

中国林业生态安全综合评估： 基于时空格局分析

鲁莎莎 姚月 张大红 米锋 顾艳红 高显俊

摘要 林业生态安全是指森林、湿地和荒漠三大生态系统处于安全且生物多样性的丰富程度得到保证的状态。作者基于压力—状态—响应模型构建了林业生态安全评价指标体系，并测度了1999~2012年中国及31个省份森林、湿地、荒漠及林业系统的生态安全指数和相对指数，深入剖析中国林业生态系统及其三大子系统的生态安全时空演变与地域分异特征。结果表明：①研究期间中国森林生态系统安全呈持续改善趋势，三大林区的森林生态安全状况明显优于其他地区，东部和中部地区森林生态安全改善显著，西部部分地区则有退化迹象。②湿地生态系统安全状况总体呈现一定程度恶化，长江中下游地区和西南地区湿地生态安全整体水平较高，上海及河南的恶化程度较为严重。③荒漠生态系统安全状况呈大幅度波动且有小幅度恶化态势，南北差异显著，秦岭—淮河线以南明显优于以北地区，但以南地区有退化趋势，而以北地区呈现改善态势。④中国林业生态安全指数由1999年的0.5567增加到2012年的0.5813，林业生态安全状况总体呈改善趋势。在空间上呈现“南高北低”的分异规律，长江以南地区和东北地区的林业生态安全水平较高，中部和南部省份的林业生态安全改善最为显著，新疆、宁夏、西藏等地的林业生态安全需重点关注。

关键词 林业生态安全 森林生态安全 荒漠生态安全 湿地生态安全
综合评估

[中图分类号] F326.2 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2017) 04-0061-18

【基金项目】 教育部人文社科研究项目“北京市森林生态安全评价与预警调控研究”（批准号：14YJCZH106）；国家自然科学基金青年项目“环渤海地区农业地域类型格局及其优化途径研究”（批准号：41401192）；北京市社会科学基金项目“农户可持续生计视角下环首都贫困带林下经济精准扶贫研究”（批准号：16SRB011）。

【作者简介】 鲁莎莎（1984-），北京林业大学经济管理学院副教授、硕士生导师，邮政编码：100083；姚月（1993-），北京林业大学经济管理学院本科生；张大红（1959-），北京林业大学经济管理学院教授，本文通讯作者；米锋（1976-），北京林业大学经济管理学院教授；顾艳红（1975-），北京林业大学理学院副教授；高显俊（1980-），北京林业大学信息中心高级工程师。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

一、引言

随着全球变暖和生态环境的恶化,生态安全问题已成为全球焦点。中国作为全球最大的发展中国家,随着经济快速增长,资源过度开发、能源迅猛消耗、环境持续恶化等问题接踵而至。如何有效解决环境问题,加快推进生态文明建设,是当前中国实现经济社会可持续发展的关键所在。林业在生态安全维护和生态文明建设中发挥着举足轻重的作用(张升、戴广翠,2010)。林业生态系统是生态环境的重要屏障和安全保障,对于实现经济社会可持续发展和资源永续利用具有重要价值,加强林业生态安全研究势在必行(张智光,2013)。

林业是生态建设的重要组成部分,是生态安全的基础和核心,有效的林业生态安全评价能够了解林业生态安全状况,发现生态环境问题,从而为林业生态环境保护和建设提供依据(俞孔坚等,2009)。学术界对于林业生态系统及其三大子系统(森林、湿地、荒漠)的安全评价开展了卓有成效的研究,在评价指标体系构建方面,主要是从生物完整性指数(Karr,1981)、生态系统结构(贾宝全等,2001;魏彬等,2010)、生态系统功能(邹长新等,2012;张频等,2013)、有害干扰(刘心竹等,2014;朱卫红等,2014)、外界压力(Ji,2007;陈军纪等,2015;米锋等,2015)、生态保护修复(吴波等,2005)等角度考虑;在评价方法方面,主要基于层次分析法(杨时民等,2006;张频等,2013;陈军纪等,2015)、熵权法(魏彬等,2010;米锋等,2015)、主成分分析法(刘心竹等,2014)等确定指标权重,并采用模糊评价法(邹长新等,2012)、综合指数法(魏彬等,2010;朱卫红等,2014;米锋等,2015)、物元法(张频等,2013)等方法综合测度生态安全指数;从研究尺度看,当前研究主要集中在区域尺度,如自然保护区(汪朝辉等,2009)、流域地区(Maingi and Marsh,2001;张运、张贵,2012)、荒漠化地区(Olsson,1985;殷贺,2011)等备受关注,但国家尺度关注较少(赵其国、高俊峰,2007;王玺婧等,2012;刘心竹等,2014)。总体来看,林业生态安全研究日渐受到重视,但系统性和综合性研究不够,尤其是从空间和时间两个维度对中国林业生态系统及其三个子系统生态安全开展的综合研究不足。

本文构建了涵盖森林、湿地和荒漠三大生态系统的林业生态安全评估指标体系,测度了1999~2012年中国林业生态系统及其三个子系统的生态安全指数与相对指数,分析了1999年和2012年两个典型年份的省域林业系统及三个子系统的生态安全时空格局及地域特征。本研究有助于了解中国林业生态系统的生态安全变动情况,可为防范林业生态风险和政策制定提供决策支持。

二、数据来源与研究方法

(一) 数据来源

考虑到各省份指标数据可获性等因素,本文选取1999年和2012年这两个典型年

份深入剖析全国 31 个省份（不包括香港、澳门和台湾）林业生态系统及其三个子系统的生态安全时空演变与地域分异特征。数据主要来源于历年《中国统计年鉴》《中国林业统计年鉴》以及《中国环境统计年鉴》。

（二）林业生态安全评价指标体系

林业生态系统是以林业生态资源为基础，在林业生态资源及其环境功能流的作用下形成的具有一定结构、功能和自调控的自然综合体（张智光，2013）。郭海和陈文汇（2013）、张志涛（2011）和张煜星（2017）等指出林业生态系统包含森林、湿地和荒漠三个子系统。因此，本文的林业生态安全就是指三大生态系统均安全，同时生物多样性的丰富程度得到保证的状态。传统林业以传统的用材林培育为主体，涵盖森林植物、森林生态、林木育种和种子生产、苗木培育、人工林营造、森林经营及森林保护等主要内容。本文所指林业与传统林业的联系与区别在于：传统林业强调单一产品或价值的生产，而本文林业经营强调森林、湿地和荒漠资源的全部价值和效益；传统林业的经营单位是林分或林分集合体，而本文林业经营的对象是整个森林、湿地、荒漠三大生态系统；传统林业的经营注重森林的储量和定期产量，而本文林业首先注重的是森林、湿地、荒漠的状态，其次才是储量和定期产量；本文林业生态安全主张人类在对森林、湿地、荒漠资源科学合理利用的同时更强调整个生态系统的协调性。

本文基于林业生态安全的概念，遵循科学性、系统性、可比性、针对性、代表性、实用性等原则（鲁莎莎等，2017），并参考 20 名专家意见，构建了林业生态安全评价指标体系（见表 1）。该体系以压力—状态—响应（Pressure-State-Response, PSR）模型为基础，但有别于传统的 PSR 模型，分别构建了状态层评价指标体系和压力层评价指标体系。状态层指标包含林业生态系统自身的物质资源状况、系统结构、系统自身的恢复性（或者抗干扰能力）等方面，以衡量系统自我调节和自我修复的能力，能力越强表明林业生态系统越安全。压力层指标主要反映人类消耗、占用、破坏和维护林业资源的行为和强度，以衡量林业生态系统所承载压力的大小，压力越大则说明林业生态系统越不安全。此外，本文将原 PSR 模型中的响应层行为，即人类意识到林业生态系统重要性而采取措施对其进行维护、改善这一行为视为对外界压力的缓解，作为压力层指标的逆指标融入压力层中，进行评价指标体系的构建。为避免人为因素影响，利用专家打分法结合熵权法这一客观赋权法来确定指标权重。

森林生态安全状态评价指标中，资源量指标是从森林生态系统自身的物质资源状况来反映森林生态安全情况。复杂性指标是从森林的结构状态和物种多样性来反映森林生态安全状况，森林生态系统物种丰富度越高，结构越复杂，抵抗外界干扰的能力则相应越强，其安全性越高。灾害性指标间接反映森林生态系统的恢复性（或者抗干扰能力）。湿地生态安全状态评价指标中，资源量指标是从湿地生态系统自身的物质资源状况来反映湿地生态安全情况。复杂性指标是从湿地的结构状态和物种多样性来反映湿地生态安全情况，湿地自身结构越复杂，抵抗外界干扰的能力越强，湿地生态系统的稳定性、安全性越高。灾害性指标作为间接反映湿地生态系统恢复性的指

标,旨在表征湿地自身受到外界有害干扰的严重程度。荒漠生态安全状态评价指标中,资源量指标从荒漠生态系统自身的物质资源状况来反映荒漠生态系统资源量的状况。对于土壤类指标和土地类型指标来说,荒漠生态系统的土壤和土地类型,直接影响植被的生长状况,即直接影响着荒漠生态系统的稳定性。

森林生态系统压力评价指标中,综合压力指标是从人类开发利用森林资源的数量和强度来反映森林生态压力状况。人类消耗森林资源的压力指标是从消耗森林中的木材、其他植物、动物、能源等资源来反映人类对森林生态系统带来的压力。人类占用森林资源的压力指标是从人工建筑和旅游开发占用森林资源的程度来反映森林生态压力状况。人类维护森林资源的压力指标是从人类对森林生态系统的投资建设来反映森林生态安全状况。湿地生态系统压力评价指标中,综合压力指标是从人类开发利用湿地资源的数量和强度来反映湿地生态压力状况。人类消耗湿地资源的压力指标是从水资源消耗指数来考虑的,地区工农业用水、居民生活用水越多,对湿地造成的压力也越大。人类破坏湿地资源的压力指标是从人类对湿地水资源污染、破坏行为来反映湿地生态安全状况。人类维护湿地资源的压力指标是人类对水资源、水环境进行保护和治理方面来反映湿地生态安全状况。荒漠生态系统压力评价指标中,综合压力指标是从人类对不变资源的需求、污染物排放和环境恶化程度来反映资源压力。人类消耗荒漠资源的压力指标是从水资源消耗指数来考虑的,人类消耗的水资源量越大,对荒漠生态系统造成的压力就越大。人类占用荒漠资源的压力指标是从人类占用、利用、破坏荒漠资源来反映荒漠生态安全状况。人类维护荒漠资源的压力指标是从人类通过财政支持来治理风沙荒漠和水土流失方面来反映人类维护资源的行为对整个荒漠生态系统的稳定所起的积极促进作用。

表 1 林业生态安全评价指标体系

目标层	准则层	一级指标	二级指标
森林生态安全指标体系	森林生态安全状态指标	资源量指标(0.7783)	单位面积森林蓄积量(0.2330);单位面积活立木蓄积量(0.2082);森林覆盖率(0.1491);单位林地面积林木蓄积量(0.1880)
		复杂性指标(0.1997)	天然林比重(0.1180);公益林比重(0.0817)
		灾害性指标(0.0220)	森林火灾受灾率(0.0027);森林病虫害成灾率(0.0079);森林病虫害发生率(0.0114)
	森林生态安全压力指标	综合压力指标(0.4021)	人口密度指数(0.0628);产业结构指数(0.0424);单位面积GDP指数(0.1570);人类工程占用土地比重(0.0632);单位面积固体废物产生量(0.0767)
		人类消耗森林资源的压力(0.4344)	单位森林面积人口数量(0.2353);森林采伐强度(0.1991)
		人类占用森林资源的压力(0.1599)	森林旅游开发强度(0.1599)
		人类维护森林资源的压力(0.0038)	林业完成投资率(0.0038)

续表

目标层	准则层	一级指标	二级指标
湿地生态安全指标体系	湿地生态安全状态指标	资源量指标(0.5187)	湿地面积占比(0.5187)
		复杂性指标(0.4623)	自然湿地比重(0.0412);永久性湿地比重(0.3115);丰水期月数占比(0.1096)
		灾害性指标(0.0191)	湿地旱灾受灾率(0.0076);湿地水灾受灾率(0.0115)
	湿地生态安全压力指标	综合压力指标(0.5876)	人口密度指数(0.1719);产业结构指数(0.0494);单位面积GDP指数(0.2413);人类工程占用土地比重(0.1250)
		人类消耗湿地资源的压力(0.1686)	水资源消耗率指数(0.1686)
		人类破坏湿地资源的压力(0.2401)	污水排放强度(0.0826);化肥负荷强度(0.0917);农药负荷强度(0.0658)
		人类维护湿地资源的压力(0.0037)	工业废水排放达标率(0.0034);湿地恢复与保护投资率(0.0003)
荒漠生态安全指标体系	荒漠生态安全状态指标	资源量指标(0.9041)	单位面积地表水资源量(0.6255);单位面积地下水资源量(0.2786)
		土壤类指标(0.1062)	单位面积土地沙化比率(0.1062)
	荒漠生态安全压力指标	综合压力指标(0.4424)	人口密度指数(0.1386);产业结构指数(0.1471);单位面积GDP指数(0.1567)
		人类消耗荒漠资源的压力(0.2978)	水资源消耗指数(0.2978)
		人类占用荒漠资源的压力(0.2356)	单位面积内耕地面积占比(0.0128);单位面积牲畜头数(0.0217);农业生产资料价格总指数(0.0317);畜牧业产值占比(0.1573);第一产业占总产值比重(0.0121)
		人类维护荒漠资源的压力(0.0191)	单位面积有效灌溉比例(0.0191)

注：括号中为各指标的权重值。

资料来源：作者计算整理。

(三) 评价方法

基于以上评价指标体系，本文评估了中国林业生态系统及其三大子系统的生态安全时空演变特征。评估主要采用生态安全指数和相对指数，前者用以衡量全国及各省份林业及三大子系统生态安全的时序变化；后者通过比较两个不同年份林业生态系统及三大子系统的生态安全指数，以展现全国及各省份林业及其子系统生态安全状况的变动情况。

为便于公式表述，CI (Composite Index)、SI (Status Index)、PI (Pressure Index) 表示生态安全指数、状态指数和压力指数，FCI (Forest Composite Index)、WCI (Wetland Composite Index)、DCI (Desert Composite Index) 表示森林、湿地和荒漠生态状态指数，FPI (Forest Pressure Index)、WPI (Wetland Pressure Index)、DPI

(Desert Pressure Index) 表示森林、湿地和荒漠生态压力指数。

1. 林业生态安全指数

(1) 各省份森林(湿地、荒漠)生态安全指数

森林(湿地、荒漠)生态安全指数计算公式为:

$$CI_{mk} = \sqrt{SI_{mk}(1 - PI_{mk})} \quad (1)$$

$$SI_{mk} = \sum_{i=1}^I \lambda_i \cdot Z_{mki} \quad (2)$$

$$PI_{mk} = \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot Z_{m kj} \quad (3)$$

其中, CI_{mk} 为地区 m 、年份 k 的森林(湿地、荒漠)生态安全指数; SI_{mk} 、 PI_{mk} 分别表示地区 m 、年份 k 的森林(湿地、荒漠)生态安全状态指数和生态安全压力指数; Z_{mki} 为地区 m 、年份 k 、森林(湿地、荒漠)生态安全状态指标 i 的标准化值; $Z_{m kj}$ 为地区 m 、年份 k 、森林(湿地、荒漠)生态安全压力指标 j 的标准化值; λ_i 、 β_j 分别为森林(湿地、荒漠)生态安全状态指标 i 和生态安全压力指标 j 的权重。其中, 权重采用熵权法结合专家打分法来确定(米锋等, 2015), 数据标准化采用离差标准化方法, 计算公式如下:

$$Z_{mki} = \frac{x_{mki} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

$$Z_{mki} = \frac{x_{\max} - x_{mki}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

其中, x_{mki} 表示地区 m 、年份 k 的森林(湿地、荒漠)生态安全指标 i (状态、压力指标), x_{\max} 、 x_{\min} 分别表示指标 i 的最大值和最小值。正向指标采用公式(4), 负向指标则采用公式(5)。

(2) 全国森林(湿地、荒漠)生态安全指数

全国森林(湿地、荒漠)生态安全指数计算公式为:

$$CI_k = \sqrt{SI_k(1 - PI_k)} \quad (6)$$

其中, CI_k 为全国第 k 年份的森林(湿地、荒漠)生态安全指数; SI_k 为全国第 k 年份森林(湿地、荒漠)生态安全状态指数; PI_k 为全国第 k 年份森林(湿地、荒漠)生态安全压力指数。

不同省份的区位条件差异对全国森林(湿地、荒漠)生态安全状况评定有着不同的影响, 且区位因素仅针对森林(湿地、荒漠)生态系统的自身状态有影响, 不涉及外界施加的压力。因此, 本文引入区位系数(Q_m)作为修正系数计算全国森林(湿地、荒漠)生态系统的状态评估值, 而不是所有省域情况的简单相加(汤旭等, 2018), 并综

合运用专家打分法和熵权法确定生态区位系数各评价因子的权重（见表2）。

表2 生态区位的指标体系权重

年降水量	平均气温	年均积温	日照时数	风速	平均海拔	坡向	坡度
0.245	0.237	0.134	0.201	0.020	0.065	0.052	0.046

资料来源：作者计算整理。

因此，全国第 k 年份的森林（湿地、荒漠）生态系统状态指数 SI_k 的计算公式为：

$$SI_k = \frac{\sum_{m=1}^M (Q_m \cdot CI_{mk})}{Q} \quad (7)$$

其中， Q_m 为地区 m 的区位系数，取 $Q = \sum_{m=1}^M Q_m$ 。

因计算全国森林、湿地和荒漠生态系统的压力指数计算公式不同且需引入不同的权重，森林、湿地和荒漠生态系统压力指数的计算公式为：

$$FPI_k = \prod_{m=1}^M (FPI_{mk})^{\frac{FSV_m}{FSV}} \quad (8)$$

$$WPI_k = \prod_{m=1}^M (WPI_{mk})^{\frac{WA_m}{WA}} \quad (9)$$

$$DPI_k = \frac{1}{DA} \sum_{m=1}^M (DPI_{mk} \cdot DA_m) \quad (10)$$

其中， FPI_k 和 FPI_{mk} 分别为全国和地区 m 在第 k 年份的森林生态系统压力指数， FSV_m 为地区 m 的森林蓄积量， FSV 为全国森林蓄积量之和； WPI_k 和 WPI_{mk} 分别为全国和地区 m 在第 k 年份的湿地生态系统压力指数， WA_m 为地区 m 的湿地面积， WA 为全国湿地面积之和； DPI_k 和 DPI_{mk} 分别为全国和地区 m 在第 k 年份的荒漠生态系统压力指数， DA_m 为地区 m 的荒漠面积， DA 为全国荒漠面积之和。

(3) 林业生态系统生态安全指数

各省、各年份林业生态安全指数的计算公式为：

$$I_{mk} = d_1 \cdot FCI_k + d_2 \cdot WCI_k + d_3 \cdot DCI_k \quad (11)$$

其中， I_{mk} 为地区 m ，年份 k 的林业生态系统生态安全指数； FCI_{mk} 、 WCI_{mk} 、 DCI_{mk} 分别为地区 m ，年份 k 的森林生态系统、湿地生态系统、荒漠生态系统的生态安全指数； d_1 、 d_2 、 d_3 分别为地区 m 的森林、湿地、荒漠生态系统占林业生态系统总面积（森林、湿地、荒漠三者之和）的比例。

全国林业生态系统生态安全指数的计算公式为：

$$I_k = \varphi \cdot FCI_k + \psi \cdot WCI_k + \xi \cdot DCI_k \quad (12)$$

其中, I_k 为年份 k 的林业生态系统生态安全指数; FCI_k 、 WCI_k 、 DCI_k 分别为年份 k 的森林生态系统、湿地生态系统和荒漠生态系统生态安全指数; φ 、 ψ 、 ξ 分别为森林、湿地、荒漠生态系统占林业生态系统总面积(森林、湿地、荒漠三者之和)的比例。

2. 生态安全相对指数

林业生态安全相对指数的计算公式为:

$$RI_k = \frac{I_k}{I_0} \times 100 \quad (13)$$

其中: RI_k 为年份 k 的生态安全相对指数; I_0 为基年的生态安全指数; I_k 为年份 k 的生态安全指数。森林、湿地、荒漠三大子系统生态安全相对指数的计算公式与上述林业生态安全的公式类似。

三、结果与分析

(一) 森林子系统生态安全分析

评估结果显示, 1999~2012年中国森林生态安全指数逐年上升, 森林生态系统的安全性大幅提高(见表3)。以1999年为基期(1999年=100)和上一年为基期(上一年=100), 测算得到的中国森林生态安全相对指数均大于100。尽管每年森林生态安全指数的增长幅度不大, 但这种稳定且持续的增长积累到研究期末年时, 森林生态安全状况相比起始年出现了显著的改善, 说明中国森林生态安全建设整体取得了积极成效。

表3 中国森林生态安全指数及其相对指数

基期 报告期	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1999	0.5418	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2000	100.73	0.5457	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2001	101.34	100.61	0.5490	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2002	102.17	101.44	100.82	0.5535	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2003	102.91	102.17	101.55	100.72	0.5575	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2004	103.71	102.96	102.34	101.51	100.78	0.5619	—	—	—	—	—	—	—	—
2005	104.47	103.72	103.08	102.25	101.52	100.73	0.5660	—	—	—	—	—	—	—
2006	104.96	104.21	103.57	102.73	102.00	101.21	100.47	0.5687	—	—	—	—	—	—
2007	105.53	104.77	104.13	103.28	102.55	101.75	101.02	100.54	0.5717	—	—	—	—	—
2008	106.24	105.47	104.83	103.98	103.23	102.43	101.69	101.21	100.67	0.5755	—	—	—	—
2009	107.16	106.39	105.74	104.88	104.13	103.33	102.58	102.09	101.55	100.87	0.5806	—	—	—

续表

基期 报告期	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
2010	107.96	107.18	106.53	105.66	104.91	104.10	103.34	102.85	102.30	101.62	100.75	0.5849	—	—
2011	108.72	107.93	107.28	106.40	105.64	104.83	104.07	103.57	103.02	102.34	101.45	100.70	0.5890	—
2012	109.74	108.95	108.29	107.41	106.64	105.82	105.05	104.55	103.99	103.30	102.41	101.65	100.94	0.5945

注：灰色部分数据为各年份森林生态安全指数。

资料来源：作者计算整理。

由1999年和2012年中国各省份的森林生态安全指数（见图1）可以看出，森林生态安全指数较高的省份主要位于三大林区（东北林区、西南林区、南方林区）。1999年，森林生态安全指数在0.45以下的省（市）集中分布在西北地区（包括新疆、宁夏和青海）、华北平原地区（包括北京、天津、河北、河南、山东、江苏、安徽）以及黄土高原东部地区；2012年，中部所有省（市）的森林生态安全指数均在0.45以上，指数在0.45以下的省（市）集中位于西北和华北地区。

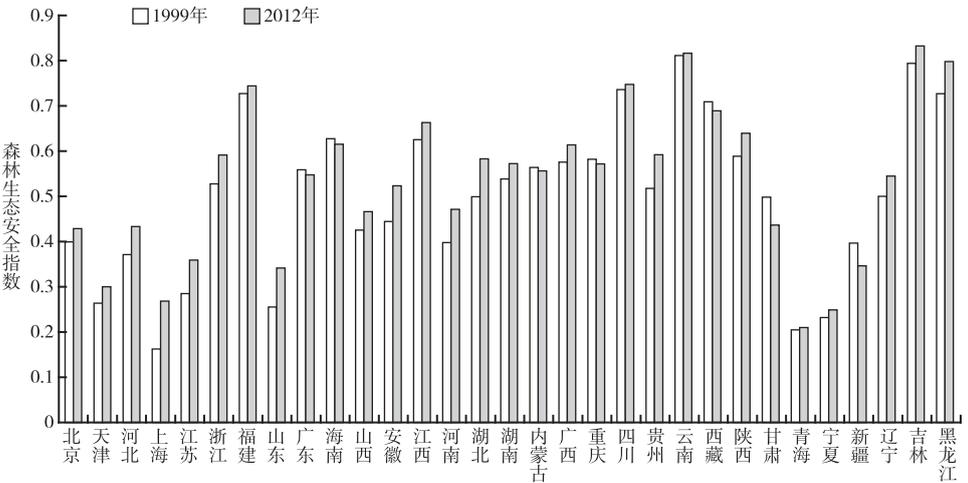


图1 1999年和2012年中国各省份的森林生态安全指数

资料来源：作者绘制。

（二）湿地子系统生态安全分析

中国湿地生态安全指数整体呈现缓慢下降趋势，安全指数由1999年的0.5777略为下降到2012年的0.5756（见表4）。以上一年为基期，仅有2001年、2003年、2004年、2008年4个年份的生态安全指数有所提高，其他9个年份皆有所下降，下降最突出的是2007年（ RI 为99.86），提高最为显著的是2008年（ RI 为100.08）。

总体来看,中国湿地生态安全状况呈现恶化态势,尤其是从2006年开始均劣于1999年水平,湿地生态安全状况持续恶化。

表4 中国湿地生态安全指数及其相对指数

基期 报告期	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1999	0.5777	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2000	99.98	0.5775	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2001	100.03	100.05	0.5778	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2002	100.01	100.03	99.97	0.5777	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2003	100.02	100.05	99.99	100.02	0.5778	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2004	100.03	100.05	100.00	100.03	100.01	0.5778	—	—	—	—	—	—	—	—
2005	100.01	100.03	99.97	100.00	99.98	99.97	0.5777	—	—	—	—	—	—	—
2006	99.91	99.94	99.89	99.91	99.89	99.89	99.91	0.5772	—	—	—	—	—	—
2007	99.78	99.80	99.75	99.78	99.76	99.75	99.78	99.86	0.5764	—	—	—	—	—
2008	99.85	99.88	99.83	99.85	99.83	99.83	99.85	99.94	100.08	0.5768	—	—	—	—
2009	99.76	99.78	99.73	99.76	99.74	99.73	99.76	99.84	99.98	99.90	0.5762	—	—	—
2010	99.74	99.77	99.72	99.74	99.72	99.72	99.74	99.83	99.97	99.89	99.99	0.5762	—	—
2011	99.66	99.68	99.63	99.65	99.63	99.63	99.65	99.74	99.88	99.80	99.90	99.91	0.5757	—
2012	99.65	99.68	99.62	99.65	99.63	99.62	99.65	99.74	99.87	99.80	99.89	99.91	99.99	0.5756

注:灰色部分数据为各年份湿地生态安全指数。

资料来源:作者计算整理。

由1999年和2012年中国各省份的湿地生态安全指数(见图2)可以看出,中国湿地生态安全指数较高的省份主要位于东北地区、中部地区以及西南地区(包括西藏、

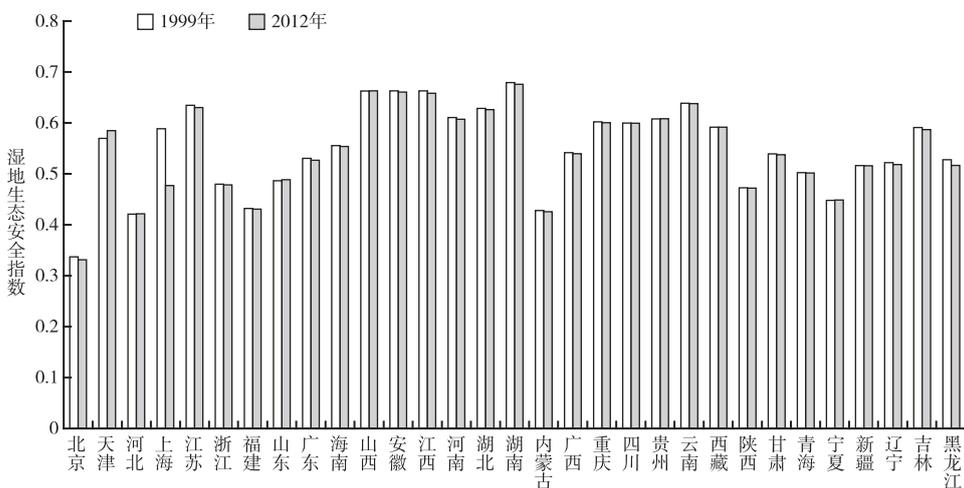


图2 1999年和2012年中国各省份的湿地生态安全指数

资料来源:作者绘制。

四川、云南、贵州、重庆)，指数较低的省份主要位于华北地区（包括北京、河北、山东）、西北地区和东南沿海部分地区（包括上海、浙江、福建、广东）。从指数变化来看，只有上海由 0.5887 降为 0.4772、河南由 0.6106 降为 0.6075，其他省份指数无明显变化。总体上，中国湿地生态安全状况呈小幅度恶化趋势，但整体上相对稳定。

（三）荒漠子系统生态安全分析

1999~2012 年中国荒漠生态安全指数呈现较大波动，且有小幅度恶化态势（见表 5）。以 1999 年为基期，计算其他年份的生态安全相对指数可知，仅有 2010 年度的相对指数大于 100，这说明中国荒漠生态安全状况持续性恶化，荒漠生态安全状况均劣于 1999 水平，且到 2004 年达到最差状态，随后有所改善直至 2010 年达到最优状态，但紧接着 2011 年荒漠生态安全状况出现了较大幅度的下降，2012 年又有较大改善，但未恢复到最优水平。以上一年为基期计算荒漠生态安全相对指数，可知最大值出现在 2012 年（110.49），最小值为 2011 年（88.47），表明生态安全相对指数呈现大幅度的波动，中国荒漠生态系统较不稳定。

表 5 中国荒漠生态安全指数及其相对指数

基期 报告期	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1999	0.5675	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2000	98.68	0.5599	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2001	96.31	97.60	0.5465	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2002	96.12	97.40	99.80	0.5454	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2003	96.84	98.13	100.54	100.75	0.5495	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2004	89.78	90.98	93.22	93.41	92.72	0.5095	—	—	—	—	—	—	—	—
2005	97.90	99.21	101.65	101.65	101.10	109.04	0.5555	—	—	—	—	—	—	—
2006	94.76	96.03	98.39	98.59	97.86	105.55	96.80	0.5377	—	—	—	—	—	—
2007	93.91	95.16	97.50	97.70	96.97	104.59	95.92	99.09	0.5329	—	—	—	—	—
2008	97.19	98.49	100.91	101.12	100.37	108.25	99.28	102.56	103.50	0.5515	—	—	—	—
2009	92.96	94.21	96.52	96.72	96.00	103.54	94.96	98.10	99.00	95.65	0.5275	—	—	—
2010	101.82	103.19	105.72	105.94	105.15	113.41	104.01	107.45	108.43	104.77	109.53	0.5778	—	—
2011	90.09	91.29	93.53	93.72	93.03	100.34	92.02	95.06	95.93	92.69	96.90	88.47	0.5112	—
2012	99.54	100.87	103.35	103.56	102.79	110.87	101.68	105.04	106.00	102.42	107.07	97.76	110.49	0.5648

注：灰色部分数据为各年份荒漠生态安全指数。

资料来源：作者计算整理。

由中国各省份的荒漠生态安全指数（见图 3）可以看出，中国省域荒漠生态安全状况呈现显著的南北差异，安全指数较高的省份主要位于秦岭—淮河线以南，尤其是指数在 0.6 以上的省份多分布于长江中下游地区以及珠江流域地区，总体呈现出中部和南部优于北部的分布格局。

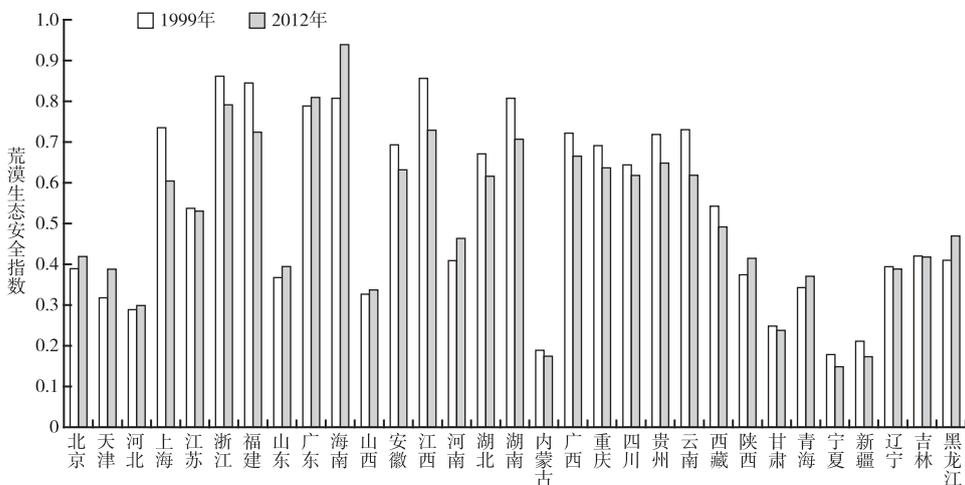


图3 1999年和2012年中国各省份的荒漠生态安全指数

资料来源：作者绘制。

(四) 林业生态系统生态安全分析

研究期间中国林业生态安全指数由1999年的0.5567增加到2012年的0.5813，林业生态系统呈现改善趋势，但不同年份起伏较大，上涨与下跌交替出现。以1999年为基期，林业生态安全相对指数的最小值为2004年（ RI 为97.26），最大值出现于2010年和2012年（ RI 均为104.43），可见研究期内中国林业生态环境状况有了较大幅度的改善。尽管研究期内林业生态安全指数下降的年份颇多，但上涨时的幅度较大，因此，中国林业生态系统安全状况仍以改善为主要趋势。以上一年为基期计算林业生态安全相对指数，最大值出现在2012年（ RI 为104.31），最小值出现在2011年（ RI 为95.87），表明2012年是中国林业生态安全状况改善幅度最大的一年，2011年则是恶化程度最严重的一年。

分省域来看，中国各省林业系统生态安全状况呈现显著差别（见表6），2012年的生态安全指数介于0.19~0.82，安全指数最高省份（云南省）是最小省份（新疆）的4.22倍，1999~2012年有23个省份的林业生态安全指数有所增长。林业生态安全最优的五个省份依次是云南、吉林、黑龙江、四川、福建，最为堪忧的五个省份依次是新疆、宁夏、甘肃、内蒙古、青海。从变动来看，31个省份的生态安全指数平均值由1999年的0.5119增加到2012年的0.5306，提高了3.65%，说明研究期间中国林业生态安全状况改善趋势较为明显，其中贵州（14.13%）、河北（13.83%）、湖北（12.62%）的改善程度最为显著，上海（-22.28%）、新疆（-14.60%）、西藏（-5.04%）则表现为恶化态势较为突出。

表 6 中国林业生态安全指数及其级别变动

地区	1999 年生态安全指数	2012 年生态安全指数	变动百分比 (%)	级别变动	地区	1999 年生态安全指数	2012 年生态安全指数	变动百分比 (%)	级别变动
云南	0.8093	0.8158	0.80	不变	安徽	0.4868	0.5458	12.12	不变
吉林	0.7398	0.7732	4.52	不变	辽宁	0.4959	0.5304	6.94	不变
黑龙江	0.6821	0.7432	8.97	不变	江苏	0.5299	0.5053	-4.63	不变
四川	0.7224	0.7344	1.66	不变	河南	0.4355	0.4873	11.89	四级升为三级
福建	0.7166	0.7335	2.36	不变	天津	0.4519	0.4722	4.49	四级升为三级
江西	0.6344	0.6683	5.35	不变	山西	0.4364	0.4705	7.81	四级升为三级
海南	0.6252	0.6195	-0.91	不变	上海	0.5645	0.4388	-22.28	二级降为四级
广西	0.5779	0.6140	6.25	不变	北京	0.3912	0.4258	8.84	不变
陕西	0.5483	0.6053	10.40	三级升为二级	山东	0.3690	0.3998	8.35	不变
贵州	0.5199	0.5933	14.13	三级升为二级	河北	0.3456	0.3934	13.83	不变
湖北	0.5244	0.5906	12.62	三级升为二级	青海	0.3548	0.3703	4.37	不变
湖南	0.5594	0.5872	4.97	不变	内蒙古	0.3115	0.3209	3.02	不变
浙江	0.5259	0.5857	11.37	三级升为二级	甘肃	0.3107	0.3127	0.66	不变
西藏	0.6049	0.5744	-5.04	不变	宁夏	0.2269	0.2164	-4.65	不变
重庆	0.5815	0.5741	-1.27	不变	新疆	0.2264	0.1934	-14.60	不变
广东	0.5607	0.5524	-1.48	不变	平均值	0.5119	0.5306	3.65	—

注：本文采用自然断裂点法分别将两个年份的省域林业生态安全指数分为五个等级，并比较各省份级别的变动。

资料来源：作者计算整理。

从空间格局和分级结果看，中国省域的林业生态安全状况在空间上基本呈现出南高北低的分布特征，生态安全指数处于三级以上的省份主要位于长江以南地区和东北地区，四级和五级省份主要位于西北地区；值得注意的是环渤海湾地区的林业生态系统不容乐观，在京津冀一体化背景下，未来该区域城镇化进程将快速推进，可能会给该区域林业生态系统造成生态威胁。从分级变动看，有 23 个省份的级别未发生变化，8 个省份的级别发生了升降，其中贵州、湖北、浙江、陕西四省份由三级升为二级，河南、山西、天津三省市由四级升为三级，上海则由二级降为四级，是唯一级别下降的省市。整体来看，各省份的林业生态系统生态安全状况呈现改善态势。

目前很多学者对森林、湿地和荒漠生态安全评价进行了研究。就森林生态安全而言，北京市 2000~2012 年森林生态安全状况总体向好便是由于自 2000 年以来政府大幅增加林业投资额，森林覆盖率逐年提升 (Li et al., 2015)。就湿地生态安全而言，中国内陆湖泊 2005~2012 年生态安全总体保持良好状态，Zhang 和 Gao (2016) 研究发现生态系统的压力主要来自于人类社会经济活动造成的高污染负荷，但由于政府对南湾湖流域的管理和保护工作日益重视，从而改善了湿地生态安全状况。山东省莱州湾沿海平原湿地处于亚健康状态，Han (2010) 研究发现影响因素主要包括洪涝、干

旱、化肥和农药的污染、污水排放、水资源严重短缺等自然条件和人类活动带来的外界影响。就荒漠生态安全而言,西藏自治区沙漠化在1977~2010年有所好转。其中,1977~2000年,西藏荒漠边缘地带在持续干旱背景下,其人口密度大及人的不合理行为成为导致荒漠化恶化的重要因素。自2000年起,由于相关生态恢复措施的实施,耕地面积和牲畜数量稳定下降,荒漠化面积逐渐减少(Li et al., 2016)。内蒙古腾格里沙漠南部大部分地区2001年以后一直朝着逐渐控制荒漠化的方向发展。这主要是因为自2000年以来,中国政府实施的西部大开发战略已经开始促进经济和生态保护项目的快速发展,使得2001~2009年这些地区的沙漠面积急剧减少(Guan et al., 2017)。通过对以上国内相关研究的简单整理,本文发现文献中特定地区的研究结论与本研究一致。但这些研究集中在特定区域的时间或空间尺度上,较少综合考虑系统在时空上的动态变化特征,更缺乏在省或全国水平上大尺度的综合评价。

四、结论与讨论

本文基于压力—状态—响应模型构建了林业生态安全评价指标体系,综合测度了1999~2012年中国林业生态系统以及森林、湿地和荒漠三大子系统的生态安全指数和相对指数,对1999年和2012年两个典型年份的省域林业系统及三个子系统的生态安全时空格局与地域特征进行了分析,主要结论如下。

第一,研究期间中国森林生态安全指数逐年上涨,森林生态系统安全状况得到了较为明显的改善。从空间来看,东北林区、西南林区、南方林区三大林区的森林生态安全性明显高于其他地区,且安全性不断提高。中国大部分省份的森林生态安全指数呈上涨趋势,尤其是东部和中部地区森林生态安全状况整体改善较大,内部差异逐渐缩小,但西部部分地区森林生态安全状况出现恶化,需重点关注并采取措施防止森林生态系统退化。本文采用熵权法结合专家打分法确定各指标权重,指标权重值越大,表明其对评价结果的贡献率越大,反之越小。通过各指标权重分析发现,状态指标中,资源类指标和复杂性指标权重明显大于灾害性指标。在压力指标中,人类对森林施加压力的负面影响大于维护森林带来的正面影响,其中单位面积GDP指数、单位森林面积人口数量指数、森林采伐强度和森林旅游开发强度权重较大,是威胁森林生态安全的主要压力来源。

第二,中国湿地生态安全指数呈现缓慢下降趋势,湿地生态安全面临一定程度的恶化风险。从空间格局来看,湿地生态安全指数较高的省份集中分布于东北地区、中部地区以及西南地区,指数较低的省份主要位于华北地区、西北地区和东南沿海部分地区。总体上,中国省域湿地生态安全状况呈小幅度恶化趋势,但各省份湿地生态安全指数变化幅度不大,只有上海和河南有所下降。通过各指标权重分析发现,状态指标中,湿地面积占比、永久性湿地面积比重、丰水月数占比所占权重较大,是导致各省份各年之间湿地生态安全指数产生差异的直接原因。综合压力指标中的单位面积

GDP 指数所占权重最大，其次是人口密度指数和水资源消耗指数所占权重较大，这些因素是造成湿地生态安全恶化的主要原因。

第三，中国荒漠生态安全指数呈现较大幅度的波动，荒漠生态系统不稳定且有小程度恶化态势。从空间上看，中国省域荒漠生态安全状况呈现显著的南北差异，南部优于北部，尤其是秦岭—淮河线以南的长江中下游地区以及珠江流域地区更甚，宁夏、甘肃等西北省份则需采取措施防止荒漠生态系统退化。从变动看，秦岭—淮河线以北地区荒漠生态安全状况呈现改善态势，而以南地区则有退化趋势。通过各指标权重分析发现，与荒漠安全状况相关的资源量指标，例如，单位面积地表水资源量和单位面积地下水资源量是导致各省份各年之间荒漠生态安全指数产生差异的直接原因。在压力指标中，综合压力指标所占权重最大，人类占用资源的行为及强度指标所占权重次大，这两类指标是造成荒漠生态安全恶化的主要原因。

第四，中国林业生态安全指数由 1999 年的 0.5567 增加到 2012 年的 0.5813，林业生态系统呈现改善趋势。在空间上整体呈现“南高北低”的分异规律，长江以南地区和东北地区的林业生态安全整体水平较高。中国各省份林业生态系统安全水平呈改善态势，中部和南部省份的林业生态安全状况明显改善，区域差异逐渐缩小。由于本文研究视角是全国及各个省份，考虑到数据的可获性，并遵从指标的科学性、系统性、可比性、针对性、代表性、实用性等原则，依据人类对森林、湿地、荒漠生态系统产生的影响，合理分为不同方向，本文构建的是科学合理的可行版林业生态安全评价指标，虽然相比完整版具有更强的可操作性，但指标体系不够全面、完善。

第五，针对森林生态系统，政府应该高度重视植树造林，合理开发利用森林资源，并对森林实施保护措施，尤其是在森林火灾多发季节，要做好森林管护，避免发生自然原因所致的森林火灾。此外，要严格控制人口增长及生活污染物的排放，切实减轻系统压力，提高生态环境质量。最后，各省应该加大对森林的投资与保护力度，保证经济、生态协调发展，增强各地区森林生态安全度。针对湿地生态系统安全性，政府要注重保护各省（市）湿地面积，增加湿地保护的基本设施。同时，呼吁人们保护湿地，节约循环用水，并制定污水排放制度，加大湿地保护投资。重点控制人口增长，减轻系统压力，从而减少对水资源的巨大需求及水污染问题。针对荒漠生态系统，政府尤其应该重视荒漠边缘和经济欠发达地区的荒漠治理。同时，还要注重对相关资源，例如森林资源、水资源的保护。此外，要优化产业结构，加快提高生产技术水平，实现高效节约生产，降低对资源、环境的压力。制定适当的人口政策，减小荒漠生态系统的压力。在颁布政策时，要注意各项政策的搭配，及时跟踪政策实施情况，提高政策实施效率。

参考文献

陈军纪、王蕾、刘彬等（2015）：《极旱荒漠生态系统健康评价——以安西国家级自然保护区为例》，《干旱区资源与环境》第 12 期，第 98 ~ 103 页。

郭海、陈文汇(2013):《我国现代林业评价指标体系设计研究》,《安徽农业科学》第13期,第5791~5793页。

贾宝全、慈龙骏、高志海等(2001):《绿洲荒漠化及其评价指标体系的初步探讨》,《干旱区研究》第2期,第19~24页。

刘心竹、米锋、张爽等(2014):《基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价》,《生态学报》第11期,第3115~3127页。

鲁莎莎、郭丽婷、陈英红等(2017):《北京市森林生态安全情景模拟与优化调控研究》,《干旱区地理》第4期,第787~794页。

米锋、谭曾豪迪、顾艳红等(2015):《我国森林生态安全评价及其差异化分析》,《林业科学》第7期,第107~115页。

汤旭、冯彦、鲁莎莎等(2018):《基于生态区位系数的湖北省森林生态安全评价及重心演变分析》,《生态学报》第3期,第1~14页。

汪朝辉、吴楚材、成凤明(2009):《张家界国家森林公园生态安全管理模式探析》,《经济地理》第9期,第1580~1584页。

王玺婧、吴秀芹、张宇清等(2012):《我国荒漠生态系统生物多样性生态地理分区》,《中国水土保持科学》第5期,第1~8页。

魏彬、杨校生、吴明等(2010):《海岛林业生态安全评价》,《南京林业大学学报(自然科学版)》第4期,第161~164页。

吴波、苏志珠、杨晓晖等(2005):《荒漠化监测与评价指标体系框架》,《林业科学研究》第4期,第490~496页。

杨时民、李玉文、吕玉哲(2006):《扎龙湿地生态安全评价指标体系研究》,《林业科学》第5期,第127~132页。

殷贺、李正国、王仰麟(2011):《荒漠化评价研究进展》,《植物生态学报》第3期,第345~352页。

俞孔坚、李海龙、李迪华等(2009):《国土尺度生态安全格局》,《生态学报》第10期,第5163~5175页。

赵其国、高俊峰(2007):《中国湿地资源的生态功能及其分区》,《中国生态农业学报》第1期,第1~4页。

张频、张邦文、蔡海生等(2013):《江西省林业生态安全物元分析评价》,《江西农业大学学报》第4期,第791~797页。

张升、戴广翠(2010):《绿色经济与林业发展》,《林业经济》第5期,第20~25页。

张煜星(2017):《林业资源监测现状与技术》,《中国机构改革与管理》第3期,第40~42页。

张运、张贵(2012):《洞庭湖湿地生态系统服务功能效益分析》,《中国农学通报》第8期,第276~281页。

张智光(2013):《基于生态—产业共生关系的林业生态安全测度方法构想》,《生态学报》第4期,第1326~1336页。

张志涛(2011):《从系统论观点认识和思考现代林业》,《中南林业科技大学学报(社会科学版)》第4期,第78~80页。

朱卫红、苗承玉、郑小军等 (2014): 《基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究》, 《生态学报》第 6 期, 第 1379 ~ 1390 页。

邹长新、陈金林、李海东 (2012): 《基于模糊综合评价的若尔盖湿地生态安全评价》, 《南京林业大学学报 (自然科学版)》第 3 期, 第 53 ~ 58 页。

Guan, Q., W. Guan and J. Yang, et al. (2017), “Spatial and Temporal Changes in Desertification in the Southern Region of the Tengger Desert from 1973 to 2009”, *Theoretical and Applied Climatology*, 129 (1–2), pp. 487–502.

Ji, W. (2007), *Wetland and Water Resource Modeling and Assessment: A Watershed Perspective*, Hoboken: CRC Press of Taylor & Francis Group.

Karr, J. R. (1981), “Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities”, *Fisheries*, 6 (6), pp. 21–27.

Li, F., S. S. Lu and Y. Sun, et al. (2015), “Integrated Evaluation and Scenario Simulation for Forest Ecological Security of Beijing Based on System Dynamics Model”, *Sustainability*, 7 (10), pp. 13631–13659.

Li, Q., C. Zhang and Y. Shen, et al. (2016), “Developing Trend of Aeolian Desertification in China’s Tibet Autonomous Region from 1977 to 2010”, *Environmental Earth Sciences*, 75 (10), pp. 1–12.

Han, M. (2010), “Healthy Evaluation for Wetlands Based on Vague Mathematics: Taking the Wetlands on Laizhou Bay’s Coastal Plain of China as a Case”, *Procedia Environmental Sciences*, 2 (2), 1491–1500.

Maingi, J. K. and S. E. Marsh (2001), “Assessment of Environmental Impacts of River Basin Development on the Riverine Forests of Eastern Kenya Using Multi-Temporal Satellite Data”, *International Journal of Remote Sensing*, 22 (14), pp. 2701–2729.

Olsson, L. (1985), “An Integrated Study of Desertification: Applications of Remote-Sensing, GIS and Spatial Models in Semiarid Sudan”, *Lund Studies in Geography. Ser. C General and Mathematical Geography*, 13, pp. 159–170.

Zhang, J. and J. Gao (2016), “Lake Ecological Security Assessment Based on SSWSSC Framework from 2005 to 2013 in an Interior Lake Basin, China”, *Environmental Earth Sciences*, 75 (10), pp. 1–11.

Comprehensive Evaluation of Forestry Ecological Security in China: Based on Spatio-temporal Pattern Analysis

LU Sha-sha¹, YAO Yue¹, ZHANG Da-hong¹, MI Feng¹, GU Yan-hong², GAO Xian-jun³

(1. School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Campus Information Center, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Forestry ecological security refers to the guaranteed security and biodiversity richness of the three ecological systems including forest, wetland, and desert ecological systems. Based on the PSR (Pressure-State-Response) model, this paper constructs an evaluation index system of the forestry ecological security situation and measures the

ecological security index and relative index of forestry ecological security level as well as the forest, wetland and desert ecological systems in China from 1999 to 2012. Moreover, the paper analyzes the spatio-temporal evolution and regional differentiation characteristics of the ecological security index of the forestry ecosystem and its three subsystems with the application of GIS spatial analysis module. The results indicate that: i) The forest ecosystem security in China showed a trend of continuous improvement during the study period. The ecological security situation in the three major forest regions—including the northeast forest region, the southwest forest region, the southern forest region, were better than other parts of China. The forest ecological security in the eastern-and central parts improved significantly, while that in the western region experienced a trend of degradation. ii) The security situation of wetland ecosystem presented a significant deterioration. The middle and lower reaches of the Yangtze River and southwestern wetland performed a good ecological security level, while Shanghai and Henan province experienced a serious deterioration. iii) The security situation of the desert ecosystem presented a significant volatility and a small degree of deterioration; and a significant difference was found between the north and south China. The desert ecological security condition in the south of Qinling-Huaihe River Line was obviously better than that in the north region. However, the south of the line presented a degradation trend, and the north of the line presented an improved situation. iv) The forestry ecological security index increased from 0.5567 in 1999 to 0.5813 in 2012, showing an improvement trend. The pattern of the forestry ecological security displayed a high level in the south region of the Yangtze River and northeast China. Furthermore, the security situation in the central and southern provinces experienced a significant improvement. By contrast, Xinjiang, Ningxia and Tibet presented a deteriorating trend in relation to the forestry ecological security, and more attention should be paid to these provinces.

Key Words: forestry ecological security; forest ecological security; desert ecological security; wetland ecological security; comprehensive evaluation

特邀编辑: 单菁菁