

DOI: 10.5846/stxb201801140107

李岩,王珂,刘巍,李燕坤,王时军,张大红.江苏省县域森林生态安全评价及空间计量分析.生态学报,2019,39(1): - .

Li Y, Wang K, Liu W, Li Y K, Wang S J, Zhang D H. County forest ecological security evaluation and spatial econometric analysis in Jiangsu Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

江苏省县域森林生态安全评价及空间计量分析

李 岩¹, 王 珂^{2,3}, 刘 巍¹, 李燕坤¹, 王时军¹, 张大红^{1,*}

1 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

2 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

3 中外园林建设有限公司, 北京 100040

摘要:通过考察生态区位因素对森林生态安全的影响,建立评价指标体系,研究其空间相关性的内在效应机制,从而实现森林生态安全的评价与监测。以江苏省 80 个区县为研究对象,基于 2000—2015 年面板数据,运用熵权法、专家法及模糊物元法计算森林生态安全指数,然后结合气象类指标及地形类指标计算生态区位系数,再用该系数修正森林 ESI,同时结合 ArcGIS 技术、空间相关性分析、SLM 与 SEM 模型得出如下结论:(1)人口密度、单位面积能源消耗量、退耕还林面积占比等指标权重最大;(2)生态区位系数高值区主要分布在江苏南部少数地区,低值区主要分布在江苏东北部;(3)苏南地区森林生态安全状况整体好于苏北及中东部地区;(4)2000—2015 年,江苏省 67.5% 的区县森林 ESI 呈现出较明显下降趋势,反映出江苏省森林生态安全发展状况不容乐观;(5)江苏省县域森林 ESI 整体空间相关性显著($P \leq 0.01$),但 2000—2015 年空间聚集程度有所下降,且 Low—Low 聚类显著性更强;(6)森林 ESI 在江苏省县域间为扩散效应与回流效应并存。

关键词:森林生态安全评价;模糊物元模型;生态区位模型;探索性空间数据分析(ESDA);证实性空间数据分析(CSDA)

County forest ecological security evaluation and spatial econometric analysis in Jiangsu Province

LI Yan¹, WANG Ke^{2,3}, LIU Wei¹, LI Yankun¹, WANG Shijun¹, ZHANG Dahong^{1,*}

1 College of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3 Landscape Architecture Corporation of China, Beijing 100040, China

Abstract: The aim of the present study was to examine the impact of ecological location factors on forest ecological security, establish an evaluation index system and study the internal effect mechanism of its spatial correlation to evaluate and monitor forest ecological security. Based on 80 counties in Jiangsu Province forest panel data from 2000 to 2015 were analyzed in this study using the entropy, expert, and fuzzy matter element methods to calculate the forest ecological security index, which was adjusted according to the ecological location model obtained from the meteorological and terrain indexes. Moreover, the combined use of ArcGIS software, ESDA and CSDA models in the present study revealed that (1) population density, unit area energy consumption and proportion of reforestation area are the most important measures; (2) the area with the highest ecological location coefficient was mainly distributed in southern Jiangsu Province. Further, the area with the lowest ecological location coefficient was mainly distributed in the northeast; (3) the forest ecological security status in southern Jiangsu was better than that in northern and mideastern Jiangsu; (4) regarding forest cover change from 2000 to 2015, 65% of the ESI index of all counties in Jiangsu Province showed an obvious declining trend; (5) the overall spatial correlation of

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

收稿日期:2018-01-14; 网络出版日期:2018-00-00

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

the forest ESI index in counties of the Jiangsu Province was significant, but the spatial aggregation in 2000—2015 decreased and Low—Low clustering was more significant ($P \leq 0.01$); and (6) the diffusion and reflux effects between the forest ESI index in the counties of Jiangsu Province were concomitant.

Key Words: forest ecological security; fuzzy matter element method; ecological location model; exploratory spatial data analysis (ESDA); confirmatory spatial data analysis (CSDA)

随着由全球生态环境剧变带给人类生存与发展的压力越来越大,生态安全问题已成为目前人类实现可持续发展的重要障碍。森林生态系统作为陆地上最大、最复杂的生态系统,在生态安全的保护过程中具有根本性和不可替代的作用^[1]。然而,我国的森林资源面临诸多威胁:盗砍滥伐、毁林开荒、非法占用林地、火灾、病虫害、环境污染等,这些有害干扰导致森林正常结构的破坏、生态平衡的失调和生态功能的退化,严重威胁着森林生态健康和森林生态安全^[2]。因此,通过建立评估指标体系对森林生态安全进行评价与监测具有十分重要的意义。

国外对生态安全问题研究起步较早,1996年《地球公约》中首次提出了生态安全的定义,随后该定义被国际应用系统分析研究所 (IIASA) 进行了广义和狭义上的区分。针对生态安全的研究分为宏观和微观两个领域,宏观方面主要集中于概念以及与国家安全、军事战略、可持续发展和全球化的关系^[3-5],微观方面体现在化学品的使用对农业生态系统健康及生态安全的影响^[6]。在生态安全评价方面,研究较少,主要集中在生态风险评价^[7-8]和生态系统健康评价两方面^[9],评价模型主要有 PSR、DPSEEA 和 ECCO 等^[9-11]。国内研究中,米峰等在基于广义森林生态安全的基础上,提出了森林生态安全既指森林生态系统的自身健康和安全,又指在受到人类行为干扰和影响时保持安全的状态。强调了森林所具有的经济、社会、生态三大效益^[12]。张智光等在前人研究基础上首次提出了林业生态安全的概念,创新性地将森林生态安全与林业产业结合论证,并对两者之间的关系进行了探讨。同时,他认为对森林生态安全进行监测预警非常重要^[13]。此后,国内学者开始对生态安全进行方法上的探索,此阶段研究也呈现出研究领域较为广泛的特征。如赵宏波采用 TOPSIS 模型研究了吉林省耕地生态安全时空变化^[14]。类似的还有对用地^[15]、海洋^[16]以及草原^[17]生态系统的研究。而针对森林生态系统进行评价的研究还比较少,刘心竹等人在前人研究的基础上创新性地从森林有害干扰的视角构建评价指标体系,并运用该体系对全国 31 个省进行了森林生态安全评价^[18]。张智光等采用压力—状态—影响—响应结构模型及结构方程模型对林业生态安全的共生耦合情况进行了测度^[19]。但这两位学者并未将研究区域缩小至县,并进行时空演变分析。汤旭等虽然从空间相关性的角度考察了湖南省各县的森林生态安全状况,得出了各地存在显著相关性的结论^[20],但没有考虑生态区位因素对森林生态安全造成的影响,也没有建立模型深入阐释森林生态安全空间相关性的内在效应机制。

基于此,本文以江苏省 80 个县为研究样本,尝试引入生态区位模型结合 GIS 技术对 2000—2015 年江苏省县域森林生态安全指数 (ecological security index, ESI) 及其时空分布进行研究 (图 1),并在此基础上建立空间滞后模型 (SLM) 与空间误差模型 (SEM) 探讨森林 ESI 的空间扩散效应与回流效应,旨在定量化客观评价江苏省县域森林生态安全状况并深入探讨县域间森林生态发展的时空演化规律及内在效应机制,为生态保护政策制定提供依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

江苏省地处中国大陆东部沿海地区,是长江三角洲重要组成部分,地跨 $116^{\circ}18'—121^{\circ}57'E$, $30^{\circ}45'—35^{\circ}20'N$,内陆面积 10.72 万 km^2 ,占中国土地总面积的 1.12%。江苏省生态区位条件较好,属于温带向亚热带的过度性气候,气候温和,雨量适中,四季分明。但江苏省森林资源较为贫乏,截至 2016 年,江苏省森林覆盖

率仅为 15.8%,居全国 28 位。江苏省人口非常稠密,2016 年人口密度为每平方千米 744 人,居全国之首;实现地区生产总值 76086.2 亿元,居全国第二位。由此可见,江苏是经济大省,但同时又是森林资源小省。人口密度大,经济发展水平高,但森林资源短缺,这就给经济、社会、资源、环境可持续发展带来了巨大压力。因此研究该省森林生态安全状况具有十分重要的现实意义。

1.2 数据处理

本研究的样本为江苏省 80 个区县,涉及 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 4 个年份的数据,所有数据来自生态安全(森林)指数研究项目。为方便数据的收集与统计,课题组设计了数据投放器,以便各区县在线输入数据,其设计思路如图 2 所示。

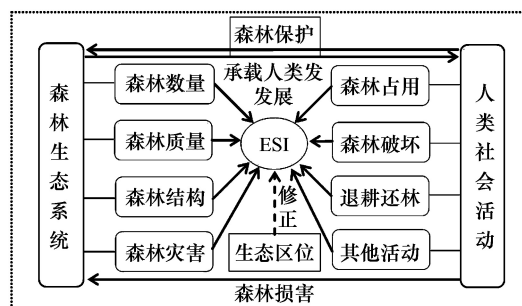


图 1 森林生态安全机制图

Fig.1 Forest ecological security mechanism

ESI: 森林生态安全指数, ecological security index

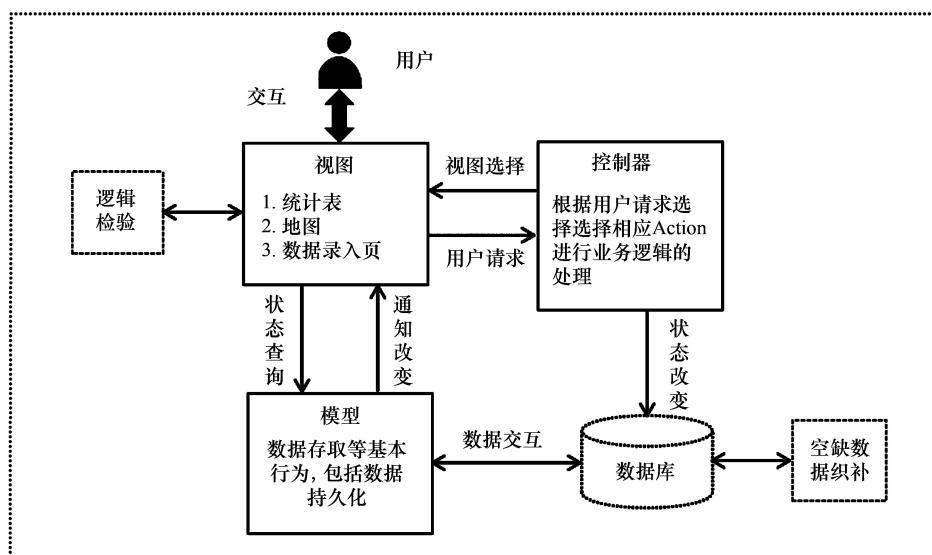


图 2 数据投放器系统框架结构图

Fig.2 Frame Structure of Data Delivery Device

数据收集工作分几个步骤完成:首先组织江苏省林业厅、规划院进行了数据投放器的使用培训会议;江苏省林业厅将数据收集工作细化到各县林业局、规划院,各单位完成数据填报,江苏省林业厅对数据进行审核;课题组专家对数据进行修正。所有数据处理工作于 2017 年 4 月完成。

2 研究方法

文章采用 PSR 模型建立森林生态安全指标体系,熵权法与专家法相结合的方法来确定权重,选用模糊物元法与欧式贴适度来评价森林 ESI。然后借助生态区位模型对森林 ESI 进行修正。最后运用 GIS 技术和空间计量模型对森林 ESI 的空间分布进行深入分析。

2.1 指标体系的建立

2.1.1 森林生态安全指标体系

文章以 PSR 模型为基础对江苏省县域森林 ESI 评价指标体系进行研究。同时对 PSR 模型进行改进,将模型中三类指标合并为压力指标和状态指标,其中压力指标是把原模型中的压力指标与响应指标结合起来,

因为这两类指标反映了人类对森林施加的压力以及人类保护森林的努力,都属于人类行为指标。课题组经过文献综述及专家咨询首先选定了对森林生态安全影响较大的多个指标。然后通过 STATA 软件的主成分分析功能,经方差最大化旋转后生成 10 个主因子,累计方差贡献率达到 90%,在旋转后的主成分因子负荷矩阵中初步选取负荷系数和 ≥ 1.00 的 30 余指标。2016 年 4 月课题组又进一步对江苏省盱眙县、宜兴市进行了实地调研,发现天然林蓄积量、森林生物量等指标存在年份连续性差、县域之间数据差别较大或统计口径不一致等问题,因此剔除了数据之间相关性强以及数据可获得性差的指标,随后通过电话咨询以及查询统计年鉴进行数据填补,最终形成了包括森林覆盖率、森林单位面积蓄积量在内的 16 个具体指标,如表 1 所示。

表 1 森林生态安全评价指标体系
Table 1 Forestry ecological security index system

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	编码 Code	具体指标 Specific indicators	计算公式 Calculation formula	指标权重 Index weight
江苏省县域 森林生态安 全综合评价	森林状态	资源状况	F01	森林覆盖率(+)	森林面积/国土面积×100%	0.079220212
			F02	森林单位面积蓄积量(+)	森林蓄积量/森林面积	0.04960111
			F03	森林物种丰度指数(+)	(权重 A×乔木林面积+权重 B×灌木林面积 +权重 C×其他林面积)/国土面积	0.042446161
			F04	林分结构(+)	天然林面积/森林面积	0.014250826
		自然灾害	F05	森林火灾致灾率(-)	森林火灾致灾面积/森林面积×100%	0.076434312
			F06	森林病虫害害致灾率(-)	森林病虫害害致灾面积/森林面积×100%	0.075530304
	社会压力	一般压力	Y01	人口密度(-)	县年末人口数/国土面积×100%	0.165148751
			Y02	土地沙化强度(-)	沙化土地面积/国土面积×100%	0.007975322
		行为压力	Y03	水土流失强度(-)	水土流失面积/国土面积×100%	0.012783166
			Y04	林木采伐强度(-)	林木采伐量/森林蓄积量×100%	0.013903909
			Y05	二氧化硫排放强度(-)	工业二氧化硫排放量/国土面积	0.013191591
			Y06	单位面积能源消耗量(-)	能源消耗量/国土面积	0.105933847
		修复行为	Y07	年度造林比率(+)	造林面积/森林面积×100%	0.0751699
			Y08	退耕还林面积占比(+)	退耕还林面积/森林面积×100%	0.10200604
			Y09	森林自然保护区面积占比(+)	森林自然保护区面积/森林面积×100%	0.08441885
			Y10	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	0.08198575

表中森林物种丰度指数公式中 A、B、C 分别指乔木林、灌木林及其他林地的生物丰度指数权重

2.1.2 森林生态安全指标权重

文章采用熵权法与专家打分法相结合的方法确立综合权重,计算结果如表 1 所示。这样既克服了熵权法极值点对计算结果影响过大的缺陷,也克服了专家法主观性过强的缺陷,实现了良好的评估效果。综合权重中,人口密度、单位面积能源消耗量、退耕还林面积占比、森林自然保护区面积占比、森林生态建设与保护投资强度等指标权重较大(>0.08),因此提高江苏省森林生态安全状况要降低人类活动对森林生态系统的负面影响,增加县域森林覆盖面积,加大投资力度与保护力度。

2.2 模糊物元法

为了解决各类指标的不相容的问题,本文决定采用模糊物元法。模糊物元法用 M 、 C 、 x 分别表示模糊物元、特征、模糊量值。若有 m 个样本, n 项指标(本文有 80 个样本,16 项指标),则可用 M_i 表示第 i 个样本($i=1,2,\dots,m$), C_j 表示第 i 个事物的第 j 项指标($j=1,2,\dots,n$), x_{ij} 表示第 i 个样本第 j 个指标的模糊量值($i=1,2,\dots,m$; $j=1,2,\dots,n$)。^[21-22] 则江苏省县域森林生态安全的复合模糊物元 R_{mm} 如下所示:

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

2.2.1 计算从优隶属度

对于森林生态安全的每项指标 C_j , 可以计算其相对于标准事物的从优隶属度。采用以下两个公式: 越大越优型指标:

$$u_{xij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad (2)$$

越小越优型指标:

$$u_{xij} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} \quad (3)$$

式中, u_{xij} 表示森林生态安全各指标的从优隶属度 ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), 各指标中的最大值和最小值分别用 $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 表示。基于以上计算结果得出新的模糊物元 R_{mm} :

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

2.2.2 标准模糊物元与差平方模糊物元

因为森林生态安全指标体系各特征值中 u_{xij} 的最大值均为 1, 所以得出标准模糊物元 R_{0n} :

$$R_{0n} = \begin{bmatrix} & N_{0N} \\ C_1 & u_{x01} \\ C_2 & u_{x02} \\ \vdots & \vdots \\ C_N & u_{x0n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

依据 $\Delta_{ij} = (u_{x0j} - u_{xij})^2$ 和 R_{0n} 来计算差平方, 得出差平方模糊物元 R_{Δ} :

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

2.3 欧式贴近度与 ESI 综合评价

经过标准化之后, 文章采用欧式贴近度公式来计算森林 ESI 值, 该方法计算时首先确定最优方案, 然后计算其他方案与该方案的贴近程度, 越接近则该方案越优^[23]。本文中复合模糊物元 R_{PH} 的计算采用 $M(*, +)$ 方法:

$$R_{PH} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ PH_i & PH_1 & PH_2 & \cdots & PH_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $PH_i = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j \Delta_{ij}}$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), w_j 是第 j 个指标的熵权重, Δ_{ij} 为第 i 个样本县第 j 个指标的平方差。 R_{PH} 为从第一个到第 m 个样本县森林 ESI 的集合, PH_i 即为第 i 个样本县的森林 ESI 值。

2.4 生态区位模型

生态区位模型是一个综合反映气象、地形等区域自然条件因素的系统,它能够通过影响物种分布和植被生产力来对森林生态安全发生作用,因此可以用它来对森林生态安全指标体系进行修正和补充。本文运用 ArcGIS 软件对 8 个生态区位指标做栅格化处理,再对各评价指标进行分级赋值,最后运用专家打分法确定了气象类系数与地形类系数的权重分别为 0.625 和 0.375。在确定指标的权重后,再对江苏省各区县的生态区位系数进行评估。根据指标的具体特征,将每个指标分为 5 个级别,等级越高对于林业的发展越有利。目前尚缺少对每一指标分级区间划定的研究,因此对于每个指标分属不同级别的区间划定,主要通过查阅参考文献^[24],再结合区位系数的定义和应用范围最终确定(表 2)。在计算生态区位系数时,首先应依据表 2 的评级标准和参评单元评价因子的现状值,确定现状区位系数评分空间分布图,然后计算指标层区位系数分值:

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^n (S_{ijk} \times W_{ijk}) \quad (8)$$

式中, F_{ij} 、 S_{ijk} 、 W_{ijk} 分别为 j 指标的区位系数分值、评价指标现状值、权重值, n 为指标个数^[25]。同理可以计算得到准则层与目标层的区位系数分值。结合前面已经计算出的森林生态安全指数, PH_i 可以通过公式:

$ESI = PH_j \times \frac{F}{\bar{F}}$ 计算修正以后的森林生态安全指数。ESI 为经生态区位系数修正后的森林生态安全值, PH_i 为最初森林生态安全值, F 为区位系数综合分值, $\bar{F}$ 为全省区位系数平均值。

表 2 生态区位系数分级表

Table 2 Evaluation table of ecological location coefficient

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	单位 Unit	一级 Level 1	二级 Level 2	三级 Level 3	四级 Level 4	五级 Level 5
生态区位系数	气象区位系数	年降水量	mm	<200	20—400	400—600	600—1000	≥1000
		年积温	℃	≤1600	1600—3200	3200—4500	4500—8000	>8000
		年平均气温	℃	≤2	2—9	9—14	14—22	>22
		日照时数	h	≤1200	1200—2000	2000—2600	2600—3000	>3000
		日均风速	m/s	≥32.6	20.8—32.6	10.8—20.8	3.4—10.8	<3.4
	地形区位系数	平均海拔	m	≥3500	1000—3500	500—1000	200—500	<200
		坡度	%	≥35	25—35	15—25	5—15	≤5
		坡向	—	北	偏西或偏北	西或偏东	东或偏南	南

2.5 探索性空间数据分析

2.5.1 全局空间自相关

全局空间相关性考察属性值在研究区域范围内空间相关性的整体趋势。常用统计量 Moran's I 。当 Moran's I 为正,表明森林 ESI 在空间上正相关,在空间上趋于聚集;当 Moran's I 为负,表明森林 ESI 在空间上负相关,在空间上趋于分散。当值等于 0,表示森林 ESI 在空间单元之间空间不相关^[26]。莫兰指数的计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y}) (y_j - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

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。

2.5.2 局部空间自相关

局部空间自相关统计量 Local Moran's I 是 Moran's I 的分解。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:

$$I_i = \frac{n^2}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \times \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_j (x_j - \bar{x})^2} \quad (10)$$

式中,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包围(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)。

2.5.3 空间滞后模型与空间误差模型

传统计量分析在研究过程中没有将空间因素纳入到分析模型,从而忽视了空间效应,使模型设定与现实情况存在一定偏差,进而可能导致研究得出的各种结果和推论不够完整、科学,缺乏应有的解释力^[27]。因此本文引入空间滞后模型与空间误差模型对森林 ESI 的扩散效应与回流效应进行探讨与分析。

空间滞后模型(SLM)测度局部地区之间是否存在扩散效应,其模型表达式为:

$$\ln |X_{i,t+k}/X_{i,t}| = \alpha + \beta \ln X_{i,t} + \rho W \ln |X_{i,t+k}/X_{i,t}| + \varepsilon_{i,t} \quad (11)$$

式中, ρ 是向量空间自回归参数; $\varepsilon_{i,t}$ 是随机误差项。

空间误差模型(SEM)测度空间依赖作用是否由于误差扰动项引起,其模型表达式为:

$$\ln |X_{i,t+k}/X_{i,t}| = \alpha + \beta \ln X_{i,t} + (I - \xi W)^{-1} \mu(i, t) \quad (12)$$

式中, $X_{i,t}$ 为第 i 个地区在 t 年的森林 ESI, $X_{i,t+k}$ 为第 i 个地区在 $t+k$ 年的森林 ESI; α, β 为待估的参数; I 是单位矩阵; ξ 是误差项空间自回归参数; W 为空间权重矩阵; $\mu(i, t)$ 为随机误差项。

3 结果与分析

3.1 生态区位系数计算结果分析

文章首先基于公式(8)及表 2 的 8 个指标和江苏省 80 个区县的数据,计算出江苏省各县域的区位系数。本文运用 ArcGIS 软件将江苏省县域生态区位系数采用五分位图展示出来,如图 3 所示。

本文基于自然断裂法将区位系数分为五个等级。从图中可以直观地看出,区位系数最高(30.5310—32.8123)区域主要分布在江苏省南部少数地区,如南京市、宜兴市、无锡市、东台市、昆山市、太仓市等。区位系数次高(29.3620—30.5309)区域主要分布在江苏省中南部,如苏州市、丹江市、盱眙县、宝应县等。区位系数最低(23.0436—28.2045)的区域主要分布在江苏省北部,如响水县、滨海县、涟水县、射阳县等。

从总体来看,江苏省的生态区位系数平均值为 29.27,生态区位较好地区主要分布在江苏省南部,而最高值也出现在苏南地区的高淳县(32.8123)。这些地区自然基础条件较好,适合森林树木生长。而生态区位较差区域则集中在苏北,尤其是江苏省东北部地区,如响水县、滨海县、涟水县、射阳县等,说明这些地区自然条件较不适合森林植被生长。与此同时,江苏省内生态区位较好地区大多集中在苏南经济发达地区,而生态区位较差的地区则一般聚集在苏北地区,这些地方经济相对

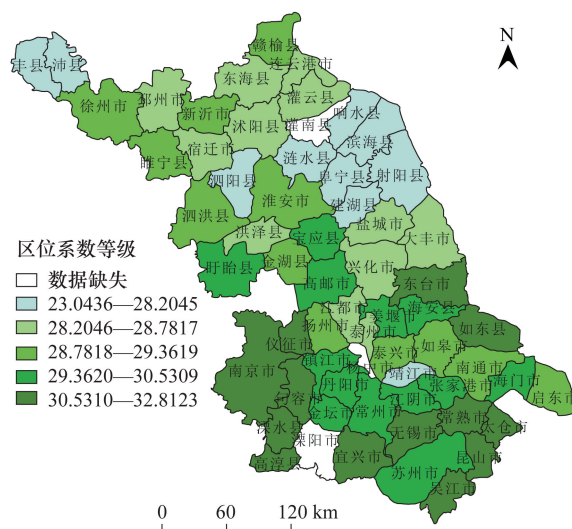


图3 江苏省生态区位系数图

Fig.3 Ecological location coefficient map of Jiangsu

落后,可见生态区位系数与当地经济发展水平具有一定的耦合性。

3.2 森林 ESI 修正指数计算与 ArcGIS 分析

计算出生态区位系数之后,结合模糊物元法与欧式贴近度方法,并利用公式(1)到(7)可计算出 2000—2015 年江苏省森林 ESI 指数的修正值,同时用 ArcGIS 绘制五分位分布图进行展示,如图 4 所示。

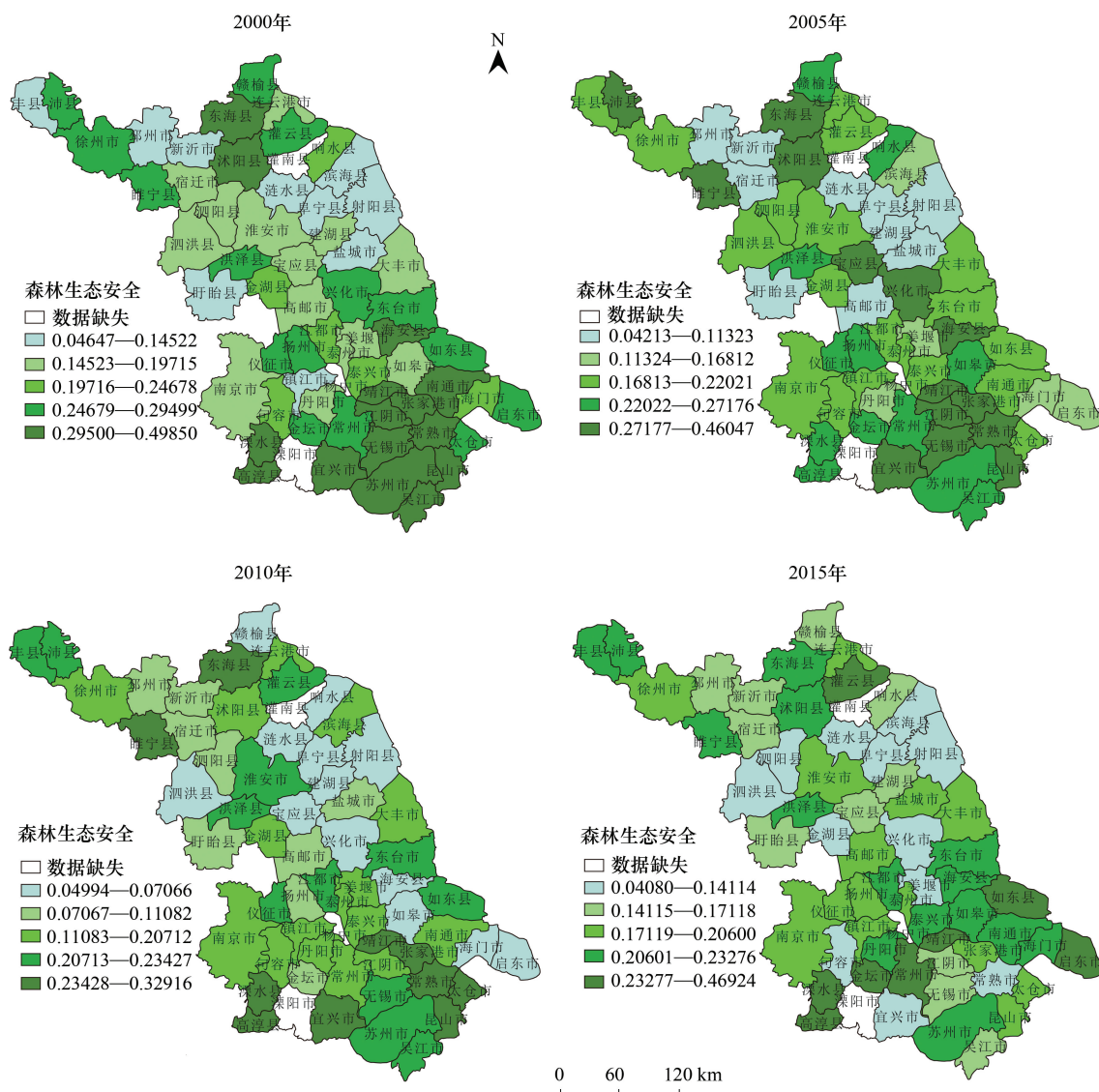


图 4 2000、2005、2010、2015 年江苏省森林 ESI 等级分布

Fig.4 The forest ESI space distribution of Jiangsu from 2000 to 2015

从 2000 年来看,江苏省森林 ESI 指数最高区域集中在苏南地区以及苏北部分地区,如东海县、沭阳县等。ESI 指数次高区域则分布相对均匀。而 ESI 指数最低区域较为集中在江苏省中东部及北部地区个别县市,如滨海县、射阳县、邳州市、新沂市等。

从 2005 年来看,江苏省森林 ESI 指数最高区域较多分布在苏南地区,江苏中部及北部地区也有少部分分布,如沛县、睢宁县、宝应县、江阴市、无锡市等。相较 2000 年来看,ESI 指数最高区域分布更为均衡。ESI 指数次高区域分布较上年更为广泛。而 ESI 指数最低区域则仍集中在苏北及中东部地区。

从 2010 年来看,江苏省南部地区森林 ESI 指数变化不大,只有江阴和无锡退出最高层级,同时新增溧水县和高淳县,苏北及中部地区退步较为明显,沛县、沭阳县、宝应县和兴化市退出该档。森林 ESI 指数最低区

域新增泗洪县、宝应县、兴化县、海安县、启东县、如皋市等地,而苏北的宿迁、新沂、邳州则有所改善。

从 2015 年来看,江苏省森林 ESI 指数最高区域仍集中在苏南地区,全省新增金坛市、常州市、如东县、启东县,而宜兴市、常熟市、太仓市、昆山市、张家港市则退出该档,苏北地区则仅剩灌云县;森林 ESI 指数最低区域则集中在中东部地区,苏南也有部分地区出现 ESI 指数过低的情况,如句容市、宜兴市、常熟市。

从 2000—2015 年江苏省县域森林 ESI 等级变化来看,67.5%的区县都呈现出较明显的下降趋势,仅徐州市泉山区、铜山区、新沂市一直保持上升势头。而苏北很多处于 ESI 最低档县市的状况却得到了改善。究其原因,这与 2003 年“绿色江苏”的建设实施关系密切。自 03 年以来,全省林地面积、森林面积、森林覆盖率和林地利用率明显增加,活立木总蓄积和森林蓄积大幅度增长,江苏省森林绿化建设在“量”上有了突破性进展。但 2010 年以后,苏北地区大部分县市森林 ESI 变化不大,同时苏南地区部分县市森林 ESI 出现急剧下降,如宜兴市、苏州市、常熟市、句容市等。原因是 2010 年以后,虽新增造林不断增加,但受诸多因素影响,全省森林面积净增量有所下降,且由于树种单一造成的森林生态功能降低问题也越来越突出。与此同时,苏南与苏中等经济发达地区不断加大开发建设力度,进一步加大对当地森林生态安全的压力,导致苏南地区许多县市森林 ESI 有所下降。可见,江苏省在森林生态安全建设过程中,不仅要注重大规模植树造林,更要注重“质”的提升,优化树种结构,协调区域生态发展。

3.3 空间相关分析

3.3.1 全局自相关分析

在得出 2000—2015 年江苏省县域森林 ESI 值后,可根据全局自相关公式(9),并运用 GeoDA 软件计算得出森林 ESI 的莫兰指数及检验结果,如表 3 所示。

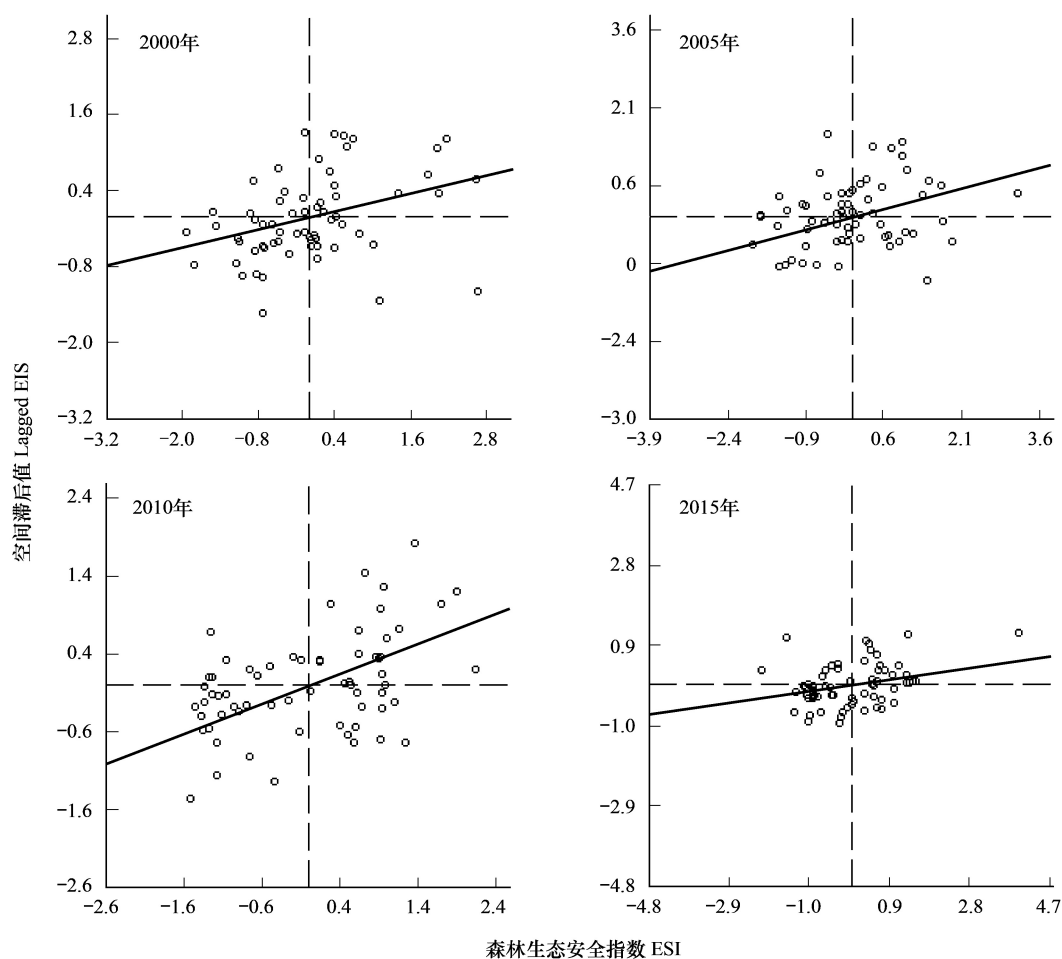
表 3 江苏省县域森林 ESI 指数全局自相关检验
Table 3 Global auto correlation test of forest ESI in Jiangsu

年份 Year	莫兰指数 Moran's <i>I</i>	期望值 Expected value	平均值 Average value	标准误 Standard error	<i>T</i>	<i>P</i>
2000	0.232134	-0.0159	-0.0147	0.0546	2.95	0.001
2005	0.253590	-0.0159	-0.0157	0.0555	3.01	0.001
2010	0.292519	-0.0159	-0.0168	0.0554	4.07	0.001
2015	0.176211	-0.0159	-0.0156	0.0541	2.9	0.001

随机性检验使用 999 permutation; *T*: *T* 显著性检验值, *T* significance test value; *P*: *P* 显著性检验值, *P* significance test value

从检验结果来看,都通过了 $P \leq 0.01$ 的检验,表明全局自相关实验在 99.9% 置信度下显著,说明江苏省县域森林 ESI 存在较为明显的空间相关性。从时间变化看, Moran's *I* 指数在不同阶段呈现出不同的特征。2000—2005 年,空间相关性有较大幅度上升;2005—2010 年,空间相关性则出现大幅上升;2010—2015 年,空间相关性则出现急剧下降。但从总体来看, Moran's *I* 指数还是有一定程度的降低,说明江苏省县域间的森林 ESI 空间聚集状况有所下降。

如图 5 所示,2000—2015 年江苏省全局 Moran's *I* 散点大部分位于一、三象限内,即高一高和低—低类型聚集区占主导地位,表现出较明显的空间依赖性,也就是森林 ESI 较高的区县相互聚集,而较低值的区县也相互聚集。高值区县互相聚集表明各区县能够形成相互促进作用,而低值区县聚集说明各区县会形成一个相互的负面影响,进而陷入一个恒差的恶性循环。2000、2005 年,江苏省位于第一象限与第三象限的县域个数基本相当,而 2010、2015 年,第三象限县域个数明显多于第一象限,说明江苏省县域存在明显的森林生态安全较好和较差的县域,而森林生态状况较差区县的聚集数量明显多于较好区县的数量,并且有逐渐加重的趋势。究其原因,在于 2010 年之后,苏北平原早期发展的杨树林大面积进入采伐期,且杨树木材价格相比农作物明显下降,许多林农对杨树进行采伐之后就不再栽植。由此可见,苏北杨树林面积大幅度减少是造成低—低聚集区增多的最主要原因。

图5 全局 Moran's I 散点图Fig.5 Global Moran's I scatter plot

3.3.2 局部自相关分析

为了更加深入地研究森林 ESI 指数在江苏省各县域之间的空间分布情况,利用公式(10)及 GeoDA 软件可绘制出 2000、2005、2010、2015 年江苏省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,如图 6 所示。

图 6 反映了各区县之间的局部自相关关系,High—High 表示森林 ESI 高值区县被周围高值区县包围,Low—Low 表示低值区县被低值区县包围,Low—High 表示低值区县被高值区县包围,High—Low 表示高值区县被低值区县包围。通过分析 LISA 聚集图可以发现:(1)4 个年份中,森林生态安全指数 High—High 集聚区县一般分布在苏南地区,以苏州、无锡一带为中心。(2)Low—Low 集聚区县则集中在江苏东北部一带,以阜宁县、建湖县为中心;(3)从各年的显著聚类结果来看,2000、2005、2010 和 2015 年 High—High 集聚区县分别有 9 个、8 个、8 个、3 个,Low—Low 集聚区县则变化不大,分别有 8 个、5 个、6 个、5 个,2005 年之后基本稳定在 5 个左右,但分布呈现分散化的趋势。为了更加直观地表示 2015 年江苏省县域森林 ESI 各类聚集情况,本文将各类聚集区域制成表 4。

3.3.3 江苏省县域森林 ESI 空间计量分析

上述探索性空间数据分析(ESDA)仅证明了江苏省各县市之间存在空间相关性,且空间分异特征明显。然而 ESDA 在本质上是“数据驱动”的,单纯依靠 ESDA 在对森林 ESI 进行时空分析时是缺乏理论模型解释力的。因此,文章在 ESDA 的基础上,运用 CSDA(证实性空间数据分析)对江苏省各县市森林 ESI 指数的时空

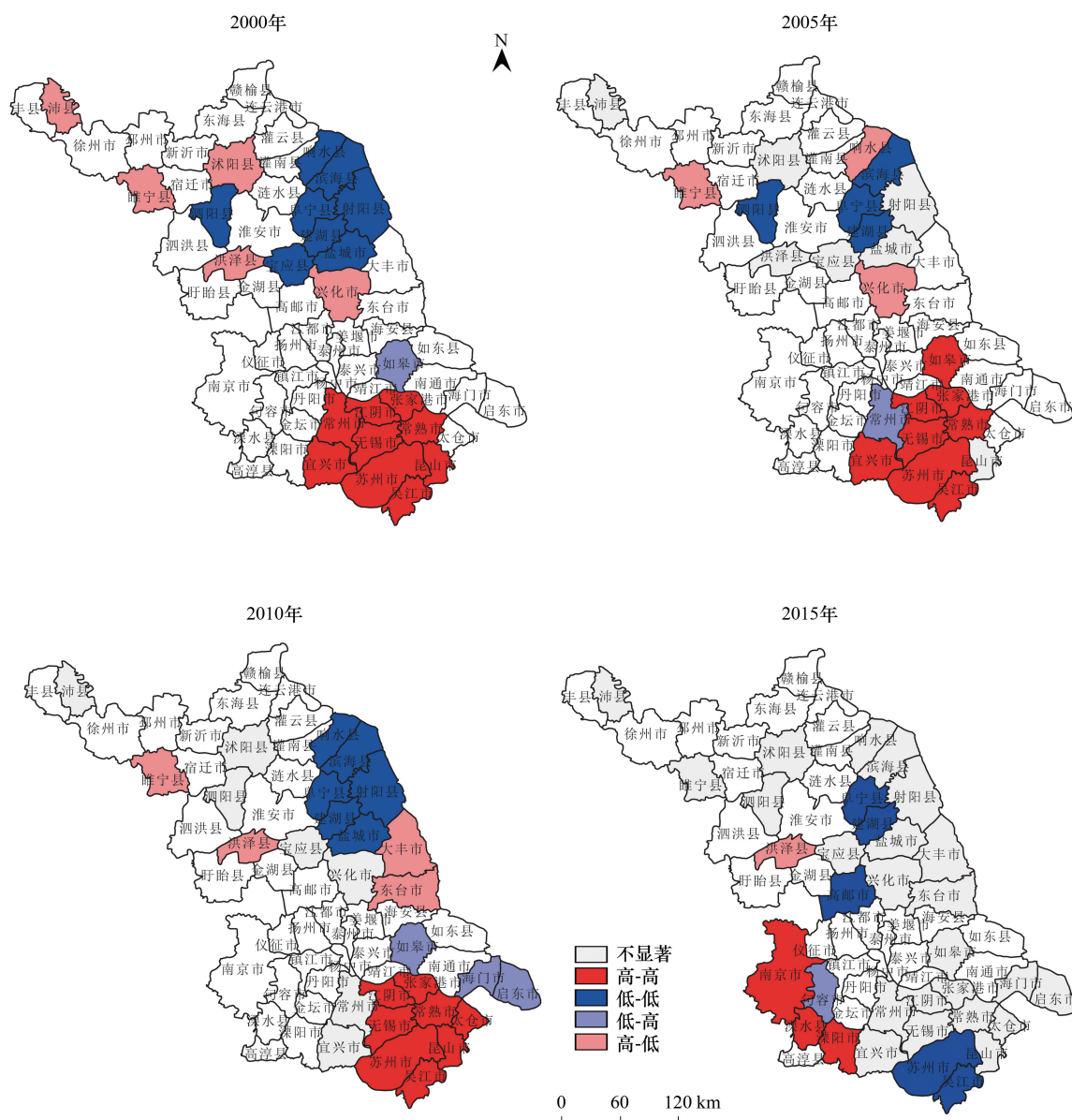


图 6 2000、2005、2010、2015 年 LISA 聚集图

Fig.6 LISA map of 2000、2005、2010、2015

LISA:局部空间关联指数,local indices of spatial association

演进模式进行深入研究,探讨县域之间森林 ESI 指数的空间结构模式。文章将 2005 年、2010 年设为趋势分界点,运用公式(11)、(12)及 Geoda 软件,得出空间滞后模型(SLM)与空间误差模型(SEM)估计结果,如表 5 所示。

在表 5 中,反映模型拟合效果的指标有 LIK、AIC 及 SC 指标,其中 LIK 越大,AIC 和 SC 指标越小,则说明模型的拟合效果越好。通过对比 2000—2005、2005—2010 和 2010—2015 3 个研究时间段 LIK、AIC 及 SC 指标的大小,可以发现空间滞后模型的解释力比空间误差模型更强,即森林 ESI 在江苏省县域之间存在扩散效应。同时,空间滞后模型结果显示,估计值 β 在 3 个研究时期内均为正,表明森林 ESI 在江苏省县域之间也存在回流效应。因此,我们可以得到,森林 ESI 在江苏省县域之间并不只存在单一的某种效应,而是扩散效应与回流效应并存。这也证明了江苏省内各个县市之间的森林生态安全状况并不只与自身的森林生态状况有关,也与临近地区的森林生态安全状况存在密切的关系。

表 4 2015 年森林生态安全指数 LISA 聚集结果

Table 4 LISA results of forest ESI in 2015			
类型 Type	显著个数 Significant number	区县 Districts and counties	占比/% Proportion
High—High	3	南京市、溧水县、高淳县	3.75
Low—Low	5	阜宁县、建湖县、高邮市、苏州市、吴江市	6.25
Low—High	1	句容市	1.25
High—Low	1	洪泽县	1.25

表 5 空间计量模型估计结果

Table 5 The regression results of spatial analysis model						
参数 Parameter	2000—2005		2005—2010		2010—2015	
	空间滞后 Spatial lag	空间误差 Spatial error	空间滞后 Spatial lag	空间误差 Spatial error	空间滞后 Spatial lag	空间误差 Spatial error
α	0.044	0.031	0.018	0.075	0.079	0.147
(P 值)	(0.001)	(0.002)	(0.002)	(0.000)	(0.004)	(0.000)
β	0.714	0.703	0.451	0.442	0.269	0.312
(P 值)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
ξ 或 ρ	0.074	0.051	0.328	0.239	0.375	0.409
(P 值)	(0.005)	(0.006)	(0.002)	(0.003)	(0.005)	(0.003)
LIK	108.818	88.611	90.396	78.326	102.139	82.787
AIC	-215.637	-213.221	-184.793	-172.651	-298.277	-201.573
SC	-225.16	-208.904	-188.316	-168.334	-291.801	-197.256
R^2	0.735	0.733	0.609	0.561	0.639	0.760

LIK:对数似然估计值,Log-Likelihood;AIC:赤池信息准则,Akaike Information Criterion;SC:施瓦茨信息准则,Schwarz Information Criterion; R^2 :拟合优度,goodness of fit

通过 ESDA 和 CSDA 分析发现,江苏省县域森林 ESI 确实具有空间依赖性,因为县域森林生态安全往往受周边地区森林生态状况的影响,但不同区域之间表现差异较大,如图 7 所示。江苏省县域森林 ESI 扩散效应主要存在于苏南与苏北之间,苏南以苏州、无锡一带为中心点对临近地区产生正向扩散效应,但随着时间推移,影响范围逐渐缩小,到 2015 年甚至出现了中心点向西南转移的现象;而苏北则以阜宁县、建湖县为中心点对临近地区动态地产生负向扩散效应,如临近的响水县从 2005 年的高低孤立区变为了 2010 年的低值萧索区。而江苏中南部个别地区受到苏南的正向扩散效应并不明显,反而由于受到回流效应的影响与苏南的差距有所扩大。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文首先运用熵权法、专家法及模糊物元法计算出江苏省县域森林 ESI 指数,然后计算出江苏各区县的生态区位系数,并用来修正森林 ESI 指数。本文还独创性地运用了 ArcGIS 技术、ESDA 和 CSDA 相结合的方法来分析江苏省各区县森林 ESI 指数的空间分布规律,

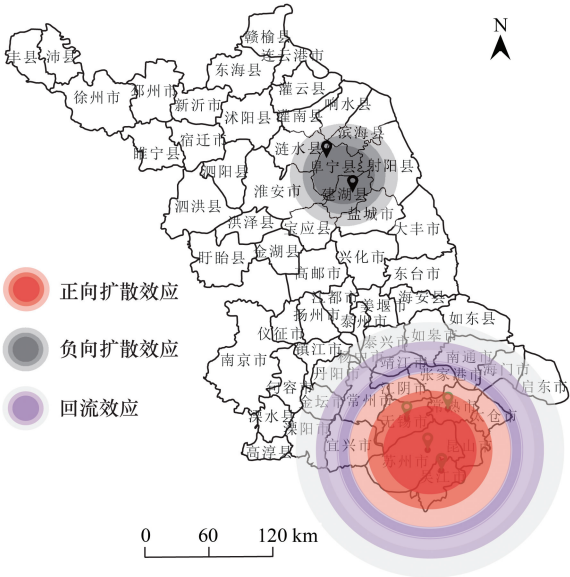


图 7 江苏省森林 ESI 空间效应机制图
Fig.7 The forest ESI spatial effect mechanism of Jiangsu

结论如下:

(1)从 16 个评价指标的权重来看,人口密度的权重最高,其次是单位面积能源消耗量与退耕还林面积占比,而土地沙化强度所占的权重最小。

(2)从生态区位模型来看,江苏省生态区位系数最高的地区主要分布在江苏省南部少数地区,如南京市、宜兴市等;区位系数最低的区域主要分布在江苏省东北部,如响水县、涟水县、丰县等地。

(3)从 ESI 指数的空间分布来看,2000—2015 年森林 ESI 等级最高的区域集中在江苏省南部,而 ESI 等级最差的区域则较为集中在江苏省中部及东北部地区。这些地区一方面区位系数较低,反映了苏北地区的光、水、热等条件较差,不利于森林植被生长,另一方面这些地区大面积种植杨树林,树种单一,森林的生态功能也比较脆弱,故 ESI 指数较低。

(4)从 ESI 指数的时间变化来看,与 2000 年相比,2015 年江苏省 67.5%的区县呈现出比较明显的下降趋势,反映出江苏省较为严峻的森林生态安全发展状况。其中下降幅度最大的是宜兴市,其次是江阴市和苏州市吴中区,这些地区虽然生态区位优势明显,但近年来由于经济发展,人口增长较快,对森林生态系统造成了较大压力。而增长幅度最为迅猛的是新沂市,其次是邳州市,这些地区虽然生态区位不佳,但由于 03 年绿色江苏造林工程实施以后,其森林生态安全状况得到了明显改善。

(5)从空间相关性来看,江苏省各区县森林 ESI 呈现出比较明显的聚集性,但 2000—2015 年空间聚集程度有所下降,且 Low—Low 集聚区多于 High—High 集聚区。森林 ESI 的 High—High 集聚区县一般分布在江苏省南部地区,但 2015 年区域范围大幅度缩小并发生了向西南方向转移的现象;Low—Low 集聚区县则大多集中在江苏东北部一带。

(6)从 SLM 与 SEM 模型来看,森林 ESI 在江苏省县域之间是扩散效应与回流效应并存的。扩散效应主要存在于苏南与苏北之间,苏南以苏州、无锡一带为中心点对临近地区产生正向扩散效应,但随着时间推移,影响范围逐渐缩小;苏北以阜宁县、建湖县为中心点对临近地区产生负向扩散效应。江苏中南部个别地区回流效应发挥主导作用,且不具有收敛性,与苏南的差距有所扩大。

4.2 讨论

从森林 ESI 计算结果来看,苏南地区森林生态安全状况整体上好于苏北地区。但处于生态区位系数最高的苏南地区在 2015 年却出现了 ESI 值过低的区域,说明经济发展、人口压力、能源消耗、废水废气排放等压力因素制约了该区域森林生态系统的发展。而苏北地区虽然生态区位系数不高,但随着造林工程的实施,森林生态安全状况也得到了一定程度的改善,但也有诸如树种单一,森林生态稳定性差等问题亟待解决。因此本文建议该地区相关政府、企业在控制人口、能耗及排污强度的同时,不仅要提高森林植被的“量”,更要加大造林树种的多样化选择,彻底扭转森林结构不合理,珍贵化和彩叶化水平低的不利局面。从空间分析结果来看,江苏省县域森林 ESI 呈现出较明显的南北分异特征,且扩散效应与回流效应并存。因此该地区政府在进行森林生态治理时应注意省内地域平衡,防止南北差异进一步扩大,同时加大对阜宁县、建湖县的治理力度,防止其对周边地区森林 ESI 的负面扩散效应。而对苏州、无锡一带应加大其对周边地区的正向扩散效应,且防止其产生回流效应从而对周边地区产生不利影响。

从森林生态安全的研究方法来看,本文评价指标忽略了一些管理因素的影响,比如自然保护区级别和各地林场等,保护区的级别不同保护效果也会有所差别^[28],此外各类林场对森林的保护在客观上比个体农户的效果要好^[29],因此后续研究将逐渐加入这些指标。其次本文生态区位系数模型仅考虑了气象类指标和地形类指标,但在影响森林植被的影响因素中,还有水文、土壤、环境敏感性^[30]等因素没有考虑进来。水文因素中,汛期、径流量等对流域内的地表水和地下水有较大影响,而这些水源是植物生长的重要因素。土壤能够给森林植物提供大量的养分,其中的有机质、微生物和水分等是植物生长的必要条件。环境敏感性因素中,土壤盐碱化敏感性、水污染敏感性等对森林生态环境都有较大影响。因此,本文今后将在水文指标中引入汛期、结冰期、径流量等指标,在土壤类指标中引入土壤有机质、土壤类型等指标,在环境敏感性指标中引入土壤盐碱

化敏感性、水污染敏感性等指标。最后,本研究后续会引入更多理论方法^[31-33],不同模型^[34-37]与技术^[38-40]之间的横向比较会极大地丰富森林生态安全评价理论。这些问题都是本研究今后努力的方向。

参考文献 (References):

- [1] Ritter E, Dauksta D. Human-forest relationships; ancient values in modern perspectives. *Environment, Development and Sustainability*, 2013, 15 (3): 645-662.
- [2] 顾艳红, 张大红. 省域森林生态安全评价——基于 5 省的经验数据. *生态学报*, 2017, 37(18): 6229-6239.
- [3] Mathews JT. Redefining security. *Foreign Affairs*, 1989, 68(2): 162-177.
- [4] Rogers K S. Ecological Security and Multinational Corporations. Environmental Change and Security Project (ECSP) Report. Washington, DC: Woodrow Wilson Center, 1997: 29-36.
- [5] Helman GB, Ratner SR. Saving failed states. *Foreign Policy*, 1992-1993, 89: 3-20.
- [6] 邹长新, 沈渭寿. 生态安全研究进展. *农村生态环境*, 2003, 19(1): 56-59.
- [7] Moraes R, Landis W G, Molander S. Regional risk assessment of a Brazilian rain forest reserve. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(7): 1779-1803.
- [8] Hayes E H, Landis W G. Regional ecological risk assessment of a near shore marine environment; cherry point, WA. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2004, 10(2): 299-325.
- [9] Costanza R, Norton BG, Haskell BD. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington, DC: Island Press, 1992: 234-246.
- [10] Hunsaker C T, Graham R L, Suter II G W, O'Neill R V, Barnhouse L W, Gardner R H. Assessing ecological risk on a regional scale. *Environmental Management*, 1990, 14(3): 325-332.
- [11] 刘婷婷, 孔越, 吴叶, 祝凌云, 张大红. 基于熵权模糊物元模型的我国省域森林生态安全研究. *生态学报*, 2017, 37(15): 4946-4955.
- [12] 米锋, 谭曾豪迪, 顾艳红, 鲁莎莎, 张大红. 我国森林生态安全评价及其差异化分析. *林业科学*, 2015, 51(7): 107-115.
- [13] 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. *生态学报*, 2013, 33(4): 1326-1336.
- [14] 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. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 515-524.
- [15] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 刘洋. 基于 RS 和 GIS 的济宁市土地利用变化及生态安全研究. *地理科学*, 2012, 32(8): 928-935.
- [16] 杨振蛟, 姜自福, 罗玲云. 海洋生态安全研究综述. *海洋环境科学*, 2011, 30(2): 287-291.
- [17] 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. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, 36(12): 1434-1437.
- [18] 刘心竹, 米锋, 张爽, 苏立娟, 顾艳红, 张大红. 基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价. *生态学报*, 2014, 34(11): 3115-3127.
- [19] 张智光. 林业生态安全的共生耦合测度模型与判据. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(8): 90-99.
- [20] 汤旭, 冯彦, 王慧, 张大红. 湖南省县域森林生态安全评价与时空分析. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41: 1-22.
- [21] 韩智霞, 张江山. 基于熵权的模糊物元法对福建省大气环境质量的综合评价. *安全与环境工程*, 2009, 16(5): 30-33.
- [22] 蔡文. *物元模型及其应用*. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [23] 张斌, 雍歧东, 肖芳淳. *模糊物元分析*. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [24] 赵海风, 刘川源, 鲁莎莎, 张大红. 基于区位模型的四川森林生态服务价值核算研究. *河南农业大学学报*, 2015, 49(6): 831-837.
- [25] 李婧, 谭清美, 白俊红. 中国区域创新生产的空间计量分析——基于静态与动态空间面板模型的实证研究. *管理世界*, 2010, (7): 43-55, 65-65.
- [26] 何键芳, 张虹鸥, 叶玉瑶, 吴旗韬. 广东省区域创新产出的空间相关性研究. *经济地理*, 2013, 33(2): 117-121.
- [27] 张贵, 李涛. 京津冀省域创新效率差异演化与空间计量分析. *地域研究与开发*, 2017, 36(4): 13-18.
- [28] 薛达元, 蒋明康, 王献溥. 我国自然保护区级别划分标准的研究. *生态与农村环境学报*, 1993, 9(2): 1-4, 66-66.
- [29] 高守荣, 洪林. 深化国有林场改革推进林场经济发展——贵州省毕节市国有林场改革发展的经验与成效. *林业经济*, 2014, 36(11): 6-9.
- [30] 李英, 齐丹坤. 基于生态区位测度的伊春林区森林生态服务功能价值评估. *林业科学*, 2013, 49(8): 140-147.
- [31] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484.
- [32] 陈磊, 田双清, 张宽, 陈文宽. 基于耗散结构理论的四川省耕地生态安全测度分析. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 307-313.
- [33] 郭跃, 程晓昀, 朱芳, 姜瑞华. 基于生态足迹的江苏省生态安全动态研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(11): 1327-1332.
- [34] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(6): 971-981.
- [35] 周彬, 钟林生, 陈田, 周睿. 基于变权模型的舟山群岛生态安全预警. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1854-1862.
- [36] 任继勤, 夏景阳, 殷悦. 基于改进的 BP 神经网络和马尔科夫模型的一次能源消费预测——以北京市为例. *生态经济*, 2017, 33(11): 28-33.
- [37] 张家其, 吴宜进, 葛咏, 王程昊, Kung H. 基于灰色关联模型的贫困地区生态安全综合评价——以恩施贫困地区为例. *地理研究*, 2014, 33(8): 1457-1466.
- [38] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 曹光兰, 王凡凡. 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*, 2014, 34(6): 1379-1390.
- [39] 王耕, 王嘉丽, 龚丽妍, 苏柏灵, 刘秋波. 基于 GIS-Markov 区域生态安全时空演变研究——以大连市甘井子区为例. *地理科学*, 2013, 33(8): 957-964.
- [40] 欧定华, 夏建国, 欧晓芳. 基于 GIS 和 RBF 的城郊区生态安全评价及变化趋势预测——以成都市龙泉驿区为例. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(1): 49-58.