

基于 PSR 模型的湖北省县域森林生态安全评价及时空演变^{*1}

冯彦 郑洁 祝凌云 辛姝玉 孙博 张大红*

(北京林业大学经济管理学院, 中国北京 100083)

【摘要】: 以湖北省 85 个区县为研究对象, 基于 PSR (Pressure-State-Response) 模型, 利用熵权法与 G1 法确定综合权重, 根据综合指数法计算湖北省森林生态安全指数, 并分析比较 1999—2014 年湖北省森林生态安全变化, 在 GIS 技术支持下对湖北省县域森林生态格局进行空间相关性分析。结果表明: 湖北省县域森林生态安全状况整体良好; 森林覆盖率、单位 GDP 能耗、人口密度等指标权重较大; 县域森林生态安全水平地区分布不平衡, 西部水平最高, 东部次之, 中部最低, 1999—2014 年湖北省森林生态安全指数变化较小; 县域森林生态安全指数呈现显著的空间自相关性和空间集聚性, 高一高聚类显著性更强, 大多集中于湖北省西部地区。

【关键词】: 生态文明; 国家生态安全; 森林生态安全; 评价体系; GIS; 空间自相关; 湖北

【中图分类号】: F316.299 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2017) 02-0171-08

DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2017.02.023

森林是陆地生态系统的主体, 是自然生态系统的顶层, 是人类生存发展的根基, 对维护生态平衡和国家生态安全发挥着不可替代的重要功能。随着社会经济的快速发展, 木材需求增大。森林经营管理粗放, 工业污染排向森林生态系统, 多种因素导致森林面积减少, 林分质量下降, 森林生态系统受到了一定程度的威胁, 产生了森林生态功能减弱, 以及温室效应、生物多样性减少等一系列的生态环境问题。

生态安全概念最早是由 Norman Myer 在《最后的安全》中提出, 认为生态环境的退化导致政治、经济的不安全^[1]。Kim 认为人类活动威胁到生态环境, 维持人类生存的必要条件是生态安全^[2]。评价生态安全一般是建立在指标体系的基础上, 运用模型和方法进行评价。

联合国可持续发展委员会提出状态—压力—响应 (Pressure-State-Response, PSR) 模型, 并在此基础上构建指标体系。左伟采用 3S 技术及层次分析法结合灰色关联度研究忠县的区域生态环境安全^[3]。赵宏波采用 TOPSIS 模型和空间相关性分析研究吉林省耕地生态安全时空变化^[4]。其他的方法还有景观聚类、模糊综合评价、层次分析法和物元模型^[5-8]。通过梳理国内外学者的研究可以看出, 目前对生态安全的研究还处于起步阶段, 对其评价, 基本停留在定性分析, 定量分析并没有统一的评价体

¹ 收稿时间: 2016 - 07 - 18; 修回时间: 2016 - 11 - 05

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

作者简介: 冯彦 (1989—), 女, 山东聊城人, 博士研究生。主要研究方向为林业经济理论与政策。E-mail: 951036687@qq.com。

***通讯作者:** 张大红 (1959—), 男, 重庆涪陵人, 教授, 博士生导师。主要研究方向为林业经济理论与政策。E-mail: zhangdahong591120@163.com。

系。学者对生态安全的研究领域较广阔，解雪峰基于 PSR 模型结合 RS、GIS 技术评价东阳江流域生态安全^[9]。吕建树研究济宁市土地利用变化及生态安全，发现该地区生态安全状况经历了先恶化后改善的变化趋势^[10]。类似的还有对海洋和草原生态安全的研究等^[11-12]。相较于流域生态安全、土地生态安全等领域，目前国内外学者对森林生态安全的研究较少。米峰运用熵权法对中国省域森林生态安全进行评价，并进行对比^[13]。张智光采用压力—状态—影响—响应结构模型和结构方程模型测度林业生态安全的共生耦合，分析林业生态安全问题的原因^[14]。而这两位学者并未将研究区域缩小至区县，并进行时空演变分析。基于森林及其它领域生态安全的最新研究成果，本文尝试引入熵权 G1 法，并结合 GIS 技术，以湖北省为研究区域，对 1999—2014 年湖北省 85 个区县县域森林生态安全指数的时空演化进行探讨，旨在量化客观评价县域森林生态安全状况及县域森林生态发展的时空演化。

1 指标体系的建立

在以 PSR 模型为基础的湖北省森林生态安全指数（森林 ESI）评价指标体系中：压力类指标是指人类活动产生对森林生态系统的有害干扰；状态类指标用来反映整个森林生态系统的资源状况以及所遭受的自然灾害；响应类指标是反映人类活动对森林生态系统的有益干扰。不同的区域有不同的地理气候条件也即不同的区位条件，对森林生态系统有不同的影响，区位系数主要由光、热、水和地理特征类指标计算求得，使用区位系数对森林生态安全指数进行修正。状态—影响—压力三个方面互相联系构建出森林生态安全评价指标体系框架，并选取了具体的指标，形成了三级指标体系。

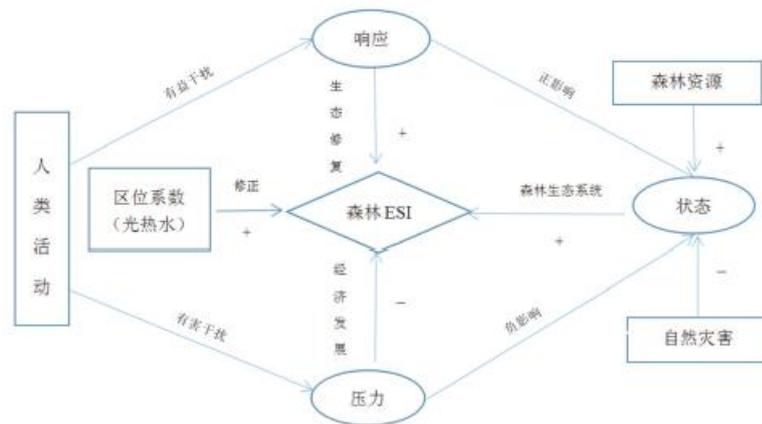


图1 森林生态安全机制图

Fig.1 Forest ecological security mechanism

根据 PSR 模型，选取具体评价指标的步骤和方法如下：通过文献综述，充分借鉴国内外相关研究的有关成果。在此基础上，创新性地提出森林生态安全指数，建立了森林生态系统 PSR 指标体系，参考肖佳媚、马倩、张永利等选取森林覆盖率、人口密度等 30 余指标^[15-17]，通过专家咨询、访谈，根据业内有关森林和生态专家的咨询意见，对选择的指标进行了剔除和调整。然后将湖北省 85 个县域林业局填报的指标数据进行分析。2016 年 4 月，对湖北省利川市、神农架林区进行了实地调查，走访林业局，发现第三产业涉林产值、水土流失面积等指标存在年份连续性差、县域之间数据差距较大或统计口径不一致等问题，剔除数据信息重叠（相关性强）、指标数据可获得度较低的指标，筛选出信息量大的指标，通过电话咨询、查询统计年鉴进行数据填补，最终形成森林生态安全具体指标。

对于森林系统状态类指标，应分别从资源类、自然灾害类 2 个一级指标充分全面地反映森林生态系统的状态。资源类指标是从森林生态系统资本的物质资源状况反映森林生态安全状况，主要从森林资源数量、资源质量以及资源变化情况三个方面来

考察森林资源状况，分别选取森林覆盖率、森林单位面积蓄积量、森林物种丰度指数、林分结构等指标。自然灾害类指标旨在反映森林生态系统自身受到外界有害干扰的严重程度，选取森林火灾受灾率和森林病虫害发生率两项指标。森林生态安全压力指标包括对森林生态起作用的间接压力和直接压力。间接压力指标从单位 GDP 能耗、人口密度、城镇化率三个方面考虑。直接压力从 SO₂ 排放强度、工业废水排放强度、人类工程占用土地强度三方面考虑。森林生态安全响应指标从新增造林比例、森林生态建设与保护投资强度、单位 GDP 工业污染治理投资额、污水处理率四方面考虑。

表1 森林生态安全指标体系
Tab.1 Forest ecological security index system

目标层	准则层	指标层	具体指标	公式
县域森林生态安全综合评价	系统状态	资源状况指标	森林覆盖率(+)	森林面积/土地总面积·100%
			森林单位面积蓄积量(+)	森林蓄积量/森林面积
			森林物种丰度指数(+)	(A·乔木林面积+B·灌木林面积+C·疏林地面积和其他林地面积)/土地总面积,其中A、B、C表示不同林地类型的权重 其他林地面积包括:四旁树木覆盖面积和农田林网树占地面积
		自然灾害指标	林分结构(+)	天然林面积/森林面积
			森林火灾受灾率(-)	森林火灾受害面积/森林面积·100%
			森林病虫害发生率(-)	森林病虫害发生面积/森林面积×100%
	系统压力	直接压力	SO ₂ 排放强度(-)	工业 SO ₂ 排放量/土地总面积
			工业废水排放强度(-)	工业废水排放量/土地总面积
		间接压力	人类工程占用土地强度(-)	建设用地面积/土地总面积
			单位 GDP 能耗(-)	GDP/土地总面积
	系统响应	生态修复	人口密度(-)	县年末人口数/土地总面积
			城镇化率(-)	城镇人口数/县年末人口数×100%
			新增造林比例(+)	造林面积/森林面积·100%
			森林生态建设与保护投资强度(+)	森林生态建设与保护投资/森林面积,其中,森林生态建设与保护投资包括:造林完成投资额、森林更新完成投资额、森林抚育完成投资额和野生动植物保护及自然保护区完成投资额
			单位 GDP 工业污染治理投资额(+)	工业污染治理完成投资/GDP
			污水处理率(+)	污水处理量/污水排放总量·100%

2 研究方法

2.1 熵权法

熵权法是一种在综合考虑各指标数据提供信息量的基础上计算一个综合指标权重的数学方法。熵权法是一种客观定权法，其根据各指标传达的信息量大小来计算权重，克服了以往凭专家或者学者的经验确定指标权重的弊端^[18]。

熵权法计算权重的步骤如下：

①假设被研究样本有 m 个，每个样本的评价指标有 n 个，则构建判断矩阵：

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

②将判断矩阵指标数据进行标准化处理：

正向指标的计算公式：
$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$
，其中 x_{\max} 、 x_{\min} 分别为第 i 个样本的第 j 个指标下的最大值和最小值。

负向指标的计算公式：
$$y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}}$$
，其中 x_{\max} 、 x_{\min} 分别为第 i 个样本的第 j 个指标下的最大值和最小值。

③计算第 j 个指标的信息熵：

$$H_j = -\frac{\sum_{i=1}^n Y_{ij} \ln Y_{ij}}{\ln n}, \quad \text{其中 } Y_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n)。$$

④计算指标 j 的权重：

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)}$$

⑤计算森林生态安全指数：

$$Z = \sum_{j=1}^n w_j y_{ij}, \quad \text{其中 } n \text{ 为评价指标的个数, } w_j \text{ 为第 } j \text{ 个指标的权重, } y_{ij} (j=1, 2, \dots, n) \text{, 为标准化指标数据。}$$

本文采用综合评价法计算森林生态安全指数，在指标体系建立的基础上，采用熵权法及 G1 法组合确定权重，根据森林生态安全评价模型，利用综合指数的测算公式，定量地对森林生态安全进行综合评价。

2.2 G1 法

G1 法确定权重的特点是通过专家主观排序体现指标的重要性，重要的指标赋予较大的权重，体现评价指标之间的相对重要程度，且不必进行一致性检验。

2.3 探索性空间数据分析

探索性空间数据分析是一种具有识别功能的空间数据分析方法，主要用于探测一些变量的空间关联性和集聚现象。某一变量在空间上发生集聚，意味着在一定的区域内，这一变量在各个地域单元之间具有自相关性；某一地域单元，该变量较高，其周围地域单元该变量也较高；某一地域单元，该变量较低，其周围地域单元该变量也较低。

2.3.1 全局自相关

全局自相关用来分析整个区域关联性，反映同一变量在研究区域内的自相关性，一般采用全局莫兰指数计算。全局莫兰指数 (Moran's I) 可以指出区域属性值的分布是否是聚集、离散或者随机分布模式，它能够反映整个研究区域内，各个地域单元与邻近地域单元之间的相关性。莫兰指数的值域为 $[-1, 1]$ ，取值为 -1 表示完全负相关，取值为 1 表明完全正相关，而取值为 0 表示不相关。

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

式中： n 是研究区域内地域单元总数； w_{ij} 是空间权重矩阵的元素值； x_i 是地域单元 i 的 x 变量值； y_i 是地域单元 i 的 y 变量值。

2.3.2 局部自相关

局部自相关用来研究空间地域单元局部的相关性质。Anselin 在 1995 年提出局域莫兰指数 (LI-SA) 检验局部地区是否存在变量集聚现象。局部莫兰指数高值表明有相似变量值的面积单元在空间集聚 (高值或低值)，低值表明不相似变量值的面积单元在空间集聚。地域单元 i 的局部莫兰指数用来度量它和周围地域单元之间的相关性，定义为：

$$I_i = \frac{n^2}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \times \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_j (x_j - \bar{x})^2}$$

正的 I_i 表示一个高值被高值所包围 (高一高)，或者是一个低值被低值所围 (低—低)。负的 I_i 表示一个低值被高值所包围 (低—高)，或者一个高值被低值所包围 (高一低)。

3 实证研究

3.1 湖北省县域森林生态安全综合评价湖北省位于中国中部，具有较为丰富的森林生态环境资源，拥有中纬度地区唯一保持完好的亚热带森林生态系统神农架，森林生态地位非常重要，是十八大召开后第一个生态省建设试点。2014 年，湖北省森林覆盖率为 39.61%，比 2009 年提高 1.21 个百分点，森林面积为 736 万 hm^2 ，森林蓄积 36 508 万 m^3 ，天然林面积 486 万 hm^2 。

3.1.1 县域森林生态安全综合评价指标权重分析

本文求取指标权重的方法主要是将熵权法与 G1 法组合。二者结合既克服了专家打分的主观性，又改进了熵权法确定权重的客观性。

依据熵权法计算的权重中，森林覆盖率、林分结构、单位 GDP 能耗、人口密度、 SO_2 排放量等指标权重较大，说明不同县域之间该类指标数据差距较大。根据专家意见，计算的权重中，森林覆盖率、森林单位面积蓄积量、单位 GDP 能耗、人口密度等

指标权重较大，表明专家认为此类指标对森林生态安全十分重要。综合权重中，森林覆盖率、单位 GDP 能耗、人口密度等指标权重较大 (>0.08)，森林火灾受害率、森林病虫害发生率、工业废水排放达强度和新增造林比例等指标权重较小 (<0.05)。因此，提高湖北省森林生态安全的重要因素是降低人类活动对森林生态系统的有害干扰，以及增加各县域森林面积，提高森林质量。

表2 森林生态安全指标体系权重
Tab.2 Forest ecological security index system weight

指标	熵权法权重	G1 法权重	综合权重
森林覆盖率	0.0709	0.0989	0.0849
森林单位面积蓄积量	0.0574	0.0983	0.0778
森林物种丰度指数	0.0683	0.0658	0.0671
森林火灾受害率	0.0549	0.0407	0.0478
森林病虫害发生率	0.0549	0.0368	0.0458
林分结构	0.0735	0.0553	0.0644
单位 GDP 能耗	0.0749	0.0977	0.0863
人口密度	0.0748	0.0984	0.0866
城镇化率	0.0649	0.0602	0.0625
人类工程占用土地强度	0.0649	0.0624	0.0636
SO ₂ 排放强度	0.0773	0.0499	0.0636
工业废水排放达强度	0.0523	0.0329	0.0426
新增造林比例	0.0601	0.0234	0.0417
森林生态建设与保护投资强度	0.0564	0.0805	0.0684
单位 GDP 工业污染治理投资额	0.0550	0.0788	0.0669
污水处理率	0.0526	0.0200	0.0363

3.1.2 县域森林生态安全综合评价结果分析

按照上述权重结合标准化数据，应用综合评价法对湖北省 85 个县、区 1999—2014 年森林生态安全进行评价，计算森林生态安全指数。按照森林生态安全指数高低及生态系统演变特征，参考蒋卫国、南颖的研究成果^[19-20]，通过 GIS 技术分析模块，参照评价等级，将森林生态安全指数评价结果分为优秀 (0.8~1.0)、良好 (0.6~0.8)、一般 (0.4~0.6)、较差 (0.2~0.4) 和差 (0~0.2) 五个等级，并制成空间分布图 (图 2)。

从森林生态安全整体状况来看，2014 年，优秀县域数量占 14.12%，良好县域数量占 78.82%，一般县域数量占 7.06%，湖北省整体上处于良好状态，能够较好地发挥森林生态系统的服务功能，森林生态系统处于可持续状态。1999—2014 年，湖北省县域森林生态安全等级变化如图 2。

表3 森林生态安全等级
Tab.3 Forest ecological security level

等级	森林生态安全状况	特征
0.0~0.2	差	森林生态功能极弱,已经不能维持森林生态系统发展,生态系统即将处于崩溃边缘
0.2~0.4	较差	森林生态功能开始退化,森林生态系统已经处于不稳定状态
0.4~0.6	一般	森林生态系统尚稳定,可以发挥基本的森林生态功能
0.6~0.8	良好	森林生态系统处于较稳定状态
0.8~1.0	优秀	森林生态系统处于稳定状态

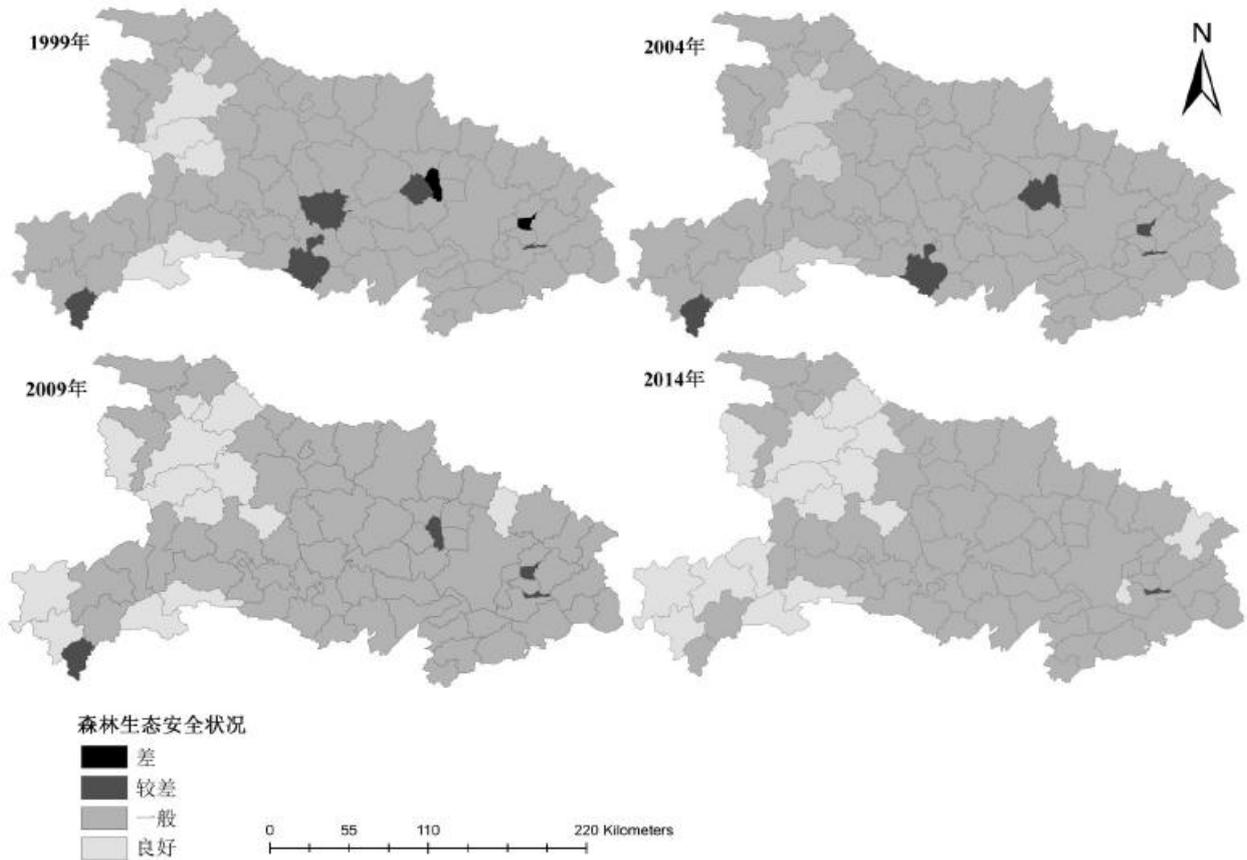


图2 湖北省县域森林生态安全等级分布图
Fig.2 Forest ecological security level distribution of the county in Hubei

1999—2014年,湖北省森林生态安全状况有一定程度的改善,大多数县域生态安全状况处于“一般”等级,不存在“优秀”等级。1999年存在森林生态安全“差”的县域,而在2004—2014年,该县由状况“差”转变成“较差”,最后发展成“一般”。1999年至2009年,“较差”的县区个数逐渐减少,直到2014年,个数为0。1999—2004年,部分县域森林生态安全状况等级

由“良好”降至“一般”，2009—2014年，该类地区生态状况有所转好。

湖北“两圈一带”是指：武汉城市圈、鄂西生态文化旅游圈和长江经济带，由于区位条件、自然地理条件和森林资源的县域差异，县域间的森林生态状况分布发展不均衡。武汉城市圈是指以中部地区最大城市武汉为圆心，覆盖黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、天门、潜江周边8个大中型城市的城市群，黄石为城市圈副中心城市。鄂西生态文化旅游圈包括位于湖北西部的襄阳、荆州、宜昌、十堰、荆门、随州、恩施、神农架等8个市州（林区），是全国重要的生态功能区。

在武汉城市圈中，全部县域的森林生态安全指数等级处在0.4以上，表明这些县域的森林生态系统尚稳定，可以发挥基本的森林生态功能，其中良好县域占到83.78%，武汉城市圈中孝感云梦县和黄冈黄州区以及城市圈副中心城市中的黄石港区、石灰窑区、铁山区和下陆区为一般状态，总体而言，武汉城市圈的森林生态安全状态较好。同时武汉市的森林生态安全状态为良好，黄石市仅大冶县和阳新县的森林生态安全状态为良好，因此湖北省圆心城市圈武汉市的森林生态安全状况要优于城市圈副中心城市黄石市。

在鄂西生态文化旅游圈中，全部县域的森林生态安全指数等级处在0.6以上，表明这些县域的森林生态安全状况较好，其中优秀县域占到1/4，尤其是神农架林区的森林生态安全指数为湖北省最高，其森林覆盖率已经达到90%以上。相比武汉城市圈来说，鄂西生态文化旅游圈的森林生态安全较好，这一结论正好和湖北省关于“两圈一带”的战略布局契合，表明本指标体系的评价结果是比较符合实际的。

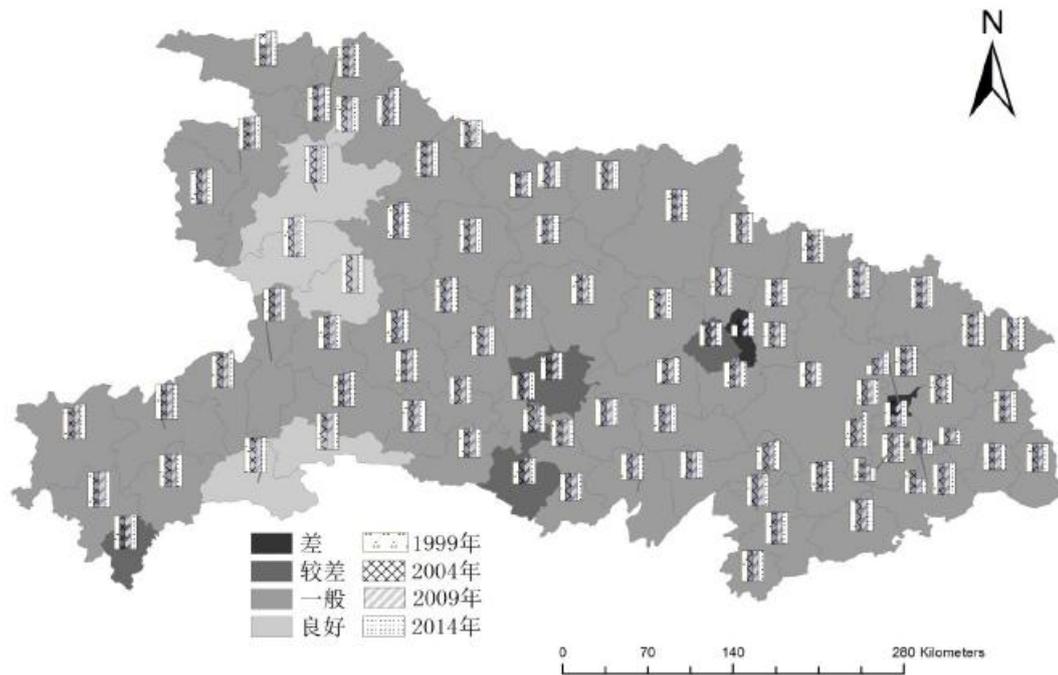


图3 湖北省森林生态安全评价结果分布

Fig.3 Hubei forest ecological security evaluation result

表4 湖北省森林生态安全指数的全局自相关检验结果
 Tab.4 Forest ecological security index of global autocorrelation test results in Hubei

年份	Moran's I	期望值	平均值	标准误	T值	P值
1999	0.519	-0.012	-0.011	0.071	7.425	0.001
2000	0.536	-0.012	-0.009	0.074	6.406	0.001
2001	0.544	-0.012	-0.012	0.074	7.543	0.001
2002	0.543	-0.012	-0.011	0.073	7.564	0.001
2003	0.555	-0.012	-0.016	0.069	8.263	0.001
2004	0.563	-0.012	-0.011	0.073	7.806	0.001
2005	0.571	-0.012	-0.012	0.072	8.086	0.001
2006	0.572	-0.012	-0.013	0.074	7.872	0.001
2007	0.569	-0.012	-0.009	0.073	7.932	0.001
2008	0.568	-0.012	-0.012	0.073	7.998	0.001
2009	0.624	-0.012	-0.017	0.073	8.762	0.001
2010	0.619	-0.012	-0.014	0.070	9.020	0.001
2011	0.616	-0.012	-0.011	0.074	8.477	0.001
2012	0.611	-0.012	-0.014	0.069	9.038	0.001
2013	0.611	-0.012	-0.010	0.068	9.117	0.001
2014	0.613	-0.012	-0.015	0.070	8.942	0.001

注:随机性检验使用999permutation。

图3显示了湖北省1999—2014年森林生态安全评价结果的空间分布和时间变化特征。由图3可知,从空间分布角度来看,湖北省森林生态安全指数的分布不均衡,鄂西森林生态安全状况较好,其中神农架林区最好。十堰市、恩施市和宜昌市的森林生态安全状态较好,其次为湖北省东部,黄冈、黄石和咸宁地区,中部较低。2008年湖北省开始建设“鄂西生态文化旅游圈”,其拥有的世界文化遗产、世界非物质文化遗产、国家自然保护区、国家非物质文化遗产、国家级风景名胜区及国家地质公园成为了重点保护对象,其在旅游圈开发过程中的大量投资不仅保护了三峡工程和南水北调中线工程水源地,还产生了巨大的生态价值和旅游效益,真正地实现了又好又快发展,因此湖北省的生态实践验证了森林生态安全状态的提升能够实现生态效益、社会效益和经济效益的共赢。

从时间变化趋势来看,1999年湖北省森林生态安全指数为0.49,2014年上升了4.08%,这一结果表明:第一,湖北省整体森林生态安全状态较好,同时呈现利好的变化趋势。第二,16年间湖北省森林生态安全指数增幅不大。从县域分布来看,呈现上升趋势的县域占78.82%,表明大多数县域的森林生态安全质量得以改善,其中增幅最为明显的县域为武汉城市圈的黄冈黄州区(56.73%),孝感的云梦县(47.48%)和鄂西生态文化旅游圈的十堰丹江口市(26.58%)。大部分(74.12%)的县域增幅均保持在20%以内。12.94%的县域森林生态安全指数呈现下降趋势,其中城市圈副中心城市黄石市的黄石港区、石灰窑区、铁山区和下陆区降幅较为明显,出现降幅的原因是,该类地区经济发展较快,经济增长排放的废水、SO₂等增加了森林生态系统的压力。荆门东宝区、宜昌当阳市等7个县域的森林生态安全状况基本保持不变。总体来看,湖北省森林生态安全系统更加稳定和健康,但少数县域森林生态安全指数呈现下降趋势。

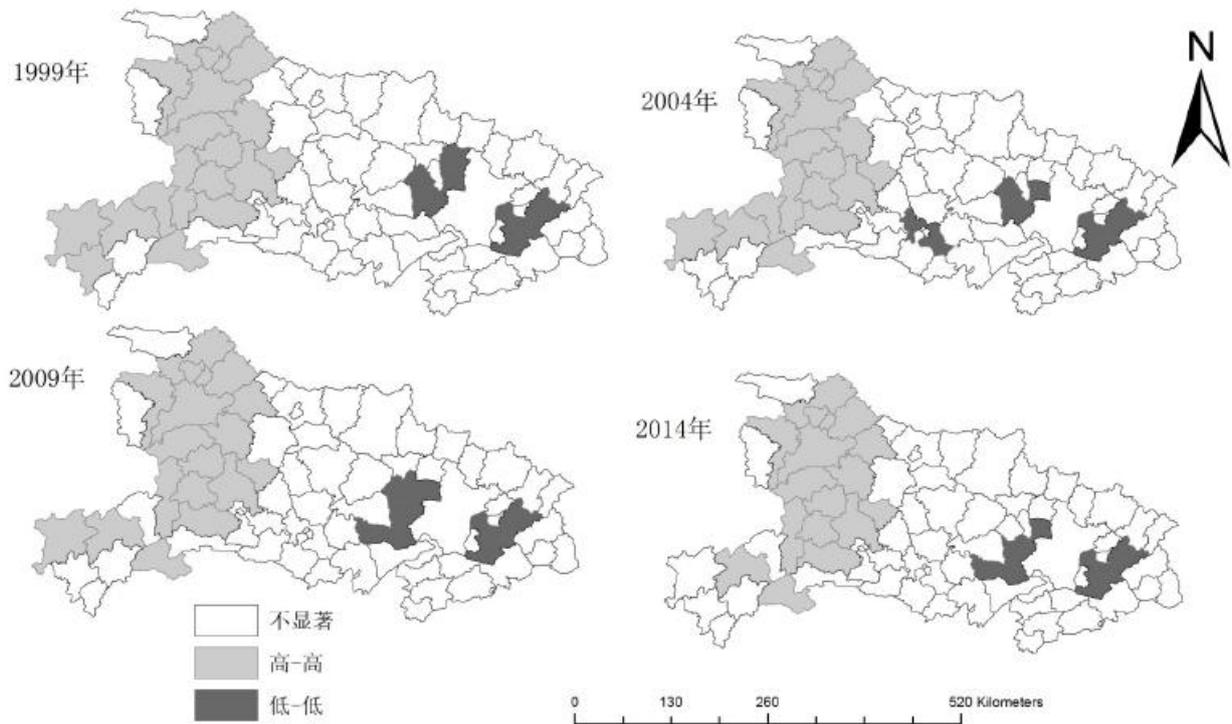


图4 1999、2004、2009和2014年LISA 聚集
Fig.4 LISA cluster map

表5 2014年湖北县域森林生态安全指数LISA 聚类结果
Tab.5 LISA clustering results of forest ecological security index of Hubei counties

类型	单元数(个)(显著个数)	县域	所占比例(%)
H-H	36(18)	丹江口、神农架、兴山、房县、茅箭、保康、张湾、竹山、郧县、巴东、来凤、崇阳、利川、秭归、恩施、建始、长阳、郧西、远安、鹤峰、竹溪、咸丰、五峰、罗田、南漳、宜昌市、英山、宜都、通山、通城、麻城、红安、广水、咸安、当阳、谷城	50
L-H	7(0)	钟祥、宜城、枝江、老河口、武穴、襄阳、松滋	8.24
L-L	32(11)	团风、嘉鱼、钟祥、枣阳、沙洋、黄梅、安陆、公安、洪湖、天门、武汉、襄樊、应城、孝南、华容、汉川、大冶、浠水、石首、梁子湖、荆州、沙市、江陵、监利、黄州、云梦、石灰窑、铁山、黄石港、下陆区、潜江、仙桃	37.65
H-L	6(0)	大悟、蕲春、京山、阳新、赤壁、曾都	7.06

3.2 湖北省县域森林生态安全的时空演变分析

3.2.1 全局自相关

采用 GeoDA 软件求取 1999—2014 年湖北省森林生态安全指数的 Moran' s I 值，并且通过 $P \leq 0.01$ 的检验，表明在 99.9% 置信度下的空间相关性是显著的。但不同阶段呈现出不同的特征：1999—2005 年空间相关性呈现增长趋势，2006—2009 年空间相关性波动中有较小幅度的上升，2010—2014 年空间相关性基本持平。总体上，Moran' s I 不断增长，说明县域间的集聚状况有所上升。

1999、2004、2009 和 2014 年全球 Moran' s I 散点主要分布于在第一、三象限内，且位于第一象限的高—高集聚类型的县域明显多于第三象限高—高聚类的县域数量，说明湖北省县域存在明显的森林生态安全较好和较差的县域，且森林生态状况较

好县域的聚集数量明显多于较差的县域，县域森林生态安全往往受周边地区森林生态状况的影响，而位于第三象限的县域存在陷入森林生态状况较差恒差的恶性循环的危险。

3.2.2 局部自相关

利用 GeoDA 软件绘制出 1999、2004、2009 和 2014 年湖北县域森林生态安全指数 LISA 聚类图，且通过 $P \leq 0.05$ 的显著性检验。分析 LISA 聚类图可发现：①从数量上看，在 99.5%置信度水平下存在空间显著聚类的县域，1999 年有 32 个，其中 H-H 显著聚类县域的有 20 个，L-L 显著聚类县域的有 12 个，2004 年有 31 个，其中 H-H 显著集聚县域有 19 个，L-L 显著聚类有 12 个，而 2014 年有 29 个，其中 H-H 显著集聚县域有 18 个，L-L 显著聚类有 11 个。②从空间分布上看，1999、2004、2009 和 2014 年的高一高聚类主要分布在鄂西地区，该类地区的特点是森林覆盖率较高，为湖北省重点生态旅游地区；低—低显著集聚区有些分散，不同年份显著集聚区略有不同，主要集中在浠水县、黄州区、梁子湖区，而不显著集聚县域分布在湖北省中部和西部地区。

4 结论及建议

基于压力—状态—响应（PSR）模型，构建了 5 个指标层、15 个具体指标的湖北省森林生态安全评价指标体系；选取熵权法和层次分析法对各指标赋予权重；运用综合评价法计算森林生态安全指数。得出的结论如下：

第一，森林覆林盖率、单位 GDP 能耗、人口密度等指标权重最大，因此，提高湖北省森林生态安全状况的重要途径是减少人类活动对生态环境的有害干扰，还应继续进行营造、管护森林活动，以利于森林资源数量和质量的提高。

第二，1999—2014 年湖北省森林生态安全水平总体上呈现良好的状况，并且变化幅度较小，基本处于平稳趋势。大部分（74.12%）的县域增幅均保持在 20%以内。12.94%的县域森林生态安全指数呈现下降趋势。

第三，湖北省森林生态安全指数的分布不均衡，鄂西森林生态安全状况较好，其中神农架林区最好。十堰市、恩施市和宜昌市的森林生态安全状态较好，其次为湖北省东部，黄冈、黄石和咸宁地区，中部较低。

第四，湖北省森林生态安全指数具有较大的空间正相关和空间集聚性，县域间的集聚状况呈上升趋势。高一高聚类主要分布在湖北省重点生态旅游区即鄂西地区；低—低显著集聚区较高—高聚类有些分散，不同年份显著集聚区有所不同，主要集中在浠水县、黄州区、梁子湖区。

通过研究发现，湖北省森林资源较丰富，但其生态安全受到人类活动压力的威胁较大，尤其以武汉、黄石为中心的城市圈，森林生态安全指数呈现低—低集聚，森林生态安全状况差的县域相互影响，因而该类地区应促进经济和生态的协调发展，大力倡导集约型、友好型经济，加大对森林的投资与保护力度，增强该地区整体的森林生态安全。鄂西生态旅游圈的森林生态状况较好，该类地区可以适当发展生态旅游等第三产业，帮助人们减缓贫困。

参考文献：

- [1] Norman Myers. Environment and Security [J]. Foreign Policy, 1993, 74: 23 - 42.
- [2] Kim Losev. Ecological Problems of Russia and Border Territories [M]. 2000.
- [3] 左伟. 基于 RS、GIS 和 Model 的区域生态环境系统安全综合评

-
- 价研究——以长江三峡库区重庆市忠县为例 [D]. 南京: 南京师范大学, 2002.
- [4] 赵宏波, 马延吉. 东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子——以吉林省为例 [J]. 应用生态学报, 2014(2): 515 - 524.
- [5] 胡淑恒. 巢湖流域的生态安全预警研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [6] 余敦, 陈文波. 基于物元模型的鄱阳湖生态经济区土地生态安全评价 [J]. 应用生态学报, 2011(10): 2 681 - 2 685.
- [7] 戴文渊, 张芮, 成自勇, 等. 基于模糊综合评价的兰州市水生态安全指标体系研究 [J]. 干旱区研究, 2015(4): 804 - 809.
- [8] 孟优, 周益民, 侯秀玲, 等. 干旱区绿洲生态安全评价研究——以新疆生产建设兵团为例 [J]. 干旱区地理, 2014(1): 163 - 169.
- [9] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 等. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价 [J]. 资源科学, 2014(8): 1 702 - 1 711.
- [10] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 等. 基于 RS 和 GIS 的济宁市土地利用变化及生态安全研究 [J]. 地理科学, 2012(8): 928 - 935.
- [11] 杨振蛟, 姜自福, 罗玲云. 海洋生态安全研究综述 [J]. 海洋环境科学, 2011, 30(2): 287 - 291.
- [12] 刘良明, 魏然, 周正. 利用动态阈值的森林草原火灾火点检测算法 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(12): 1434 - 1437.
- [13] 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(7): 107 - 115.
- [14] 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(8): 90 - 99.
- [15] 肖佳媚, 杨圣云. PSR 模型在海岛生态系统评价中的应用 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2007(S1): 191 - 196.
- [16] 马倩, 张洋, 赵枫. 基于 PSR 模型的干旱区绿洲城市生态安全评价——以乌鲁木齐市为例 [J]. 土壤通报, 2011(5): 1225 - 1230.
- [17] 张永利, 吴宜进, 王小林, 等. 内蒙古贫困地区生态安全评价及空间格局分析 [J]. 地球信息科学学报, 2016(3): 325 - 333.
- [18] 贾艳红, 赵军, 南忠仁, 等. 基于熵权法的草原生态安全评价——以甘肃牧区为例 [J]. 生态学杂志, 2006(8): 1 003 - 1 008.
- [19] 蒋卫国, 李京, 李加洪, 等. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价 [J]. 生态学报, 2005, 25(3): 408 - 414.
- [20] 南颖, 吉喆, 冯恒栋, 等. 基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价 [J]. 生态学报, 2013, 33(15):

4790 -4798.