

基于 GWR 模型的长江三角洲森林 生态安全驱动因素研究

冯彦¹ 汤旭² 包庆丰³¹

(1. 中国社会科学院 生态文明研究所, 北京 100710;

2. 中南林业科技大学 经济学院, 湖南 长沙 410000;

3. 内蒙古农业大学 经济管理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

【摘要】: 论文基于改进的 PSR (Pressure-State-Response) 理论, 以长江三角洲 307 个区县为研究对象, 建立森林生态安全评估指标体系; 采用熵权法、ArcGIS 软件评估森林生态安全、分析空间分布特征; 利用地理加权回归模型研究森林生态安全的影响因素。结论如下: (1) 长江三角洲森林生态安全指数均值为 0.43, 属于一般水平, 整体呈非均衡分布。(2) 区域城镇化水平、生态区位系数与森林生态安全指数显著负相关, 工业结构与森林生态安全指数相关性较弱。基于结论提出建议: (1) 城镇化水平较低的地区, 加快农村人口向城市集聚。而城镇化水平较高的地区, 应加强森林生态安全红线控制。(2) 用生态文明理念引领产业结构实现绿色转型, 推进循环经济。(3) 充分利用地方自然禀赋, 将生态区位比较优势转化为生态区位竞争优势。

【关键词】: 长江三角洲 森林生态安全 生态区位系数 地理加权回归模型

【中图分类号】: F205; X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)06-200-08

森林是陆地上最重要和生物总量最丰富的生态系统, 对陆地生态环境有决定性的影响, 对维护陆地生态平衡有着非常积极的作用。随着经济社会的快速发展和工业化、城镇化进程的不断加快, 粗放的经济增长方式导致森林生态系统遭受一系列破坏性干扰, 其生态安全受到严重威胁^[1,2], 导致水土流失加速、土地荒漠化^[3]、物种多样性减少^[4]和温室效应加大, 在一定程度上破坏了森林生态系统的平衡性, 最终威胁到人类、动物和植物的生存。经济的发展不能以牺牲森林生态系统为代价, 保护森林生态系统是为了经济的可持续发展。基于这种背景, 维持森林生态系统的可持续性尤为重要。长江三角洲经济领先全国, 2019 年, 其经济总量占国内生产总值的 24.08%, 是我国第一大经济区, 是世界公认的六大城市群之一, 城镇化水平平均达到 68.19%。全区工业增加值 81791.38 亿元, 占全国的 25.86%。然而, 随着经济的快速发展, 城镇化和工业化进程的加快, 以及高强度的人类活动, 长江三角洲森林生态空间被大量占用, 区域森林生态不断恶化, 导致大气污染加剧、酸雨频繁、生物资源衰退等问题的产生。因而, 本文以长江三角洲区县为研究区域。

作者简介: 冯彦, 博士, 中国社会科学院生态文明研究所博士后, 研究方向为林业经济理论与政策。E-mail:951036687@qq.com;包庆丰, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为林业经济理论与政策。E-mail:bqf1183@163.com
基金项目: 国家社会科学基金项目“欠发达沿海城市发展的制约因素与突破路径研究”(20BJY067)

森林生态安全是近年来生态学界提出的一个全新概念，用于表征森林生态系统的功能与作用^[5]，这一课题越来越受到国内外学术界的关注。Costanza^[6]认为森林生态安全应该主要关注森林生态系统本身的结构和功能，实现自身的健康、完整和可持续性。而人类的干扰和维护行为应该也要反映到森林生态安全中^[7]。国内外研究多数倾向从国家、省级尺度来关注森林生态安全，如Zhang等^[8]采用系统动力学方法建立了综合动态仿真模型，对1999—2014年中国森林生态安全进行了评价；徐会勇等^[9]基于生态文明建设视角对我国省域森林生态安全进行评价；刘心竹等^[10]通过建立森林生态安全综合干扰指数，对全国森林生态系统进行评估，发现天津市、山东省处于极不安全状态，而海南省和西藏自治区处于极安全状态；Moraes等^[11]建立了一套风险评价系统来考察亚马孙森林的生态安全；尽管李岩等^[12]从县域尺度对江苏省森林生态安全进行评价，并进行时空演变分析，但是在当前中国区域一体化发展的背景下，仅从单一省份研究出发，缺少了区域全局考虑。目前针对森林生态安全的影响因素的研究较少，多集中于经济方面。段伟等^[13]采用农户调研数据，研究劳动力转移与森林生态保护的关系，发现农村劳动力转移能够减缓对森林生态系统的压力，提升森林生态安全水平。而Lu等^[14]采用空间计量模型，研究森林生态安全的驱动因素，发现城镇化水平与森林生态安全显著负相关。城镇化与森林生态安全可能并非单一的线性关系。林业第一产业不仅可以促进林业发展，还有利于提高森林生态安全水平^[15]。第二产业发展带来环境污染、土地占用和资源消耗，对森林生态安全产生负向作用^[16]。除此之外，生态区位条件也会影响森林生态安全。Hu等^[17]利用1991—2005年森林健康和监测片区数据，发现通过气候改变森林的组成进而影响森林生态系统。Zirlewagen等^[18]基于多元线性回归分析与地质统计学证实森林生态系统也会受到地形的影响。从研究方法来看，PSR框架多用于构建森林生态安全评价指标体系，将指标分类为压力指标、状态指标和响应指标，这种分类有助于确定它们之间的互动关系^[19]。地理信息系统(GIS)也广泛应用于森林生态安全时空演变分析^[20,21]。森林生态安全影响因素分析多采用AMOS^[15]、OLS、SEM^[14]等方法。但是，有些因素对森林生态安全的影响并非单一的线性关系，存在空间差异性，地理加权回归模型可以克服这一缺陷。

尽管对森林生态安全的认识取得了进步，但现有文献仍存在一些局限性。以往的研究更多停留在全国或省域尺度，集中在森林生态安全评估与时空演变分析层面，缺少一体化地区县域尺度森林生态安全驱动因素的研究。而且，生态正外部性特征促使相邻区域的生态相互影响，存在空间依赖性，在研究森林生态安全的影响因素时，应考虑各区域的空间效应和空间差异性。

本文对传统的 Pressure-State-Response (PSR) 进行改进，以森林数量和质量反映森林状态层，以人类行为指标反映森林压力层，构建森林生态安全评价指标体系，以长江三角洲区县作为研究对象，评估森林生态安全状况。在探索森林生态安全影响因素时，经济社会因素和自然禀赋因素都会影响森林生态安全状况，同时还应考虑长江三角洲各地区影响因素的空间效应和空间差异。基于此，本研究选取城镇化、工业结构和生态区位三个变量，采用地理加权回归方法研究森林生态安全影响因素的空间差异，从空间效应视角对长江三角洲区县森林生态安全影响因素的空间差异进行分析，为维护森林生态安全提供决策依据。本研究结果有利于丰富森林生态安全评价的理论，填补森林生态安全影响因素空间效应和空间差异性研究的空白，为地区生态文明建设以及提升森林生态系统稳定性提供决策依据。

1 模型选择

1.1 森林生态安全评估模型

Pressure-State-Response (PSR) 最初由 Rapport 等^[22]于1979年提出，后由经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)于1989年举办针对环境问题的会议上得到七国集团首脑认可，用于构建生态系统健康评价体系的模型。目前被国内外学者广泛用于流域系统、湿地系统、耕地系统和森林系统等，PSR模型使用“压力—状态—响应”这一理论逻辑，体现了人类与环境之间的相互作用关系。本文借鉴PSR模型的分析框架，构建森林生态安全指标框架，森林生态安全状态类指标是指目前森林生态系统的资源状况；压力类指标用来反映人类的生活、生产活动对森林生态系统产生的破坏性干扰；响应类指标是指人类活动对森林生态系统产生的有益干扰。依据Lu等^[16]对森林生态安全的定义，对其科学内涵的把握，参照PSR模型，将森林生态安全指数细分为森林生态安全状态指数、森林生态安全压力指数和森林生态安全响应指数。而PSR模型中压力(P)与响应(R)均为人类活动对森林生态系统的干扰，本文均称为“压力”，包括“正向压力”与“负向压力”，“负向压力”即为响应。因而在文中计

算森林生态安全压力指数包括正向压力与负向压力，不单独计算响应指数。

1.1.1 森林生态安全评估指标体系建立

遵循科学性、可比性、数据可获得性等原则，分别选取代表森林数量、森林质量的指标，形成森林状态指数，选取代表一般社会压力、行为压力和人类维护的指标，形成森林压力指数。通过查阅文献、参考书籍，选取森林覆盖率、林地面积占比、人口密度等一系列指标。采用专家会议法，对选择的指标进行剔除和调整，最终确定 15 个指标来构建森林生态安全指数(表 1)。

1.1.2 森林生态安全指数计算

本文根据熵权法计算森林生态安全指数。熵权法是根据信息论基本原理，将系统的有序程度分为有序和无序两种状态，其中有序程度用信息来表示，而无序程度则用熵来度量，熵值越小的指标提供的信息量越大。熵权法具有赋权客观的优点，它能有效避免权重设置的主观影响。

(1)熵权法权重。

①假设有 $m(i=1, 2, \dots, m)$ 个样本和 $n(j=1, 2, \dots, n)$ 个指标，则构建判断矩阵：

$$X=(x_{ij})_{m \times n} \tag{1}$$

②将判断矩阵指标数据进行标准化处理。

森林状态指数中正向指标与森林压力指数中逆向指标的标准化公式为：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{2}$$

森林状态指数中逆向指标与森林压力指数中正向指标的标准化公式为：

$$y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{3}$$

表 1 森林生态安全指标体系

结构	亚结构	指标名称(性质)	公式
森林状态指数	数量指标	森林覆盖率(+)	森林面积/国土面积×100%
		林地面积占比(+)	林地面积/国土面积×100%
	质量指	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+其他林地面积)/国土面

	标		积
		森林单位面积蓄积量 (+)	森林蓄积量/森林面积
		森林林龄组成(+)	(0.15×幼龄林面积+0.35×中龄林面积+0.5×成熟林面积)/森林面积
		天然林比重(+)	天然林面积/森林面积×100%
		公益林比重(+)	公益林面积/森林面积×100%
		混交林占比(+)	混交林面积/森林面积×100%
森林压力指数	一般压力	人口密度(-)	年末人口数/国土面积
		单位面积能源消耗(-)	能源消耗量/国土面积
	行为压力	林木采伐强度(-)	林木采伐量/国土蓄积量
		二氧化硫排放强度(-)	二氧化硫排放量/国土面积
	维护指标	自然保护区占比(+)	自然保护区面积/国土面积×100%
		政府林业投入强度(+)	政府林业投资额/国土面积
		年度造林比例(+)	每年造林面积/森林面积×100%

注：+为正向指标，-为逆向指标；(A×乔木林面积+B×灌木林面积+C×疏林地面积+其他林地面积)/国土面积，公式中 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。

其中， y_{ij} 为指标标准化后的数据， x_{max} 、 x_{min} 分别为第 j 个指标的最大值与最小值。

③计算指标 j 的信息熵。

$$H_j = -\frac{\sum_{i=1}^n Y_{ij} \ln Y_{ij}}{\ln n} \tag{4}$$

$$Y_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}, i = 1, 2, \dots, m \tag{5}$$

式中： H_j 为指标 j 的信息熵。

④计算指标 j 的权重。

$$w_j = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^n (1-H_j)} \tag{6}$$

式中： w_j 为指标 j 的权重。

(2) 计算森林生态安全状态指数与森林生态安全压力指数。

森林生态安全状态指数反映森林系统本身的健康程度，计算公式为：

$$Z = \sum_{j=1}^n w_j y_{ij} \quad (7)$$

式中： Z 为森林生态安全状态指数， y_{ij} 为状态指标标准化后的数据， w_j 为指标 j 的权重。

森林生态安全压力指数反映森林系统面临社会经济发展压力以及人类活动对森林生态的维护综合后的大小，计算公式为：

$$Y = \sum_{j=1}^n w_j y_{ij} \quad (8)$$

式中： Y 为森林生态安全压力指数， y_{ij} 为压力指标标准化后的数据， w_j 为指标 j 的权重。

(3) 森林生态安全指数。

将森林生态安全状态指数与森林生态安全压力指数进行几何平均，可得森林生态安全综合指数，计算公式为：

$$ESI = \sqrt{Z \times (1 - Y)} \quad (9)$$

式中： ESI 为森林生态安全指数， Z 为森林生态安全状态指数， Y 为森林生态安全压力指数。

1.2 地理加权回归模型

最小二乘法 (OLS) 模型是线性非空间回归模型，分析自变量对因变量在整体区域内的回归情况，没有引入空间距离权重，因而无法有效反映影响因素在不同区域处对该位置森林生态安全指数的区域影响力，因而本文研究森林生态安全指数的影响因素时，选择地理加权回归模型，而非最小二乘法 (OLS)，使结果更加具有空间尺度的可靠性^[23, 24]。其模型如下：

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中： y_i 是 $n \times 1$ 维解释变量， x_{ik} 是 $n \times k$ 维解释变量矩阵， (u_i, v_i) 为观察点 i 的坐标， $\beta_k(u_i, v_i)$ 为观察点 i 上的第 k 个回归系数， ε_i 为算法残差。

地理加权回归模型的核心是空间权重矩阵，选择合适的空间权函数对模型中回归系数的正确极其重要，本文选择 Gauss 函数作为空间权函数。

$$w_{ij} = \exp \left[- \left(\frac{d_{ij}}{b} \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中： w_{ij} 为权重， b 是带宽， d_{ij} 为空间 i 位置与空间 j 位置之间的距离。

利用 Bowman^[26]的方法， b 与 CV 的关系如下：

$$CV = \sum_{i=1}^n [y_i - y_{\hat{i}}(b)]^2 \quad (12)$$

式中： $y_{\hat{i}}(b)$ 是 y_i 的拟合值，当 CV 最小时，对应的 b 就是相应的带宽。

1.3 生态区位模型

生态区位条件是影响森林生态安全状况的一个重要因素，生态区位系数是衡量生态区位条件优劣的指标，综合反映气象、地形等区域自然条件。生态区位系数参考赵海凤等^[26]、汤旭等^[27]建立的指标，加权平均计算得出。生态区位模型包括两部分，即建立生态区位系数评价指标体系和确定权重计算生态区位系数。

1.3.1 生态区位系数评价指标体系建立

区域生态区位条件是影响森林生态安全的一个重要因素，本文试图通过生态区位系数来衡量区域生态区位条件。生态区位系数的计算，第一步需要建立评价指标体系。本文通过频度分析法、理论分析法和专家咨询法，选取年降水量、年日照时数、年均气温、年均积温、日均风速、平均海拔、坡度、坡向等 8 个具体指标作为主要指标，如表 2 所示。

表 2 森林生态区位系数评价指标体系

指标名称	区位条件	评价因子	计量单位	释义	数据来源
森林生态区位系数	气候条件	年降水量	mm	一年中的降雨总量	中国气象局
		年均气温	℃	全年每日平均温度的总和/全年天数	中国气象局
		年均积温	℃	全年每日平均气温加总	中国气象局
		年日照时数	h	全年太阳日照时数总和	中国气象局
		日均风速	m/s	一年中每日风速的平均值	中国气象局
	地形地貌	平均海	m	以平均海平面高度作为高程基准	30m 精度的 DEM 数据，来自 NASA 和 NIMA 联

	条件	拔		面测定的地面高度	合测量的 SRTM 产品
		坡度	度	地表单元陡缓的程度	在 ArcGIS 平台上通过 DEM 数据获取
		坡向	—	坡面法线在水平面上投影的方向	在 ArcGIS 平台上通过 DEM 数据获取

1.3.2 生态区位系数计算

首先，ArcGIS 软件对生态区位系数评价 8 个指标进行栅格化处理，并对指标分级赋值。通过层次分析法和特尔菲法计算生态区位系数评价指标的权重。然后，对各指标空间加权叠加分析，得到分析结果图。最后，将各地区数据放置于分析结果图上，得到地区生态区位系数综合评价分值。

(1) 确定参评单元各评价指标的现状分值。

首先根据各参评单元评价指标的现状值、评价指标分级及其分值表，确定出各指标栅格图层现状区位系数评价指标分值空间分布图。

(2) 指标层分值计算。

各指标栅格图层区位系数分值按照公式计算：

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^n (S_{ijk} \times W_{ijk}) \quad (13)$$

式中：F_{ij} 为 j 指标的区位系数分值，S_{ijk} 为 j 指标的评价指标现状值，W_{ijk} 为 j 指标相对准则层 i 目标的权重值，n 为指标个数。

(3) 准则层分值计算。

各指标栅格准则层区位系数分值按照公式计算：

$$F_i = \sum_{j=1}^n (F_{ij} \times W_{ij}) \quad (14)$$

式中：F_i 为准则层 i 目标区位系数分值，F_{ij} 为 j 指标的区位系数分值，W_{ij} 为 j 指标相对准则层 i 目标的权重值，n 为准则层指标个数。

(4) 目标层分值计算。

每一个 500m×500m 区位系数综合分值按照公式计算：

$$F = \sum_{i=1}^n (F_i \times W_i) \quad (15)$$

式中： F 为区位系数综合分值， F_i 为准则层 i 目标区位系数分值， W_i 为准则层 i 目标相对总目标的权重值， n 为目标个数。

根据上述公式，可分别求出各行政区划生态区位系数评价指标层分值、评价准则层分值、评价目标层分值和生态区位系数综合评价分值。

2 数据来源

由于森林资源清查每 5 年一次，本文研究 2015 年长江三角洲森林生态安全。2019 年 12 月，《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》印发，规划长江三角洲范围为苏浙皖沪四省市全部区域，以安徽、江苏、浙江和上海三省一市 41 个地级市的区县级别行政单元为基本空间研究单元，由于数据可得性、行政区划更改等因素，以长江三角洲 307 个区县行政单元作为研究样本，分析 2015 年长江三角洲森林生态安全空间差异性。

本文核心森林数据来源于林业生态课题组，具体数据收集工作为：统一的各区县数据由三省一市的省规划院提供，省规划院未统计的森林类数据由 307 个区县林业局填报，再经由课题组成员进行审核，多轮电话沟通进行数据纠错，完成森林类数据工作。社会经济类数据来源于《中国县域统计年鉴》及三省一市统计年鉴，307 个区县《国民经济和社会发展统计公报》及政府工作报告等。

3 经验性结果分析

3.1 长江三角洲森林生态安全指数空间格局分析

运用 ArcGIS 软件，依据等分法将森林生态安全综合指数划分为 5 个等级(图 1)。

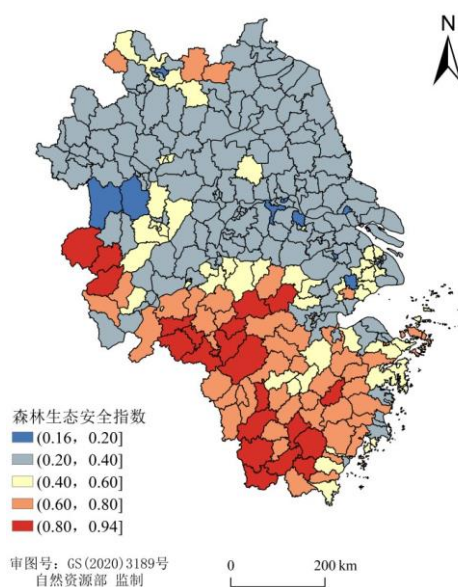


图 1 长江三角洲森林生态安全指数空间分布

从图 1 可以看出：(1)森林生态安全指数最好等级的区域(0.8~1)主要分布在安徽省南部和浙江省西南部；而最差等级的区域(0~0.2)几乎都在江苏省；较好等级的区域(0.6~0.8)在安徽省南部和浙江省大部分，分布面积较广；一般等级的区域(0.4~

0.6)在各省市都有分布,但在浙江省和安徽省的分布面积较大,江苏省零星分布,上海市几乎全部覆盖;较差等级的区域(0.2~0.4)主要分布在江苏省和安徽省中部和北部,该等级面积分布最广。(2)从各省市森林生态安全指数均值来看,四省市从高到低依次为:浙江省0.61(较好)、安徽省0.42(一般)、上海市0.32(较差)和江苏省0.31(较差),表明浙江省的森林安全状况在长江三角洲地区最优,远高于上海市和江苏省。(3)从全域来看,长江三角洲307个区县的森林生态安全指数均值为0.43,整体属于一般水平,而且指数分布较不均衡,长江三角洲南部优于北部、东部优于中部。从各区县来看,森林生态安全指数最高的3个区县从高到低依次为:衢州市龙游县、金华市磐安县和丽水市庆元县,对应的指数分别为0.93、0.89、0.88;而最低的3个区县从低到高依次为徐州市鼓楼区、南通市港闸区和苏州市姑苏区,对应的指数分别为0.16、0.15、0.14。从森林生态安全指数最高的3个区县来看,均分布在浙江省;而从最低的3个区县来看,都分布在江苏省,这6个区县的分布与森林生态安全指数均值的排序基本吻合。

3.2 长江三角洲森林生态安全驱动因素分析

本文选取城镇化水平、工业结构和生态区位系数3个指标,通过ArcGIS软件对长江三角洲307个区县样本数据进行地理加权回归,分析该地区森林生态安全指数影响因素空间差异性。

3.2.1 变量选择

选取城镇化水平、工业结构和生态区位系数作为自变量,分别考察这三个因素对森林生态安全影响的空间差异。其中,城镇化水平指标主要是用城镇人口数与总人口数之比表示,工业结构是由第二产业增加值与第三产业增加值之比表示,生态区位系数由本文计算所得。

3.2.2 实证结果与分析

通过ArcGIS软件对长江三角洲307个区县的数据进行地理加权回归,表3为回归的整体结果输出,包括回归的拟合系数、最优带宽和AIC值,结果表明整体模型表现良好,模型结构可行。

表3 地理加权回归模型的整体估计结果

指标	R ²	调整 R ²	残差平方和	带宽	AIC _c
结果	0.76	0.72	3.01	119046.98	-449.16

(1)城镇化水平。

长江三角洲城镇化水平对区域森林生态安全指数驱动相关性呈现较明显的负相关驱动特征并同时具有显著的区片式空间分布特征,相邻区域的差异较小,具有明显的空间效应,如图2所示。

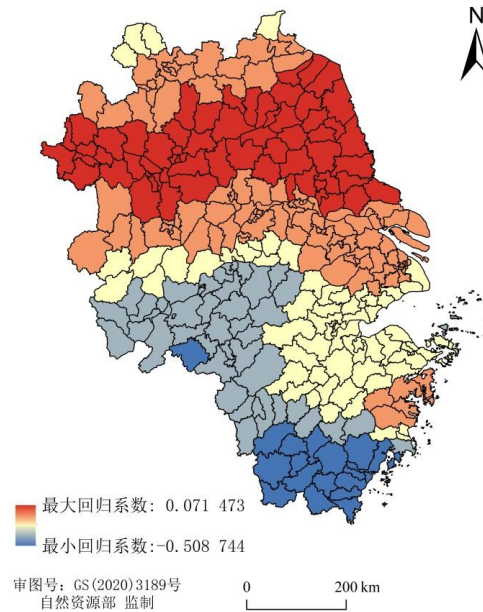


图2 城镇化水平与森林生态安全指数回归系数空间分布

长江三角洲相邻区域的回归系数差异较小,说明城镇化水平对森林生态安全影响有明显的空间依赖效应。盐城市、淮南市、淮安市、泰州市、扬州市、阜阳市和蚌埠市等出现连片的正相关驱动区域,而且正相关性较弱,这些区域的特点是森林生态安全水平在全域属于低水平,而经济发展落后、城镇化水平较低,这可能是导致正相关性的原因。除上述区域外,整体呈现明显的负相关趋势,回归系数绝对值由北向南逐步增大,说明城镇化对森林生态安全的影响从长江三角洲地区西北部向东南部逐渐增大。东南部地区的城镇化水平快速发展,大批农村人口迁入城市,土地过度开发利用,大面积的地貌、植被或水土保持设施被破坏,导致森林面积锐减,甚至水土流失,进而降低森林生态安全。其中,城镇化水平对森林生态安全影响较大的地区为温州市与丽水市,二者在地理位置上相连,且森林覆盖率在全域均处于较高水平,为了加快城镇化的进程,势必对森林生态系统造成一定的破坏性干扰,降低森林生态安全水平。

城镇化是一个农业人口转化为非农业人口、农业用地转化为非农业用地、农业活动转化为非农业活动的过程。城镇化水平对森林生态安全的影响通过两个视角分析。其一,农村视角。城镇化将农业人口转化为非农业人口,促进农村劳动力的转移,释放的大量农村土地可转化为林地,同时减少了对森林资源的依赖,提高森林生态安全状态。其二,城市视角。城镇化通过集聚经济或不经济对森林生态产生正向或负向影响。在一定的规模内,人口或企业集聚,提高资源的利用率,降低森林生态系统压力;反之,超过集聚经济的规模,导致集聚不经济,消耗更多的资源,排放更多的污染物,带来更大的压力。城镇化对森林生态安全的影响需要从多角度、多阶段分析。城镇化水平较低时,城乡收入差距驱动促使农村劳动人口向城市转移,减少了对森林资源的依赖,降低了林农经营林地的积极性,促进退耕还林工程。与此同时,由于处于城镇化初期,城市人口、产业集聚在一定范围内,森林生态系统自我调控的生态弹性较强,人类与森林生态系统能够和谐相处,对森林生态系统的胁迫性较小。因而,在这一阶段城镇化能够提高森林生态安全水平。城镇化水平较高时,随着经济的发展,农民收入增加,农村能源结构已经发生调整,农村劳动力转移对森林资源增加的作用与城镇化初期相比,有所降低。基础设施建设以及房地产行业的蓬勃发展,占据了更多的生态用地。人口、产业数量超过区域限制,人类活动超过森林生态系统的承载能力,那么必然会增加资源消耗和废弃物的排放,给森林生态系统的自我调控带来更大的压力。因而,在这一阶段城镇化可能降低森林生态安全水平。

(2) 工业结构。

长江三角洲工业结构对森林生态安全指数驱动相关性呈现较明显的两极化趋势,而且无论正相关性还是负相关性均较弱,

同时具有显著的区片式空间分布特征，相邻区域的差异较小，具有明显的空间效应，如图 3 所示。

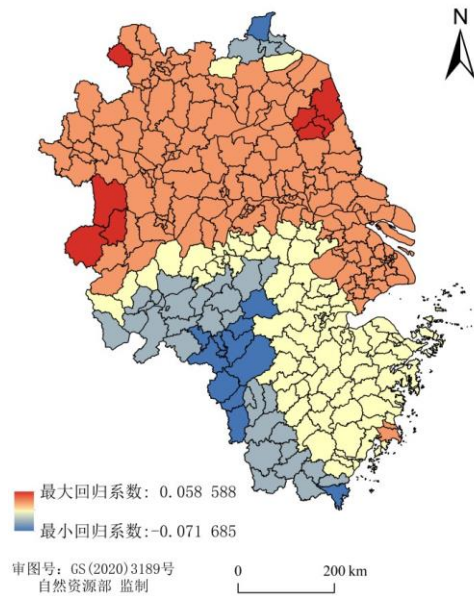


图 3 工业结构与森林生态安全指数回归系数空间分布

除个别区域外，长江三角洲北部为主要负相关区域，而且负相关区域较大，成片出现，说明工业结构对森林生态安全负向影响有明显的空间性。该部分区域与其他地区相比，具有多数第三产业占主导位置或第三产业与第二产业增加值相当的特点。对于上海市、江苏省的大多数地区而言，第三产业占主导位置，它们完成了产业结构转型，降低消耗，实现资源的高效合理利用和优化配置，减少污染物的排放，改善了森林生态环境质量；对于安徽省而言，作为首批纳入国家重点生态功能地区，在政策上引导“低消耗、可循环、少排放、零污染”的生态工业，在一定程度上可降低人类生产活动对森林生态系统的有害干扰。森林生态安全水平越高的区域，工业结构对森林生态安全指数负向影响越大，说明这些地区更容易受工业结构的影响，提高第三产业占比尤为重要。长江三角洲地区工业结构与森林生态安全指数正向和负向相关性均较弱，影响程度均较低，说明该地区正在实现产业结构的升级，降低环境污染排放，减轻生态环境压力，减少对森林系统的破坏。

工业结构对森林生态安全的影响，可以分为两个阶段：在经济发展初期阶段，主要由农业向能源密集型重工业发生转变，资源持续投入导致污染排放量只增不减，加大了对森林生态系统的压力，导致森林生态安全状况下降；随着经济的不断发展，下一阶段产业结构将向低污染的服务业和知识密集型产业转型，随着产业结构的升级，向第三产业转移，该产业不生产物质产品，对资源和能源的需求小，产生的污染物较少，提高了森林生态系统的安全。因此，产业结构升级对提高长江三角洲森林生态安全水平具有显著作用。

(3) 生态区位系数。

长江三角洲地区生态区位系数对森林生态安全指数驱动相关性呈显著负相关驱动特征与斑块化空间分布趋势，其中，与城镇化水平、工业结构影响因素相比，生态区位系数对森林生态系统安全的负向影响更强，相邻区域的差异较小，具有明显的空间效应，如图 4 所示。

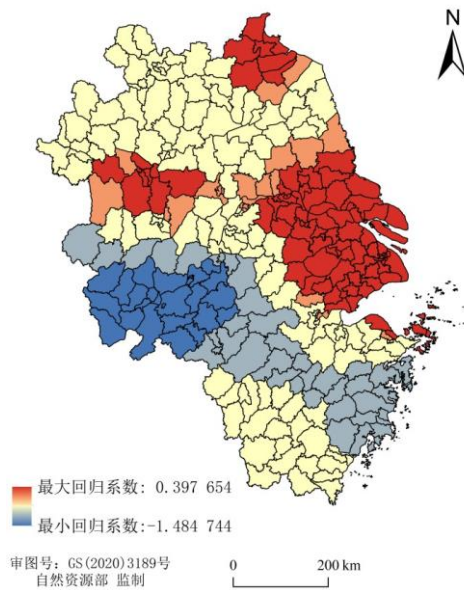


图 4 生态区位系数与森林生态安全指数回归系数空间分布

从整体驱动特征空间分布来看,上海市、苏南地区、连云港市和淮南市等地区均呈现出正相关特征,这些地区的特征是区位条件与森林生态安全水平一般,这也可能是导致二者呈现正相关性的原因。安庆市、池州市和铜陵市等出现了强负向相关性,芜湖市、台州市、黄山市、金华市及其他部分地区表现出较强的负相关性,这些地区的特点是生态区位等级在长江三角洲地区处于一般水平,区位条件与其他地区相比对森林生长不是特别有利,而呈现出森林生态安全水平较高,这与地区原始地形有关,山地面积大,不利于开垦种植农作物,从而形成森林。其他地区,区位条件与森林生态安全水平呈弱相关性,尤其区位条件好的地区,其生态安全水平一般。因此,森林生态安全水平的提高应该顺应其生态区位条件,区位条件越好的地区,越有利于森林生长,对于提升森林生态系统的安全也相对容易。

4 结论与政策启示

本文运用地理加权回归方法分别从城镇化水平、工业结构和生态区位系数三个方面对森林生态安全指数的空间差异性进行实证研究,揭示了长江三角洲 307 个区县各因素在空间上对森林生态安全指数影响的差异性,为提高长江三角洲森林生态安全提出相应的政策建议。

4.1 研究结论

(1)长江三角洲地区森林生态安全指数均值为 0.43,属于一般水平,整体呈非均衡分布;其中,南部>北部,东部>西部。从均值来看,省际层面,浙江省 0.61(较好)>安徽省 0.42(一般)>上海市 0.32(较差)>江苏省 0.31(较差),浙江省的森林安全状况最优,高于上海市和江苏省;区县层面,与省际森林生态安全指数均值的排序基本吻合。

(2)城镇化水平、工业结构和生态区位系数对长江三角洲森林生态安全具有显著影响,均有明显的空间效应。其中,区域城镇化水平与森林生态安全指数显著负相关,并呈显著的区片式空间分布;工业结构与森林生态安全指数相关性较弱,并呈显著的区片式空间分布;生态区位系数与森林生态安全指数显著负相关,并呈显著的斑块化空间分布。

4.2 政策启示

森林生态安全状况较差的地区,须重点考虑人口集聚、红线控制、产业结构转型和发挥区域生态区位优势等措施,缓解森林生态系统安全的压力。(1)城镇化水平较低的地区,可加快农村劳动力转移,促进农村人口向城市集聚。一方面,农村人口压力的降低有助于促进山区退耕还林,降低对薪柴等林木资源的依赖,减轻森林生态安全压力;另一方面,城镇人口和企业的集聚产生经济外部性,提高资源和能源利用效率。而城镇化水平较高的地区,应加强森林生态安全红线控制,降低能源总量消耗和污染总量排放,在森林生态环境承载能力内实现森林可持续性发展。(2)用生态文明理念引领产业结构实现绿色转型,推进循环经济。一方面,通过污染末端治理、达标排放,制定环保产业的发展政策等手段对传统产业进行生态化改造,推动区域经济的绿色转型;另一方面,通过产业生态链、产业分工协作、产业生态转移等途径实现产业分工布局合理化。(3)发挥地方生态区位优势。充分利用地方自然禀赋,将生态区位优势转化为生态区位竞争优势,以森林生态发展促进区域生态振兴。

参考文献:

- [1]Magalhães J L L,Lopes M A,de Queiroz H L.Development of a flooded forest anthropization index (FFAI) applied to Amazonian areas under pressure from different human activities[J].Ecological Indicators,2015,48:440-447.
- [2]Tidwell T L.Nexus between food,energy,water,and forest ecosystems in the USA[J].Journal of Environmental Studies and Sciences,2016,6(1):214-224.
- [3]Ciancio O,Corona P,Lamonaca A,et al.Conversion of clearcut beech coppices into high forests with continuous cover:A case study in central Italy[J].Forest Ecol Manage,2006,224(3):235-240.
- [4]Kirkpatrick J B,Marsden-Smedley J B,Leonard S W J.Influence of grazing and vegetation type on post-fire flammability[J].Journal of Applied Ecology,2011,48(3):642-649.
- [5]洪伟,闫淑君,吴承祯.福建森林生态系统安全和生态响应[J].福建农业大学学报(自然版),2003(1):79-83.
- [6]Costanza R.Ecosystem health and ecological engineering[J].Ecological Engineering,2012,45(8):24-29.
- [7]Li F Z,Lu S S,Sun Y N,et al.Integrated evaluation and scenario simulation for forest ecological security of Beijing based on system dynamics model[J].Sustainability,2015,7(10):13631-13659.
- [8]Zhang Q,Wang G Y,Mi F,et al.Evaluation and scenario simulation for forest ecological security in China[J].Journal of Forestry Research,2019,30(5):1651-1666.
- [9]徐会勇,赵学娇,张大红.我国省域森林生态安全评价及差异化——基于生态文明建设背景[J].生态学报,2018(17):6235-6242.
- [10]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(11):3115-3127.
- [11]Moraes R,Landis W G,Molander S.Regional risk assessment of a Brazilian rain forest reserve[J].Human & Ecological Risk Assessment:An International Journal,2002,8(7):1779-1803.
- [12]李岩,王珂,刘巍,等.江苏省县域森林生态安全评价及空间计量分析[J].生态学报,2019(1):202-215.

-
- [13]段伟, 温亚利, 王昌海. 劳动力转移对朱鹮保护区周边环境的影响分析[J]. 资源科学, 2013(6): 1310-1317.
- [14]Lu S S, Tang X, Guan X L, et al. The assessment of forest ecological security and its determining indicators: A case study of the Yangtze River Economic Belt in China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 258: 110048.
- [15]白江迪, 刘俊昌, 陈文汇. 基于结构方程模型分析森林生态安全的影响因素[J]. 生态学报, 2019(8): 2842-2850.
- [16]Lu S S, Qin F, Chen N, et al. Spatiotemporal differences in forest ecological security warning values in Beijing: Using an integrated evaluation index system and system dynamics model[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 549-558.
- [17]Hu H F, Wang G G, Bauerle W L, et al. Drought impact on forest regeneration in the Southeast USA[J]. Ecosphere, 2017, 8(4): e01772.
- [18]Zirlewagen D, Raben G, Weise M. Zoning of forest health conditions based on a set of soil, topographic and vegetation parameters[J]. Forest Ecology & Management, 2007, 248(1-2): 43-55.
- [19]Wolfslehner B, Vacik H. Evaluating sustainable forest management strategies with the analytic network process in a pressure-state-response framework[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(1): 1-10.
- [20]Xie H L, Yao G R, Liu G Y. Spatial evaluation of the ecological importance based on GIS for environmental management: A case study in Xingguo county of China[J]. Ecological Indicators, 2015, 51: 3-12.
- [21]冯彦, 郑洁, 祝凌云, 等. 基于 PSR 模型的湖北省县域森林生态安全评价及时空演变[J]. 经济地理, 2017(2): 171-178.
- [22]Rapport D J, Thorpe C, Regier H A. Ecosystem medicine[J]. Bulletin of the Ecological Society of America, 1979, 60(4): 180-182.
- [23]邵明, 董宇翔, 林辰松. 基于 GWR 模型的成渝城市群生态系统服务时空演变及驱动因素研究[J]. 北京林业大学学报, 2020(11): 118-129.
- [24]王雅楠, 赵涛. 基于 GWR 模型中国碳排放空间差异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016(2): 27-34.
- [25]Bowman A W. An alternative method of cross-validation for the smoothing of density estimates[J]. Biometrika, 1984, 71(2): 353-360.
- [26]赵海凤, 刘川源, 鲁莎莎, 等. 基于区位模型的四川森林生态服务价值核算研究[J]. 河南农业大学学报, 2015(6): 831-837.
- [27]汤旭, 冯彦, 鲁莎莎, 等. 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[J]. 生态学报, 2018(3): 886-899.