比重 $X_2$ 、林业总产值占GDP比重 $X_3$ 、人均GDP $X_4$ 、城市化水平 $X_5$ ……   | 林业总产值 $F_1$   | 除反映林业产业经济总体发展水平外,还间接反映为促进林业产业经济发展而消耗利用森林资源并在一定程度上造成生态破坏、环境损害的压力,正向指标                 | 0.450                        | 0.234                  |
|                    |   | 林业二产比重 $F_2$  | 除反映林产业对林业产业经济发展贡献度、林业产业结构特征外,还间接反映为发展林产业排放污染废弃物、CO <sub>2</sub> 等导致生态破坏、环境损害的压力,正向指标 | 0.540                        | 0.281                  |
|                    |   | 人均GDP $F_3$   | 除反映一般社会经济发展水平外,还间接反映为发展社会经济开发利用森林资源、加工利用木材等而破坏生态、损害环境的压力,正向指标                        | 0.470                        | 0.245                  |
|                    |   | 城市化水平 $F_4$   | 同上   | 0.460                        | 0.240                  |
| 环境容量 $C$ (状态和响应指标) | 森林覆盖率 $X_6$ 、森林蓄积量 $X_7$ 、森林采伐量 $X_8$ 、森林消长比 $X_9$ 、人均森林面积 $X_{10}$ 、单位造林面积 $X_{11}$ 、营林投资占比 $X_{12}$ 、工业污染治理率 $X_{13}$ 、林业投资占比 $X_{14}$ …… | 森林覆盖率 $C_1$   | 反映在压力作用下森林资源的总体丰富程度,间接反映资源禀赋强弱,正向指标  | 0.580                        | 0.148                  |
|                    |   | 森林消长比 $C_2$   | 森林采伐消耗量与蓄积生长量之比,反映在压力作用下,森林资源总量的动态变化,间接反映木材利用、供给、森林结构、质量以及资源更新能力状况,值越大,更新力慢,负向指标     | -0.550 <sup>③</sup>          | 0.141                  |
|                    |   | 人均森林面积 $C_3$  | 反映在压力作用下,森林资源的人均丰富程度,间接反映森林资源禀赋强弱、森林固碳制氧能力,正向指标                                      | 0.720                        | 0.184                  |
|                    |   | 单位造林面积 $C_4$  | 反映人类应对负面影响所做的积极响应,反映人工造林力度、绿色发展状况,间接反映森林质量、资源更新力,正向指标                                | 0.740                        | 0.189                  |
|                    |   | 营林投资占比 $C_5$  | 反映人类应对负面影响所做的积极响应,反映人工造林资本投入力度,间接反映林业一产结构及对林业的贡献,正向指标                                | 0.680                        | 0.174                  |
|                    |   | 工业污染治理率 $C_6$ | 反映人类应对负面影响所做的积极响应,间接反映林业绿色度,正向指标   | 0.640                        | 0.164                  |
| 森林生态 $E$ (影响指标)    | 生态林面积比 $X_{15}$ 、林业自然保护区面积比 $X_{16}$ 、水土流失面积 $X_{17}$ 、空气质量指数 $X_{18}$ 、森林灾害面积比 $X_{19}$ ……   | 生态林面积比 $E_1$  | 反映森林结构对森林生态效益的影响,间接反映森林资源禀赋强弱、森林结构特征,正向指标  | 0.380                        | 0.189                  |
|                    |   | 森林灾害面积比 $E_2$ | 反映森林灾害对森林生态效益的影响,间接反映森林资源质量,正向指标   | 0.630                        | 0.313                  |
|                    |   | 水土流失面积 $E_3$  | 反映水土流失对森林生态效益的影响,间接反映森林质量、森林资源更新力,正向指标   | 0.580                        | 0.289                  |
|                    |   | 空气质量指数 $E_4$  | 反映大气生态状况对森林生态效益的影响,间接反映森林质量、固碳制氧能力,正向指标  | -0.420 <sup>④</sup>          | 0.209                  |

注:① $\lambda_{x_i}$ 为路径系数,已在2.3.1章节脚注中解释。各显变量 $\lambda_{x_i} < 1$ ,加总之和大于1,并无任何特殊内涵,只为计算 $W_{x_i}$ 所做的归一化处理,确保处理后 $W_{x_i}$ 之和为1;② $W_{x_i}$ 为指标权重系数,反映的是显变量在其所属潜变量中所占的权重大小,分别由各显变量的 $\lambda_{x_i}$ 经公式(2)归一化过渡处理得到, $W_{x_i}$ 之和必等于1;③和④:因图3中有两个 $\lambda_{x_i}$ 分别为-0.550和-0.420,为计算 $W_{x_i}$ 且不出现在负值,故表1中这两处用其绝对值表示。

生态 $E$ 的第 $i$ 个指标权重系数; $\lambda_{x_i}$ 分别为林业产业压力 $F$ 、环境容量 $C$ 、森林生态 $E$ 的第 $i$ 个指标作用路径系数; $X$ 为林业产业压力 $F$ 、森林生态 $E$ 、环境容量 $C$ ; $X_i$ 为 $X$ 的第 $i$ 个指标的实际值; $i$ 为显变量个数。

## 2.4 基于L-V模型的林业生态安全指数测算及评判标准

得到指标权重值 $W_{x_i}$ 后并以其做为衔接桥梁,

可依次算得林业生态安全系列指数,实现指标向指数的耦合。为此,本文借鉴文献[26],将生态学两种群共生的Lotka-Volterra模型应用到林业生态安全领域。限于篇幅,下面省略模型的推导过程,只简述其关键公式(详见文献[26]):

$$\begin{aligned} dF(t)/dt &= r_F \times F(t) \times [1 - F(t)/C(t) - \alpha \times E(t)/C(t)] \\ dE(t)/dt &= r_E \times E(t) \times [1 - E(t)/C(t) - \beta \times F(t)/C(t)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $F(t)$ 、 $E(t)$ 和 $C(t)$ 分别表示林业产业压力指



2017年9月

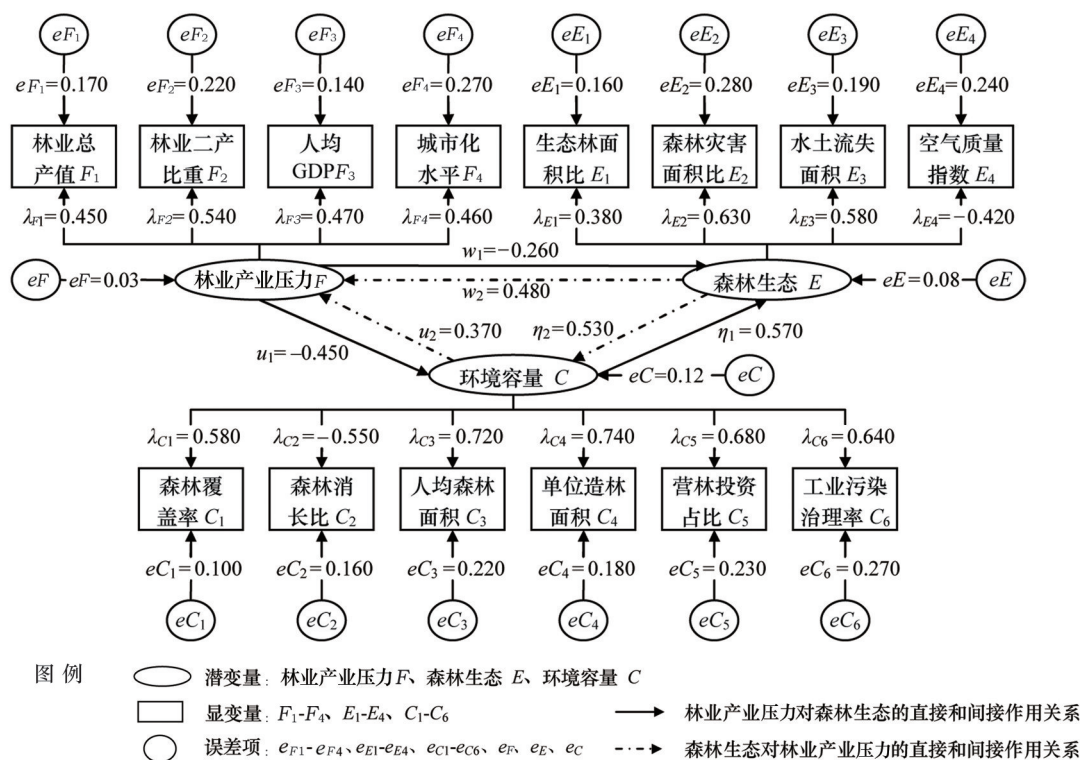


图3 基于SEM的林业生态安全指标作用路径系数

Figure 3 Operation paths coefficients of indicators for forestry ecological security based on SEM

注:  $\lambda_{F1}$ - $\lambda_{F4}$ 、 $\lambda_{C1}$ - $\lambda_{C6}$ 、 $\lambda_{E1}$ - $\lambda_{E4}$ 为路径系数值;  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 的数值分别表示潜变量间的影响方向及程度。

数、森林生态指数和环境容量指数;  $r_F$  和  $r_E$  分别表示林业产业压力水平增长率和森林生态水平增长率;  $\alpha$ 和 $\beta$ 分别表示森林生态对林业产业压力的竞争系数和林业产业压力对森林生态的竞争系数;  $t$ 为时间变量。

求解上述 Lotka-Volterra 模型, 可得  $\alpha$  和  $\beta$ 。由  $\alpha$  和  $\beta$  可分别求得林业产业压力受到森林生态的作用力指数  $S_F(t)$  [ $S_F(t) = -\alpha$ ] 和森林生态受到林业产业压力的作用力指数  $S_E(t)$  [ $S_E(t) = -\beta$ ], 并构建涵盖  $S_F(t)$  和  $S_E(t)$  的林业生态安全综合特征指数, 即共生度指数  $S(t)$  [26] 为:

$$S(t) = [S_F(t) + S_E(t)] / \sqrt{S_F^2(t) + S_E^2(t)} \quad (4)$$

由不等式原理可知,  $S(t) \in [-\sqrt{2}, \sqrt{2}]$ , 值越大越接近绿色安全状态, 反之则趋于竞争互害状态。与现有由指标加权得到的指数相比较, 共生度指数能够反映林业生态安全的内在原因, 更具预警和调控作用。接下来, 由  $S_E(t)$  和  $S(t)$  构建林业生态安全状态和预警等级判据 (详见文献 [19] 和 [26]), 将林业生

态安全状态分为健康、亚健康、风险、高风险、危险、高/中/低康复八种, 相应的林业生态安全预警等级分为绿色安全、蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警、转折橙色/黄色/蓝色预警八种 (表 2)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 中国林业生态安全状态及预警等级综合评判结果分析

根据数据的可获性原则和上述筛选的最终指标、计量的指标权重、构建的 Lotka-Volterra 模型、林业生态安全状态及预警等级判据准则, 现对 2005-2014 年中国林业生态安全基本指数进行测度计算 (图 4)。

从图 4 可知, 中国林业产业压力指数  $F(t)$  逐年递增, 表明中国林业在不断发展, 社会经济也在不断增长, 一方面是由于林业产值逐年递增和林业二产对林业发展的贡献程度不断加大, 另一方面是由于人均 GDP 在逐年升高和城市化水平在不断提升。中国环境容量指数  $C(t)$  总体呈现增长趋势,

表2 林业生态安全状态和预警等级判断标准

Table 2 Judgment criteria for state and pre-warning ranks of forestry ecological security

| 序号 | 生态受力指数 $S_E(t)$ | 共生度指数 $S(t)$                | 生态-产业共生关系 | 安全状态 | 预警等级  |
|----|-----------------|-----------------------------|-----------|------|---|
| 1  | $S_E(t) < 0$    | $-1 < S(t) < 0$             | 产业获利生态受损  | 危险   | 红色预警 (Red Pre-warning, RP)                  |
| 2  | $S_E(t) < 0$    | $-\sqrt{2} < S(t) < -1$     | 生态受损产业受损  | 高风险  | 橙色预警 (Orange Pre-warning, OP)               |
| 3  | $S_E(t) > 0$    | $-1 \leq S(t) < 0$          | 产业受损生态获利  | 风险   | 黄色预警 (Yellow Pre-warning, YP)               |
| 4  | $S_E(t) > 0$    | $0 \leq S(t) < 1$           | 产业受损生态获利  | 亚健康  | 蓝色预警 (Blue Pre-warning, BP)                 |
| 5  | $S_E(t) < 0$    | $0 \leq S(t) < 1/3$         | 产业获利生态受损  | 低康复  | 转折橙色预警 (Transition Orange Pre-warning, TOP) |
| 6  | $S_E(t) < 0$    | $1/3 \leq S(t) < 2/3$       | 产业获利生态受损  | 中康复  | 转折黄色预警 (Transition Yellow Pre-warning, TYP) |
| 7  | $S_E(t) < 0$    | $2/3 \leq S(t) < 1$         | 产业获利生态受损  | 高康复  | 转折蓝色预警 (Transition Blue Pre-warning, TBP)   |
| 8  | $S_E(t) > 0$    | $1 \leq S(t) \leq \sqrt{2}$ | 生态产业互利共生  | 健康   | 绿色安全 (Green Security, GS)                   |

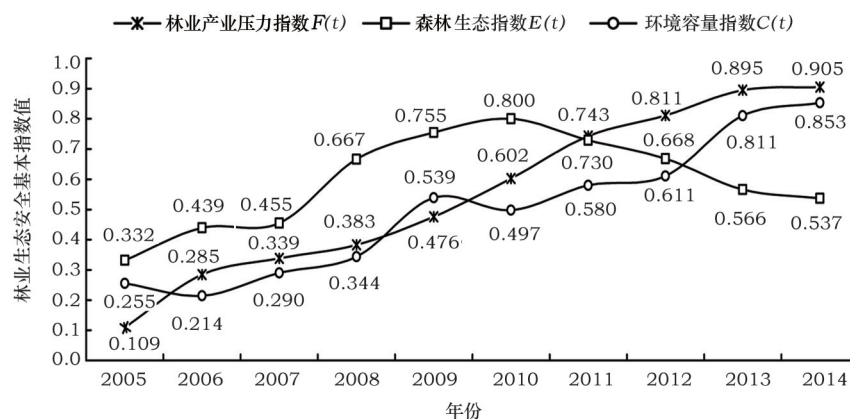


图4 2005-2014年中国林业生态安全基本指数测度结果

Figure 4 Calculation results of the basic indexes for forestry ecological security in China from 2005 to 2014

2009年略有波动,表明中国环境承载能力在不断扩充,这得益于森林覆盖率、森林消长比、人均森林面积、单位造林面积、营林投资占比的不断提高。森林灾害面积比、水土流失面积、空气质量指数等先升后降使得中国森林生态指数  $E(t)$  亦先升后降,2010年出现拐点且达到最大值0.8,2010年前,  $E(t)$  逐渐递增并与  $F(t)$  同步变化,此时林业产业压力与森林生态互利共生且  $E(t)$  大于  $F(t)$ ,2010年后,  $E(t)$  开始递减并与  $F(t)$  反方向变动,林业产业压力与森林生态非互利共生且  $F(t)$  大于  $E(t)$ 。究其原因,可能由于近年来,中国颁布了诸多促进林业发展的相关政策,如集体林权制度改革、加快林业发展的决定、集体林权制度配套措施改革等,在一定程度上加大了对林业的投入,极大地促进了林业的快速发展,再者,由于人均GDP在逐年升高和城市化水平在不断提升使得  $F(t)$  逐年提升。然而,林业具有产业经济和森林生态双重效益属性,是涵盖第一产业(营造林等)、第二产业(木材加工等)和第三产业

(生态建设、生态服务等)的多层次复合产业体系,在第一产业中包含了生态建设的内涵,在生态建设中包含了第一产业的内涵,随着经济的不断增长、城市化进程的不断加剧、林业总产值及林业二产工业比的逐渐增加,人类对森林资源过度消耗采伐利用使得森林资源结构比例失调,森林资源禀赋能力减弱,在一定程度上生态林面积比减少,森林资源质量下降,森林灾害面积比增加,森林生态系统功能减弱,水土流失面积增加,固碳放氧能力减弱,空气质量下降;此外,林业经济的自我过快发展也需消耗利用大量的森林资源,林农作为理性经济人,通过过度采伐森林以获取林业收入,导致森林资源减少、森林生态系统功能降低,进一步加剧了森林生态系统退化的程度。如此等等,共同使得森林生态建设水平不升反降,相应的产业经济发展与森林生态建设处于非互利共生状态。因此,中国未来仍需加强森林生态环境的建设与保护,在适度发展林业产业的基础上优先建设保护生态环境,还要制定



2017年9月

一些限额采伐、天然林全面停伐等政策加以约束林农生产经营行为以保护森林资源。

根据以上林业生态安全基本指数的测度结果,本研究对2005-2014年中国林业生态安全状态及预警等级综合评判如下(图5)。

从图5可知,中国林业产业受力指数 $S_F(t)$ 始终为正,表明森林生态对林业产业压力正向促进。中国森林生态受力指数 $S_E(t)$ 由正变负,表明林业产业压力对森林生态由正向促进变为负向影响,2010年是临界点,2010年前,森林生态对林业产业压力与林业产业压力对森林生态均正向促进,林业产业压力与森林生态互利双赢达到绿色安全状态,2010年后,森林生态对林业产业压力正向促进,而林业产业压力对森林生态负向抑制,产业获利而生态受损,两者此后一直处于非协调状态。可见,无论是处于林业生态安全还是预警状态,都取决于林业产业压力与森林生态的共生性,均为林业产业压力与森林生态相互作用的结果。需要特别说明的是,在2013年和2014年,林业产业压力与森林生态均属于生态受害而产业获利的模式,按照这种发展趋势,可以预测,中国未来林业产业压力与森林生态的关系仍将处于非绿色安全状态,这将产生潜在的林业生态安全隐患,要实现林业产业压力与生态互利共生达到绿色安全状态仍需要相当长的时间。

### 3.2 各省域林业生态安全状态及预警等级综合评判结果分析

同理,本研究对2006-2014年中国31省域林业

生态安全“系列指数”进行测度,限篇幅,就不呈现每年“系列指数”的测度结果,而仅呈现2006-2014年中国31省域林业生态安全状态及预警等级评判结果(表3)。

在得出2006-2014年中国31省域林业生态安全状态及预警等级评判结果后,再将本文中林业生态安全综合评判结果和已有同类测度结果(见文献[19])进行对比以验证本文研究方法的优越性(表4)。

从表4可知,已有研究<sup>[19]</sup>测得吉林、海南、四川、福建、云南等22省域处于健康GS状态,而本文测得福建、湖北、江西、广东等13省域处于此状态, $S_F(t)>0$ , $S_E(t)>0$ , $1<S(t)\leq\sqrt{2}$ 且按 $S(t)$ 从大到小依次排序为:福建、湖北、江西、广东、江苏、海南、四川、安徽、浙江、湖南、广西、云南、贵州。江苏具有地域和经济发展优势,虽为少林省份,森林资源禀赋能力偏弱,但其林业二产工业,如人造板材、林浆纸等较发达,林业三产,如森林旅游服务业等也较好,在一定程度上带动了林业产值的增长,有力地促进了林业产业发展,近年来又大力建设生态,空气质量、工业污染治理率逐年提高,在满足其区域对森林资源需求的同时还能与森林生态建设协同发展,处于健康GS状态。处于西南林区的云南、四川与其余10个南方集体林区省域<sup>[40]</sup>森林资源禀赋能力强,林业发展水平较高,地域生态优势也十分明显,森林覆盖率、生态林面积比等较高使得森林生态指数较高,森林生态建设水平也较高,在满足区域对林业

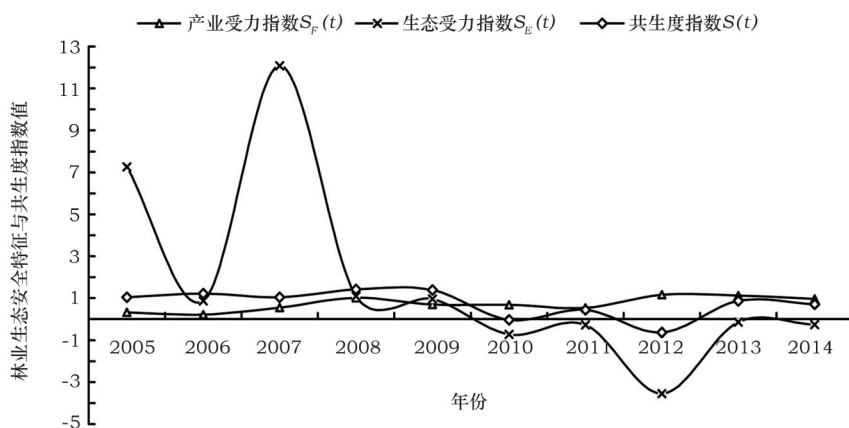


图5 2005-2014年中国林业生态安全状态及预警等级评价结果

Figure 5 Judgment results of state and pre-warning ranks for forestry ecological security in China from 2005 to 2014

表3 2006–2014年中国31省域林业生态安全状态及预警等级评判结果

Table 3 Judgment results of state and pre-warning ranks for forestry ecological security in 31 provinces of China from 2006 to 2014

| 年份  | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 年份 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 北京  | GS   | TYP  | OP   | GS   | OP   | BP   | TYP  | OP   | OP   | 湖北 | YP   | RP   | OP   | RP   | OP   | BP   | OP   | GS   | GS   |
| 天津  | BP   | TBP  | RP   | BP   | OP   | GS   | GS   | TYP  | OP   | 湖南 | OP   | TBP  | OP   | GS   | OP   | BP   | OP   | GS   | GS   |
| 河北  | OP   | GS   | OP   | GS   | BP   | GS   | OP   | RP   | RP   | 广东 | GS   | TBP  | TOP  | OP   | TBP  | OP   | GS   | GS   | GS   |
| 山西  | OP   | OP   | YP   | BP   | BP   | BP   | OP   | YP   | YP   | 广西 | RP   | TOP  | OP   | OP   | TYP  | OP   | YP   | GS   | GS   |
| 内蒙古 | GS   | GS   | BP   | GS   | OP   | BP   | GS   | RP   | RP   | 海南 | OP   | OP   | OP   | TBP  | OP   | OP   | TBP  | GS   | GS   |
| 辽宁  | BP   | TYP  | GS   | BP   | TBP  | YP   | GS   | TYP  | TYP  | 重庆 | TOP  | OP   | OP   | GS   | OP   | OP   | OP   | OP   | RP   |
| 吉林  | BP   | TBP  | GS   | RP   | BP   | BP   | TOP  | TYP  | TYP  | 四川 | TBP  | RP   | YP   | GS   | BP   | OP   | GS   | GS   | GS   |
| 黑龙江 | GS   | TOP  | YP   | RP   | YP   | BP   | GS   | TYP  | TYP  | 贵州 | RP   | OP   | OP   | GS   | BP   | OP   | TOP  | GS   | GS   |
| 上海  | OP   | GS   | TBP  | GS   | GS   | GS   | GS   | TBP  | TBP  | 云南 | RP   | OP   | OP   | OP   | YP   | BP   | TBP  | GS   | GS   |
| 江苏  | GS   | GS   | TBP  | TOP  | GS   | GS   | TBP  | GS   | GS   | 西藏 | GS   | OP   | BP   | BP   | OP   | OP   | OP   | OP   | OP   |
| 浙江  | GS   | GS   | BP   | GS   | GS   | TBP  | GS   | GS   | GS   | 陕西 | BP   | OP   | OP   | GS   | GS   | GS   | BP   | OP   | OP   |
| 安徽  | GS   | GS   | GS   | GS   | GS   | GS   | GS   | GS   | GS   | 甘肃 | OP   | OP   | BP   | OP   | GS   | BP   | OP   | OP   | OP   |
| 福建  | RP   | TBP  | OP   | TBP  | OP   | TYP  | TBP  | GS   | GS   | 青海 | BP   | RP   | BP   | RP   | GS   | BP   | YP   | OP   | OP   |
| 江西  | OP   | TOP  | OP   | TOP  | OP   | BP   | OP   | GS   | GS   | 宁夏 | RP   | TOP  | OP   | YP   | OP   | BP   | OP   | OP   | OP   |
| 山东  | YP   | RP   | YP   | BP   | GS   | GS   | RP   | BP   | GS   | 新疆 | GS   | OP   | BP   | YP   | RP   | BP   | OP   | OP   | OP   |
| 河南  | GS   | GS   | BP   | RP   | YP   | BP   | RP   | YP   | RP   |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

注:OP表示橙色预警 $[S_e(t)<0, -\sqrt{2} < S(t) < -1]$ ,RP表示红色预警 $[S_e(t)<0, -1 < S(t) < 0]$ ,BP表示蓝色预警 $[S_e(t)>0, 0 \leq S(t) < 1]$ ;YP为黄色预警 $[S_e(t)>0, -1 \leq S(t) < 0]$ ;GS为绿色安全 $[S_e(t)>0, 1 \leq S(t) \leq \sqrt{2}]$ ;TOP为转折橙色预警 $[S_e(t)<0, 0 \leq S(t) < 1/3]$ ;TBP为转折蓝色预警 $[S_e(t)<0, 2/3 \leq S(t) < 1]$ ;TYP为转折黄色预警 $[S_e(t)<0, 1/3 \leq S(t) < 2/3]$ 。

表4 本文林业生态安全预警等级评判结果与已有相关研究<sup>[19]</sup>(2013年)的比较

Table 4 Judgment results of pre-warning ranks for forestry ecological security and comparison with current existing research in 2013

| 结果对比                     | 健康<br>GS   | 高康复<br>TBP                          | 中康复<br>TYP                                 | 低康复<br>TOP | 亚健康<br>BP                    | 风险<br>YP                                 | 高风险<br>OP         | 危险<br>RP     |
|--------------------------|--|-------------------------------------|--|------------|------------------------------|--|-------------------|--------------|
| 本文研究结果                   | 福建、湖北、江西、广东、江苏、海南、四川、安徽、浙江、湖南、广西、云南、贵州                             | 上海                                  | 辽宁、吉林、黑龙江、天津                               | (无)        | 山东                           | 河南、山西                                    | 新疆、重庆、陕西、西藏、宁夏、河北 | 内蒙古、甘肃、青海、北京 |
| 已有研究测度结果 <sup>[19]</sup> | 吉林、海南、四川、福建、云南、湖北、宁夏、黑龙江、辽宁、陕西、江苏、重庆、北京、河北、广西、湖南、山东、甘肃、上海、广东、浙江、河南 | 安徽                                  | (无)  | (无)        | 天津、山西、贵州、西藏、青海               | 江西                                       | 新疆                | 内蒙古          |
| 对“已有研究测度结果”的评论           | 处于GS状态的省域数量过多,占比70.97%;已有研究结果与许多省域的实际发展情况吻合度低                      | 安徽林业产业压力指数与森林生态指数均靠前,应处于GS状态而非TBP状态 | 本文测得4省域处于此状态,而已有研究测得处于TYP状态的省域空缺,和实际情况吻合度低 | (无)        | 贵州、青海产业与生态发展较好,应处于GS状态而非BP状态 | 江西为林业大省,林业产业压力指数与森林生态指数均靠前,应处于GS状态而非YP状态 | 与实际情况基本吻合         | 与实际情况基本吻合    |

注:根据本研究提出的新方法,利用相关统计资料数据,测得处于“低康复TOP”状态的省域空缺。

需求的同时也能与森林生态建设水平协同发展,处于健康GS状态。

已有研究<sup>[19]</sup>测得安徽处于高康复TBP状态,而本文测得上海处于此状态, $S_F(t)>0, S_E(t)<0, 2/3 \leq S$

$(t)<1$ 。上海属于直辖市,经济发展和地理位置优越,但为少林省份,森林资源禀赋能力较弱,林业产值排名靠后,林业发展水平较低导致无法满足区域发展对森林资源的巨大需求,再者,生态林面积比、

2017年9月

森林覆盖率等较低使得森林生态指数较低,导致森林生态建设水平较差。安徽是南方集体林区省,森林资源禀赋能力强,林业发展水平较高,地域生态优势也十分明显,森林覆盖率、生态林面积比等较高使得森林生态指数较高,森林生态建设水平也较高,在满足区域发展对林业需求的同时还能与森林生态建设水平协同,应处于健康GS状态而非高康复TBP状态。

已有研究<sup>[19]</sup>测得处于中康复TYP状态的省域空缺,而本文测得辽宁、吉林、黑龙江、天津处于此状态, $S_F(t)>0, S_E(t)<0, 1/3\leq S(t)<2/3$ 。辽宁、吉林、黑龙江属于东北国有林区,人均GDP和城市化水平较低,但其森林资源丰富,特别重视营造林、更新抚育等林业一产与林产加工等林业二产的发展,使得林业产业压力指数较高,然而生态较脆弱、生态公益林面积比较低使得森林生态指数较低,导致森林生态建设水平较低,在满足区域发展对林业需求的同时不能与森林生态建设水平协同,处于中康复TYP状态。天津属于直辖市,人均GDP和城市化水平较高,经济发展较好,但其森林资源禀赋能力较弱,林业产值排名倒数,林业发展水平极低导致无法满足其区域发展对森林资源的巨大需求,再者,森林覆盖率、生态林面积比等较低使得森林生态指数也排名靠后,导致森林生态建设水平也较差。

已有研究<sup>[19]</sup>测得天津、山西、贵州、西藏、青海处于亚健康BP状态,而本文测得山东处于此状态, $S_F(t)<0, S_E(t)>0, 0<S(t)<1$ 。山东林业二产工业占比较大使得林业产业压力指数较高,而森林覆盖率等较低使得森林生态指数较低,且林业产业压力指数高于森林生态指数,在2006-2014,林业产业压力指数先升后降,而森林生态指数先降后升,两者非协同变动,在满足区域发展对森林资源需求的同时不能与森林生态建设水平协同,应处于亚健康BP状态。

已有研究<sup>[19]</sup>测得江西处于风险YP状态,而本文测得河南、山西处于此状态, $S_F(t)<0, S_E(t)>0, -1<S(t)<1$ 。江西人均GDP、城市化水平在全国居中等地位,但其为林业大省,森林资源禀赋能力强,林业发展水平较高,林业产值排名靠前使得林业产业压力指数排名靠前;生态优势明显,森林覆盖率高使

得森林生态指数排名也靠前,森林生态建设较好,在满足其区域发展对森林资源巨大需求的同时还能与森林生态建设保持协同,应处于健康GS状态而非风险YP状态。河南、山西不具备生态优势,经指标回溯发现,2004-2013年河南、山西林业产业压力指数和森林生态指数均逐年下降,但森林生态指数下降幅度要比林业产业压力指数下降幅度小且2011-2013年有回升的趋势,在满足其区域发展对森林资源巨大需求的同时生态逐渐恢复。

已有研究<sup>[19]</sup>测得新疆处于高风险OP状态,而本文测得新疆、重庆、陕西、西藏、宁夏、甘肃、青海、北京处于此状态, $S_F(t)<0, S_E(t)<0, -\sqrt{2}<S(t)<-1$ ,是一种不可持续的发展模式。宁夏、陕西、甘肃属于西北黄土高原少林地区,生态脆弱且经济贫困,有相当一部分地区年降雨量在400mm以下,无法满足森林生长的最基本要求,虽然近年来林业发展水平有所提升,但其林业产业压力指数排名倒数,资源欠缺和区位优势的双重夹击使其既无法满足区域发展对林业的需求也无法使得森林生态建设水平得到提升,导致其处于高风险OP状态。北京和重庆是直辖市,经济发展和地理位置优越,但其林业产值排名靠后,森林资源总量和质量均不高,林业发展水平较低导致无法满足其区域发展对森林资源的巨大需求,再者,生态林面积比、森林覆盖率、空气质量等较低使得森林生态水平指数也较低,导致其森林生态建设水平也较弱,但要在满足其区域发展对森林资源巨大需求的同时能够与森林生态建设保持协同状态,仍然任重道远,可以说,甚至在较长时期内都无法实现,亟需引起高度重视。西藏、青海、新疆处于西部地区,林业产业不具优势,林业产值、林业二产比重偏低使得林业产业压力指数偏低,林业发展水平低下。且生态极其脆弱,森林覆盖率、生态林面积比、空气质量等也处于低水平使得森林生态指数偏低,导致森林生态建设水平低下,林业发展劣势和生态脆弱性的双重夹击使其既无法满足区域发展对森林资源的需求也无法使得森林生态建设水平得到提升,导致其处于高风险OP状态。

已有研究<sup>[19]</sup>测得内蒙古处于危险RP状态,而本文测得内蒙古、河北处于此状态, $S_F(t)>0, S_E(t)<$



0,  $-1 < S(t) < 0$ 。经指标回溯解耦发现,2004-2013年内蒙古和河北森林生态指数均大于林业产业压力指数且林业产业压力指数和森林生态指数呈现反方向变动特征,使其处于危险RP状态:内蒙古林业产业压力指数2004-2008年上升,2008-2010下降,2010-2013年逐渐回升,而森林生态指数反方向变动;河北林业产业压力指数2004-2006年下降,2006-2008年上升,2008-2010年下降,2010-2013年上升,而森林生态指数反方向变动。

综上所述,本文通过结构化PSIR和定量化SEM确定的指标及其权重从而评价出的林业生态安全结果较已有研究<sup>[19]</sup>更合理。

## 4 结论与讨论

### 4.1 研究结论

本文通过对林业生态安全指标-指数的耦合测度评价,所构建的林业生态安全整套指标体系囊括了林业产业压力、环境容量和森林生态三方面,共十四个指标。其中,林业产业压力包括林业总产值、林业二产比重、人均GDP、城市化水平四个,环境容量包括森林覆盖率、森林消长比、人均森林面积、单位造林面积、营林投资比、工业污染治理率六个,森林生态包括生态林面积比、森林灾害面积比、水土流失面积、空气质量指数四个。得出结论如下:

(1)整个中国林业产业与森林生态处于非绿色共生状态导致林业生态安全处于预警状态,这将产生潜在的林业生态安全隐患,要实现林业绿色安全仍任重道远,亟需引起高度重视。

(2)林业生态安全不仅依赖于森林自然资源禀赋能力,还取决于林业产业压力与森林生态的共生协调状态。四个直辖市经济发展较好,地理位置优越,但森林资源禀赋能力弱,林业发展水平较低导致无法满足其区域发展对森林资源的巨大需求,虽然近年来生态建设有所改善,但与南方集体林区省域相差甚远,使其处于林业生态安全预警状态,而南方集体林区省域森林资源禀赋能力强,林业发展水平好,生态优势也十分明显,且林业产业压力指数和森林生态指数排名均靠前,林业产业与森林生态互利共生,使其处于林业绿色安全状态。

(3)在31省域中,处于林业生态安全预警省域

的数量(18省域,占比58%)要多于处于林业绿色安全省域的数量(13省域,占比42%)。

### 4.2 讨论

如前所述,本文通过结构化PSIR和定量化SEM方法首先确定林业生态安全指标及其权重,然后通过指标-指数耦合化Lotka - Volterra方法对林业生态安全测度评价,较已有研究<sup>[19]</sup>更具科学性、合理性和优越性,主要体现在指标选取、优化及其权重确定方面。已有研究<sup>[19]</sup>使用熵权法等来选取指标并确定其权重,而本文立足于产业与生态的共生性来考虑林业生态安全,先使用结构化PSIR初选林业生态安全指标体系,并通过因子分析法提取相应的潜变量因子,然后再通过定量化SEM计量方法来对初始指标进行筛选以得最终指标及其权重,所确定的指标权重能较客观地体现显变量与潜变量间的隶属关系,较目前通常用来确定指标及其权重的熵权法等主观性更弱、客观性更强。实质上,这也是本文创新之所在。

然而,林业产业压力与森林生态的关系异常复杂,选取哪些指标及权重如何确定等,多年来悬而未决且难以在短期内达成共识,这将直接影响林业生态安全评价结果,且目前国际上对林业生态安全的评价也并无权威、公认的指标体系,仍在不断探索中。笔者已尽量选择能够覆盖其各方面的指标,但由于系统复杂,有些指标可能未考虑到而不同程度遗漏或某些指标虽已选取,但在后续筛选过程中,由于数据未通过检验而被舍弃,这就造成了评价结果不准确,在实践中,林业生态安全评价又是一个长期复杂的动态过程,需在实践中进一步完善。当然,指标研究难度很大,历来是“公说公有理,婆说婆有理”,本研究肯定还存在需进一步完善之处,这是一个无止境的艰难探索过程。未来可对本套指标体系修改对生态文明进行评价以此探讨林业产业压力与森林生态的内在深层作用机制,亦可追溯到具体变量,找出区域生态文明问题的原因,为生态文明建设贡献力量。

### 参考文献(Reference):

- [1] 张智光. 面向生态文明的超循环经济:理论、模型与实例[J]. 生

2017年9月

- 态学报, 2017, 37(13): 4549-4561. [Zhang Z G. Hypercycle economy oriented to an ecological civilization: theory, model, and instance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4549-4561.]
- [2] 张智光. 人类文明与生态安全: 共生空间的演化理论[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 1-8. [Zhang Z G. Evolutionary theory of human civilization and ecological security in symbiotic space[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(7): 1-8.]
- [3] 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 Z G. Methodology for measuring forestry ecological security based on ecology-industry symbiosis: a research framework[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1326-1336.]
- [4] Stone C, Old K, Kite G, et al. Forest health monitoring in Australia: national and regional commitments and operational realities[J]. *Ecosystem Health*, 2001, (7): 48-58.
- [5] Allen E. Forest health assessment in Canada[J]. *Ecosystem Health*, 2001, 7(1): 28-34.
- [6] Woodall C W, Morin R S, Steinman J R, et al. Comparing evaluations of forest health based on aerial surveys and field inventories: oak forests in the northern United States[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(3): 713-718.
- [7] Bentley T A, Parker R J, Ashby L, et al. The role of the New Zealand forest industry injury surveillance system in a strategic ergonomics, safety and health research program[J]. *Applied Ergonomics*, 2002, 33(5): 395-403.
- [8] Tkacz B, Moody B, Castillo J V, et al. Forest health conditions in north America[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 155(3): 409-425.
- [9] 米锋, 潘文婧, 朱宁, 等. 模糊综合评价法在森林生态安全预警中的应用[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(6): 66-71+75. [Mi F, Pan W J, Zhu N, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation in forest ecological security warning[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(6): 66-71+75.]
- [10] 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 F, Tan Z H D, Gu Y H, et al. Difference analysis and evaluation of Chinese forest ecological security[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(7): 107-115.]
- [11] 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 X Z, Mi F, Zhang S, et al. Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 3115-3127.]
- [12] 杨伶, 张大红, 王金龙, 等. 中国县域森林生态安全评价研究——以5省15县为例[J]. 生态经济, 2015, 31(12): 120-124. [Yang L, Zhang D H, Wang J L, et al. Study on country forest ecological security evaluation in China: based on empirical data of fifteen pilot counties in five provinces[J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(12): 120-124.]
- [13] 毛旭鹏, 陈彩虹, 郭霞, 等. 基于PSR模型的长株潭地区森林生态安全动态评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(6): 82-86. [Mao X P, Chen C H, Guo X, et al. A dynamic assessment of forest ecological security in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan area based on PSR model[J]. *Journal Central South University Forestry Technology*, 2012, 32(6): 82-86.]
- [14] 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[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3722-3731. [Yuan F, Zhang X Y, Liang J. Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3722-3731.]
- [15] 魏彬, 杨校生, 吴明, 等. 海岛林业生态安全评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 161-164. [Wei B, Yang X S, Wu M, et al. Evaluation of forest ecological security for island[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2010, 34(4): 161-164.]
- [16] 房用, 王淑军. 生态安全评价指标体系的建立——以山东省森林生态系统为例[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(11): 77-82. [Fang Y, Wang S J. Establishment of ecological security assessment system: a case study of forest ecosystems in Shandong province[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(11): 77-82.]
- [17] 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[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 964-973. [Yuan F, Zhang X Y, Liang J. Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the harmful disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 964-973.]
- [18] 叶达, 吴克宁, 刘需珈. 半干旱区农业开发土地资源生态安全评价——以宁夏孙家滩国家农业科技园区为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3): 1099-1105. [Ye D, Wu K N, Liu P J. Ecological security evaluation of land resources based on agricultural development in semi-arid areas[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(3): 1099-1105.]
- [19] 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 Y, Zhang Z G, Xie Y, et al. China's provincial spatial distribution for measuring forest ecological security: based on ecology-industry symbiosis[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2015, 14(5): 480-489.]
- [20] 宋彩平, 朱超平. 基于投影寻踪模型的林业产业生态系统和谐性研究[J]. 林业经济问题, 2015, 25(3): 262-267. [Song C P, Zhu C P. Study on the harmonious state of forest industry eco-

- system based on projection pursuit model[J]. *Forest Economic Issue*, 2015, 25(3): 262-267.]
- [21] Wolfslehner B, Vacik H. Evaluating sustainable forest management strategies with the analytic network process in a pressure state response framework[J]. *Journal of Environment Management*, 2008, 88(1): 1-10.
- [22] United Nation Division for Sustainable Development. Indicators of Sustainable Development: Guideline and Methodologies[R]. New York: UNDSO, 2001.
- [23] Spangenberg J H, Martinez A J, Omann I, et al. The DPSIR scheme for analyzing biodiversity loss and developing preservation strategies[J]. *Ecology Economic*, 2009, 69(1): 9-11.
- [24] Waheed B, Khan F, Veitch B. Linkage-based frameworks for sustainability assessment: making a case for driving pressure state exposure effect action (DPSEEA) frameworks[J]. *Sustainability Science*, 2009, 1(3): 441-463.
- [25] 董沛武, 张雪舟. 林业产业与森林生态系统耦合度测度研究[J]. 中国软科学, 2013(11): 178-184. [Dong P W, Zhang X Z. Measurement study on system coupling between forest and forest ecosystems[J]. *China Soft Science*, 2013(11): 178-184.]
- [26] 张智光. 林业生态安全的共生耦合测度模型与判据[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(8): 90-100. [Zhang Z G. Measuring model and criterion of forestry ecological security by symbiotic coupling method[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(8): 90-100.]
- [27] 谢煜. 林业生态与产业共生协调度评价模型及其应用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009. [Xie Y. Harmonious Symbiosis Evaluation Model and Its Application for Forestry Ecology and Forestry Industry System [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.]
- [28] Kothonen J. Industrial ecosystem the Finnish forest industry: using the material and energy low model of a forest eco-system in a forest industry system[J]. *Ecological Economics*, 2001, 39(1): 145-161.
- [29] Van K G. Certification of sustainable forest management practices: a global perspective on why countries certify[J]. *Forest Policy and Economics*, 2005, 7(6): 857-867.
- [30] Dong P W, Zhuang S Y, Lin X H, et al. Economic evaluation of forestry industry based on ecosystem coupling[J]. *Mathematical and Computer Model*, 2013, 58(5-6): 1010-1017.
- [31] Huang Q, Wang R, Ren Z, et al. Regional ecological security assessment based on long periods of ecological footprint analysis [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51(1): 24-41.
- [32] Jiang M M, Zhou J B, Chen B, et al. Ecological evaluation of Beijing economy based on energy indices[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(5): 2482-2494.
- [33] Siche R, Pereira L, Agostinho F, et al. Convergence of ecological footprint and energy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(10): 3182-3192.
- [34] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2005-2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2015. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook (2005-2015) [M]. Beijing: China Statistical Press, 2005-2015.]
- [35] 中华人民共和国国家林业局. 中国林业统计年鉴(2004-2014)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004-2014. [State Forestry Administration of the People's Republic of China. China Forestry Statistical Yearbook (2004-2014) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004-2014.]
- [36] 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国环境保护部. 中国环境统计年鉴(2004-2014)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004-2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook on Environment (2004-2014) [M]. Beijing: China Statistical Press, 2004-2014.]
- [37] 中国统计信息网. 统计公报总索引/分省区索引[DB/OL]. <http://www.tjcn.org/tjgbsy/nd/3577.html>, 2010-01-22. [China statistical information network. Statistical bulletin total index/each provincial index [DB/OL]. <http://www.tjcn.org/tjgbsy/nd/3577.html>, 2010-01-22.]
- [38] 中国知网, 中国学术期刊电子杂志有限公司. 中国经济与社会发展统计数据库/统计年鉴导航[DB/OL]. <http://tongji.cnki.net/kns55/Navi/NaviDefault.aspx>. [CNKI, China academic journal electronic magazine co. LTD. China economy and social development statistical database/ statistical yearbook index [DB/OL]. <http://tongji.cnki.net/kns55/Navi/NaviDefault.aspx>.]
- [39] 张智光. 决策科学与艺术[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [Zhang Z G. Decision-making Science and Art [M]. Beijing: Science Publishing House, 2006.]
- [40] 徐秀英, 马天乐, 刘俊昌. 南方集体林区林权制度改革研究[J]. 林业科学, 2006, 42(8): 121-129. [Xu X Y, Ma T L, Liu J C. Study on forest property rights system reform in collective forest area of south China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(8): 121-129.]



# The empirical measurement of coupling from indicators to indexes of forestry ecological security

LIAO Bing<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhiguang<sup>1,2</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. System Engineering Institute for Environment and Development, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Studying the calculation of forestry ecological security is significant for managers to determine policy for supervising forestry ecological security and promote ecological civilization. This study aimed to overcome defects in existing research regarding the essential attribute of forestry ecological security: symbiosis between forestry industry pressure and forest ecology. First, indicators and weightings were determined by means of pressure-state-impact-response(PSIR) and structural equation modeling(SEM). Second, with data for China and thirty-one provinces from 2004-2015, symbiotic degree indexes with ecology economic significance and judgment criteria of forestry ecological security were constructed using Lotka-Volterra method, realizing the coupling from indicators to indexes. Last, the empirical calculation of forestry ecological security in China and thirty-one provinces was carried out and indicators were tracked to determine key reasons for existing problems according to calculated indexes, realizing decoupling from indexes to indicators. We found that the Chinese forestry industry pressure and forest ecology are not at the state of green symbiosis so that forestry ecological security is at state of pre-warning and the potential hidden risk of forestry ecological security will appear; there will be a very long way to go. In all 31 provinces, the quantities of provinces in a state of pre-warning for forestry ecological security(including 18 provinces, 58%) are more than the quantities of provinces which are at state of forestry green security (including 13 provinces, 42%). Forestry green security not only depends on resource endowment and natural conditions but also the symbiotic state between the forestry industry pressure and forest ecology.

**Key words:** forest ecology; forestry industry pressure; ecology and industry symbiosis; forestry ecological security; indicators system; characteristic indexes; coupling and decoupling