DOI: 10.20103/j.stxb.202203310811

危小建,辛思怡,张颖艺,龙英豪,张茜.不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例.生态学报,2023,43(18):7585-7597.

Wei X J, Xin S Y, Zhang Y Y, Long Y H, Zhang X.Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: Taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18):7585-7597.

不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响 因素差异

——以大南昌都市圈为例

危小建1,2,辛思怡1,*,张颖艺1,龙英豪1,张 茜

- 1 东华理工大学测绘工程学院, 南昌 330013
- 2 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013

摘要:在江西省持续推进生态文明建设的背景下,生态系统服务价值(ESV)空间分异及其影响因素的探析对生态环境保护与改善、促进区域性可持续发展等方面具有重要意义。以大南昌都市圈为例,利用当量因子法、空间自相关分析等方法,分析 1 km× 1 km、3 km×3 km、5 km×5 km 及 10 km×10 km 各个格网尺度下地均生态系统服务价值的空间分布特征,并利用地理探测器和空间回归模型,研究不同尺度下 ESV 空间异质性的影响因素及其尺度差异性。研究结果表明:(1) ESV 分布总体呈现西北部高,东南部低的特点,且各种格网尺度下均存在显著空间正相关性和空间集聚效应,但随着格网尺度增大其集聚效应减弱。(2) ESV空间异质性受自然、社会的协同作用,其中,人为影响指数的贡献最大,且任意双因子都比单一因子对 ESV 空间异质性的解释力高,但随着格网尺度增大,各因子及因子间的耦合协调作用对 ESV 的解释力都呈下降趋势。(3) 随着格网尺度的增大,空间回归模型的拟合度下降,且不同格网尺度下影响 ESV 空间异质性的影响因素的作用强度不同,作用方向也有发生变化。

关键词:多尺度;生态系统服务价值;影响因素;空间回归;地理探测器;大南昌都市圈

Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: Taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example

WEI Xiaojian^{1,2}, XIN Siyi^{1,*}, ZHANG Yingyi¹, LONG Yinghao¹, ZHANG Xi¹

- 1 School of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China
- 2 Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake, Ministry of Natural Resources, Nanchang 330013, China

Abstract: Under the background of continuously promoting the construction of ecological civilization in Jiangxi Province, analysis of the spatial differentiation of ecosystem service value (ESV) and its influencing factors is of great significance to the protection of ecological environment and the promotion of regional sustainable development. Taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example, this paper uses the equivalent factor method and spatial autocorrelation analysis to analyze the spatial distribution characteristics of the average ESV at various grid scales of 1 km ×1 km, 3 km×3 km, 5 km×5 km and 10 km × 10 km. The influencing factors and scale differences of spatial heterogeneity of ESV at different scales are studied by using geographic detector and spatial regression model. This paper aims to reveal the role of various influencing factors in the Nanchang Urban Agglomeration on the spatial heterogeneity of ESV, and provides scientific basis for improving the quality of ecological environment and promoting green development. The results show that: (1) At different grid scales, the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168010)

收稿日期:2022-03-31; 网络出版日期:2023-05-11

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xsy15797207396@163.com

spatial distribution of the average ESV is relatively consistent, which is generally higher in the west and north, and lower in the east and south. There is significantly spatially positive correlation and spatial agglomeration effect at various grid scales, but the agglomeration effect decreases with the increase of grid scale. (2) The results of geographical detectors show that the spatial heterogeneity of ESV in the Nanchang Urban Agglomeration is affected by the synergy of natural environment and economic and social development. The degree of influence of different factors on ESV is significant. At different grid scales, the contribution of HAI is the largest, which is the leading factor affecting the spatial heterogeneity of the Greater Nanchang Metropolitan Area. The reason is that the increase of human activities, such as urban expansion and farmland reclamation, has led to changes in the structure of land use. This affects the spatial distribution of ESV. Moreover, any two factors have higher explanatory power for spatial heterogeneity of ESV than a single factor. However, with the increase of grid scale, the explanatory power of each factor and the coupling and coordination between factors for ESV decreases. (3) With the increase of grid scale, the fitting degree of spatial regression model decreases, and the action intensity and direction of the influencing factors affecting the spatial heterogeneity of ESV are different at different grid scales. At different grid scales, HAI has the strongest explanatory power to ESV, and has obviously negative effects, indicating that human activities have strong inhibition to ESV.

Key Words: multiscale; ecosystem service value; influencing factor; spatial regression analysis; Geo-Detector; the Nanchang Urban Agglomeration

生态系统服务是指人类能够从生态系统获取的所有价值,包括可以保障其赖以生存和发展的环境资源及其他效用^[1-3]。随着经济社会发展、城市化水平提升、民众生活水平提升等带动生态系统服务消费增长^[4-5],生态系统承受着巨大的压力^[6]。为提高生态系统服务消费供给水平与经济社会发展的协调水平,急需对现有的生态系统进行合理调整^[7-8]。在此背景下,大量学者开始关注生态系统服务价值的研究^[9-11],并进一步分析和探讨其演变趋势及影响因素^[12]。

美国学者 Daily 等[1]于 1997 年全面系统地介绍了生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)的定 义后,受到了国际学界的普遍重视,引发了研究 ESV 的兴趣浪潮[13-14]。目前,ESV 的核算方法一般包括二大 类:一是由 Costanza 等[15] 建议的当量因子法,该方式核算具有规范性,结果具有横向水平一致性,但不能完全 反映某地区内的具体生态特点,较适用于评价地区及世界范围的 ESV[16-19];二是功能价值法,该方法能够专 门核算某种土地利用类型的生态价值,并应用于国内各大科学研究领域[20-21]。谢高地等[22-23]于 2015 年研 究中国生态系统及经济社会发展现状,并在 Costanza 等[15] 观点的基础上,对当量因子法加以修正和完善,为 我国学者进一步深入研究 ESV 提供了借鉴[24-25]。现如今,国内学者主要以行政区划或格网为基本单元,以 当量因子法、空间自相关模型、地理探测器模型[26-28]为研究方法,测算研究区域的 ESV、分析 ESV 的时空演 变及探讨其空间异质性的影响因素。例如黄木易等^[29]以 3 km×3 km 为基本单元、张鹏岩等^[30]以 1 km×1 km 的格网为基本单元,核算了研究区域的 ESV,并利用地理探测器分析影响 ESV 空间异质性的影响因素:赵育 恒等[12]以城市为单元估算 2005—2015 年武汉城市圈的 ESV,并采用空间回归模型探究其影响因素。在研究 ESV 的影响因素过程中,空间尺度非常重要,在不同尺度中生态系统格局呈现不同特征。尺度较大时,结果不 够精确,容易忽略单元内各因素的影响;尺度较小时,所得结果难以推广至大范围生态调节应用之中。因此, 选择合适的尺度有利于对 ESV 进行研究。黄木易等[31]以多尺度格网、乡镇行政区划和子流域为基本单元, 分析不同尺度下 ESV 的空间分布及其异质性,并利用地理探测器探究其影响因素。相关研究已取得较为显 著的成果,但仍存在一定不足,有关 ESV 影响因素的探究中大多以单一尺度为主,没有关注到在不同格网尺 度下同一地区的 ESV 影响因素可能存在差异。此外,同时利用地理探测器和空间回归模型进行影响因素对 ESV 的正负影响及两两因子间的交互作用力的研究的相关文章并不多见。

本文选取大南昌都市圈为研究区域,利用 2020 年土地覆盖数据,采用 ArcGIS 的 Fishnet 工具得到

1 km×1 km、3 km×3 km、5 km×5 km及 10 km×10 km等多种空间尺度格网,结合 ArcGIS 和 GeoDa 软件,采用当量因子法、空间自相关分析等方法,分析地均 ESV 的空间分布特征,进而运用空间回归分析和地理探测器两种模型,研究 ESV 空间异质性的主导因子和各因子交互作用强度,及其不同尺度下影响因子的差异性。本文旨在揭示大南昌都市圈内各影响因素对生态系统服务价值空间异质性的作用,为改善生态环境质量、促进绿色发展提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

大南昌都市圈(图 1)地处中国江西省北部,区域涵盖了南昌市、九江市、抚州市(临川区、东乡区)、宜春市(丰城市、樟树市、高安市、靖安县、奉新县)、上饶市(鄱阳县、余干县、万年县),以及国家级新区赣江新区等25个县市,国土面积4.50万km²。由于位于我国城镇化的战略布局长江横轴线与京九地区发展轴线的交汇处,大南昌都市圈在我国地区发展布局中,有着沟通南北、承东启西的关键战略地位。同时,该区域北临长江,西依幕阜山和九岭山,东含鄱阳湖和庐山,包括了山区、丘陵、平原和河湖等各类山势地貌,西边为山地、中部为山丘,东边则为平原和湖泊。其中,鄱阳湖作为中国面积最大的淡水湖,它承载了调控径流、净化水体、调控气候等多重生态功能,有着大量的鱼类、鸟类等生物资源,在维护地球生物多样性上有着难以取代的作用。该区域内绿色生态显著,是推动中国国家生态文明实验区(江西)建设的重点地区。

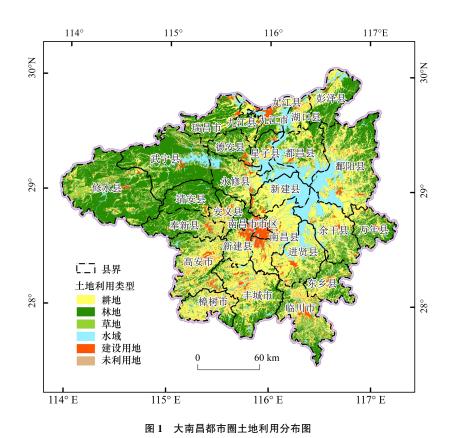


Fig.1 Land type distribution map in the Nanchang Urban Agglomeration

1.2 数据来源与处理

本文使用了谷歌地球引擎上 2020 年的 Landsat 影像结合 CLUD 提取的稳定样本制作的土地利用数据^[32],空间分辨率为 30 m,数据来源于 https://zenodo.org/record/5210928。根据中科院"LUCC 遥感监测数据分类体系",综合考虑大南昌都市圈的土地资源特征,将研究区域的 LUCC 数据分为耕地、林地、草地、水域、建

设用地和未利用地6类。粮食产量数据来源于2020年的《江西统计年鉴》和《中国统计年鉴》,粮食价格根据2020年《中国农产品价格调查年鉴》获得。

本文选用的影响 ESV 空间异质性的指标包括:高程、归一化植被指数(NDVI)、气温、降水、地均 GDP、人口密度,数据来源如表 1 所示;坡度利用高程数据在 AreGIS 中计算所得;城镇用地,从 LUCC 数据提取;人为影响指数(HAI)利用公式计算获得。运用 AreGIS 的自然间断点分级法对各因子进行离散化处理。

		Table 1	Data sources and	descriptions	
数据名称 Data name	数据类型 Data type	时间 Time period	分辨率 Resolution	数据来源 Data source	网址 Website
高程 Elevation	格网	2020	30 m×30 m	美国对地观测全球高程数据	https://earthdata. nasa. gov/ esds/competitive-programs/ measures/nasadem
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	格网	2019	1000 m×1000 m	中国科学院地理科学与资源 研究所资源环境数据云平台	https://www.resdc.cn/
气温 Temperature	格网	2020	1000 m×1000 m	国家地球系统科学数据中心 1901—2020年中国 1km 分辨 率逐月平均气温数据集	http://www.geodata.cn/
降水 Rainfall	格网	2020	1000 m×1000 m	国家地球系统科学数据中心 1901—2020年中国 1km 分辨 率逐月降水量数据集	http://www.geodata.cn/
地均 GDP Average GDP	格网	2015	1000 m×1000 m	中国科学院地理科学与资源 研究所资源环境数据云平台	https://www.resdc.cn/
人口密度 Population density	格网	2020	1000 m×1000 m	国家地球系统科学数据中心 中国 1km 格网人口数据集	http://www.geodata.cn/

表 1 数据来源与说明

在查阅相关文献^[31,33—34]后发现,采用格网尺度做此类研究选用的最小尺度为 1 km×1 km 的格网。此外,人口密度和 GDP 等影响因素的分辨率为 1 km,考虑到数据处理的易操作性以及结果差异性,决定研究的尺度选取 1 km×1 km、3 km×5 km×5 km 及 10 km×10 km 格网。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值测算

以"中国生态系统单位面积生态服务价值当量"[35]为基础计算大南昌都市圈生态系统服务价值,按单位面积耕地生态系统服务价值相当于平均粮食作物单产市场经济价值的七分之一计算,通过查阅《江西统计年鉴》、《中国统计年鉴》、和《国家统计局关于 2020 年粮食产量的公告》等资料,经测算后确定大南昌都市圈粮食作物单位面积产量为 5798.6 kg/hm²。该地区主要农产品为水稻、大豆和油菜籽,选取 2020 年水稻、大豆、油菜籽单价的平均值作为实际计算的粮食单价,通过查阅《中国农产品价格调查年鉴》,计算得出大南昌都市圈粮食单价为 4.77 元/kg,参照前人研究[15,35—37],将建设用地的价值系数假定为 0,进而确定大南昌都市圈的单位面积生态系统服务价值系数(表 2)。

根据公式(1)测算研究区内生态系统服务价值总量。

$$ESV = \sum_{i=1}^{n} (U_i \times VC_i)$$
 (1)

式中,ESV 为生态系统服务价值,元; U_i 为第i 种生态系统类型面积, hm^2 ; VC_i 为第i 种生态系统服务价值系数,元/ hm^2 。

表 2 大南昌都市圈生态系统服务价值系数表

Table 2 Factor of ecosystem services value in the Nanchang Urban Agglomeration

生态系统类型	生态系统服务价值 Land use type						
Ecosystem type	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
	Farmland	Woodland	Grassland	Water	Built-up land	Unused land	
食物生产 Aliment production	3680.807	1214.666	1582.747	1950.828	0.000	828.182	
原材料 Raw material	1435.515	10968.805	1325.091	1288.282	0.000	736.161	
气体调节 Gas regulation	2650.181	15901.086	5521.211	1877.212	0.000	2871.029	
气候调节 Climate regulation	3570.383	14980.884	5742.059	7582.462	0.000	3110.282	
水文调节 Hydrological regulation	2834.222	15054.501	5594.827	69088.747	0.000	2926.242	
废物处理 Waste disposition	5116.322	6330.988	4858.665	54659.984	0.000	2907.838	
保持土壤 Soil conservation	5410.787	14796.844	8245.008	1509.131	0.000	4435.372	
生物多样性 Biodiversity	3754.423	16600.440	6883.109	12625.168	0.000	4177.716	
美学景观 Esthetical scenery	625.737	7656.079	3202.302	16342.783	0.000	2042.848	
合计 Total	29078.376	103504.293	42955.018	166924.597	0.000	24035.670	

利用敏感性指数[38]解析生态系统服务价值相对生态系统价值系数的依赖性程度(式2)

$$CS = \left| \frac{(ESV_{h2} - ESV_{h1}) / ESV_{h1}}{(VC_{h2} - VC_{h1}) / VC_{h1}} \right|$$
(2)

式中,CS 为敏感性指数; h_1 , h_2 分别表示初始值和当量系数调整后的值。

2.2 生态系统服务价值的人为影响指数

人为影响指数(HAI)反映人类的社会活动对生态系统及自然景观结构变迁的影响程度^[39],利用 HAI 指数能够反映大南昌都市圈的 ESV 与人类行为影响间的相互关系,其公式如下:

$$HAI = \sum_{i=1}^{n} (A_i P_i / TA)$$
(3)

式中,HAI 为人为影响指数; A_i 为第 i 种土地利用类型的总面积; P_i 为第 i 种土地利用类型所反映的人为影响强度参数;TA 为研究区总面积。根据前人研究成果^[6],并综合大南昌都市圈土地利用现状特征,运用 Delphi 法确定各土地利用类型的 P_i 赋值:耕地(0.67)、林地(0.13)、草地(0.12)、水域(0.1)、建设用地(0.96)、未利用地(0.05)。

2.3 探索性空间数据分析

2.3.1 全局空间自相关分析

选用全局 Moran's I 统计量[33] 对不同尺度下的地均 ESV 进行全局空间自相关检验,公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{s^2 (\sum_{i} \sum_{j} w_{ij})}$$
(4)

式中,n 为网格单元总数; $x_i(x_j)$ 为网格单元 i(j) 的测度值; $(x_i - \bar{x})$ 为第 i 个网格单元上测度值与平均值的偏差; w_{ij} 为标准化的空间权重矩阵; s^2 为方差,下同。

2.3.2 局部空间自相关分析

通过局部空间自相关,可分析大南昌都市圈内任一区域与其相邻区域对该属性值的集聚趋势空间异质性^[37,40],常见方法有 Gi 统计量、空间关联局部指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)、Moran 散点图^[41,42]等。本文利用 LISA 集聚图对不同尺度下的地均 ESV 进行局部空间自相关检测,公式如下:

$$I_{i} = \frac{(x_{i} - \bar{x}) \sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_{i} - \bar{x})}{S^{2}}$$
 (5)

$$S^{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \bar{x})^{2}$$
 (6)

2.4 地理探测器

地理探测器(Geo-Detector)是通过其表现处理的空间分异性来探测各因子对因变量的驱动力,包括四个探测器^[26,27],本研究通过因子探测器和交互探测器判断影响大南昌都市圈 ESV 空间异质性的主导因子及其交互作用,以及在不同尺度下各因子影响程度差异,公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2$$
 (7)

式中,q 为某因子对 ESV 空间异质性的影响力,取值为[0,1];h 为变量 Y 或因子 F 的分层;N 和 N_h 分别为全区和 h 区单元数; σ^2 和 σ_h^2 分别为全区和 h 区 Y 值的方差。

2.5 空间回归模型

地理探测器仅仅研究因子对 ESV 的影响程度,而无法确定其正负相互影响,为了更全面的研究各种因素对 ESV 的驱动影响,揭示各因子和 ESV 之间的正负相关性,构建了空间回归模型[12,43],其基本形式如下:

$$\gamma = \lambda W_1 \gamma + X \beta_1 + W_2 X \beta_2 + u \tag{8}$$

$$u = \rho W_3 u + \theta W_4 \varepsilon + \varepsilon \tag{9}$$

式中, W_1 , W_2 , W_3 , W_4 ($W_{i(i=1,2,3\cdots)}$)分别代表被解释变量(y,一个n维向量)、解释变量(X)、误差项(u)与随机扰动项(ε)的空间权重矩阵; λ , β , ρ , θ 则表示空间回归系数。

通过逐步线性回归来剔除共线性的变量,然后构建 Queen 邻接的空间权重矩阵,利用空间计量回归的方法进一步研究 ESV 与各因素之间的内在驱动关系。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值的空间变化

3.1.1 生态系统服务价值的空间布局

由图 2 可以看出,在不同格网尺度下,地均 ESV 的空间分布较为一致,总体呈现为西部和北部较高、东部和南部较低的特点。高价值区主要集聚于鄱阳湖水域及其周围的湿地;较高价值区主要位于西部的幕阜山和九岭山等林地;中等价值区散乱分布于林地内部;低价值区和较低价值区则主要分布于各县市城区、乡村居民点用地和耕地。

通过敏感性分析发现研究区内各地类 ESV 的 CS 值均低于 1,表明大南昌都市圈 ESV 相对于价值系数而言是比较稳定的,因此本文所用的价值系数适用于大南昌都市圈。

3.1.2 生态系统服务价值的空间自相关分析

由表 3 可知,不同格网尺度下地均 ESV 分布均呈现显著的空间集聚效应和空间正相关性,即地均 ESV 低值区与高值区都趋于邻近。随着格网尺度的增大,Moran's I 值也呈现了逐步降低的特点,表明研究区内地均 ESV 高值和低值的集聚效应随着格网尺度的增大在逐步降低。格网尺度较小时,大多数格网中地类结构相似,其地均 ESV 相近,集聚效应明显,随着格网尺度的增大,各格网中的地类结构将发生不同的变化,其地均 ESV 也趋于不同,集聚效应减弱。因此,生态服务价值空间差异对评价单元尺度的变化具有一定的敏感性。

由图 3 可以发现,在不同格网尺度下,地均 ESV 的空间集聚分布都比较一致,高-高集聚区都主要分布于鄱阳湖水域以及武宁县、修水县、奉新县、靖安县之间的山区,因为此区域内包含大量的生态资源,是大南昌都市圈 ESV 的重点来源区域;高-低和低-高集聚区分布相对较少且散乱,且大多处在高-高和低-低集聚地附近;低-低集聚区则大多散布于研究区的中部及南部,该区域多为建设用地及耕地,地均 ESV 均较低。

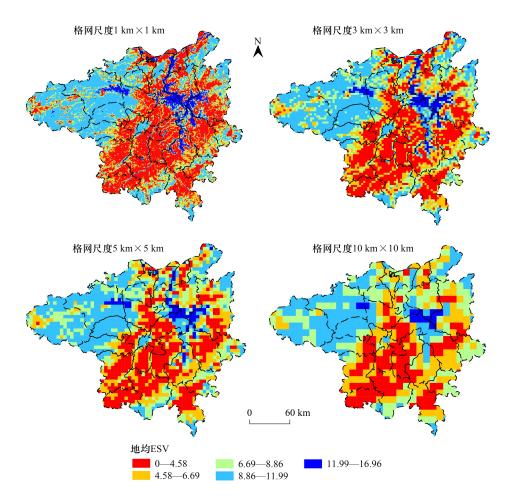


图 2 不同格网尺度下地均 ESV 的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ESV per hectare at various grid scales

表 3 不同格网尺度下地均 ESV 全局 Moran's I 统计量

Table 3 Global Moran's I statistics of ESV per hectare at various grid scales

格网尺度 Grid scale	Moran's I	E(I)	Z(I)	P
1 km 格网 1 km grid	0.769	0.000	330.793	0.000
3 km 格网 3 km grid	0.676	0.000	98.040	0.000
5 km 格网 5 km grid	0.605	0.000	53.165	0.000
10 km 格网 10 km grid	0.500	-0.002	22.513	0.000

E(I) 为理论期望;Z(I) 为标准差;P 为概率,即所观测到的空间模式是由某一随机过程创建而成的概率

3.2 生态系统服务价值空间分异的地理探测分析

3.2.1 因子探测

从表 4 可以看出,大南昌都市圈 ESV 空间异质性受到自然因素与社会经济因素的共同作用,且不同格网尺度下,各因子对 ESV 的影响程度差异较大。通过 q 统计量发现,HAI 的贡献力最强,其中在 1 km 格网的贡献力达到了 89.2%,表明人类活动对生态环境造成了极大的干扰,在 3 km、5 km、10 km 格网下 HAI 的 q 统计量逐步减小,这也表明格网尺度越小所反映的空间分异特性就越强;1 km 格网的坡度贡献力为 39%,说明地形起伏情况对 ESV 的空间分异也有着极大的影响,且坡度的 q 统计值也是随着格网的增大而逐步减小;NDVI的贡献力在 3 km 格网中最高为 30.4%,表明其在 3 km 格网中空间结构异质性最大,该因子对研究区 ESV 空间异质性的影响很强;高程和气温在各格网尺度的贡献力为 12.8%—30.2%,对研究区 ESV 空间异质性的影

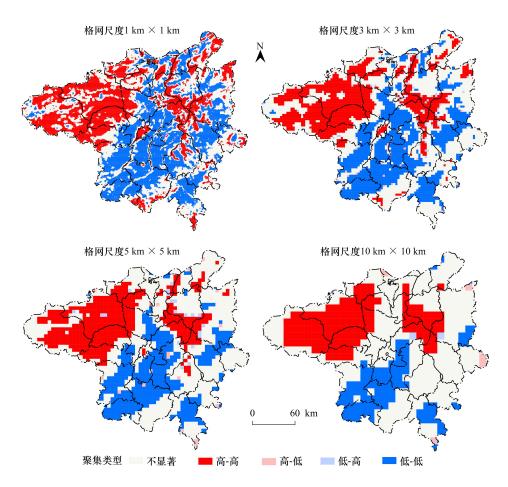


图 3 不同格网尺度下地均 ESV 的 LISA 集聚图

Fig.3 LISA cluster diagram of ESV per hectare at various grid scales

响较强,这两种因子在 1 km 和 3 km 格网中的 q 统计量都较大, 5 km 和 10 km 中则相对较小;人口密度在 5 km 格网中贡献度最大为 17.5%, 10 km 格网次之;地均 GDP、降水和距城市距离的各尺度贡献力均在 10.0% 及以下,对研究区 ESV 空间异质性的影响不大。

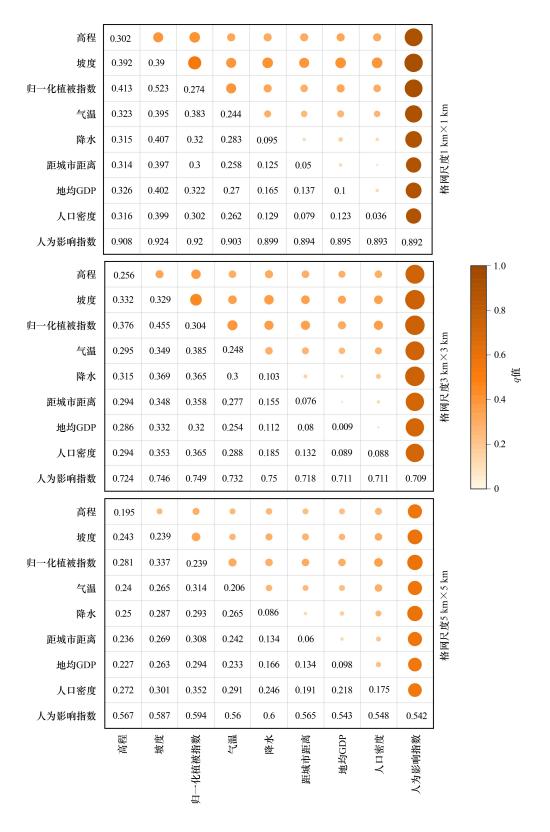
表 4 不同格网尺度下 ESV 空间分异的因子探测

Table 4 Factor detection of ESV spatial differentiation at various grid scales

影响因素 Influencing factor	1 km 格网 1 km grid		3 km 格网	3 km 格网 3 km grid		5 km 格网 5 km grid		10 km 格网 10 km grid	
	q 统计量 q statistic	P	q 统计量 q statistic	P	q 统计量 q statistic	P	q 统计量 q statistic	P	
高程 Elevation	0.302	0.000	0.256	0.000	0.195	0.000	0.128	0.000	
坡度 Slope degree	0.390	0.000	0.329	0.000	0.239	0.000	0.167	0.000	
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.274	0.000	0.304	0.000	0.239	0.000	0.172	0.000	
气温 Temperature	0.244	0.000	0.248	0.000	0.206	0.000	0.153	0.000	
降水 Rainfall	0.095	0.000	0.103	0.000	0.086	0.000	0.076	0.000	
距城市距离 Distance to city	0.050	0.000	0.076	0.000	0.060	0.000	0.022	0.064	
地均 GDP Average GDP	0.100	0.000	0.009	0.000	0.098	0.000	0.086	0.000	
人口密度 Population density	0.036	0.000	0.088	0.000	0.175	0.000	0.130	0.000	
人为影响指数 Human active index	0.892	0.000	0.709	0.000	0.542	0.000	0.289	0.000	

3.2.2 因子交互探测

由图 4 可知,因子交互作用对 ESV 的影响大于单一因子的影响。在 1 km 格网中,HAI 和坡度之间的交互作用对研究区域 ESV 的空间异质性影响最大,q 值为 0.924。在 3 km、5 km 和 10 km 格网,HAI 和降水之间的交互作用对研究区域 ESV 的空间异质性影响最大,q 值依次为 0.750、0.600 和 0.365。双因子对 ESV 空间异质性的解释力超过 50%的,在 1 km 格网中有: HAI ∩ NDVI (0.920)、HAI ∩ 高程 (0.908)、HAI ∩ 气温



http://www.ecologica.cn

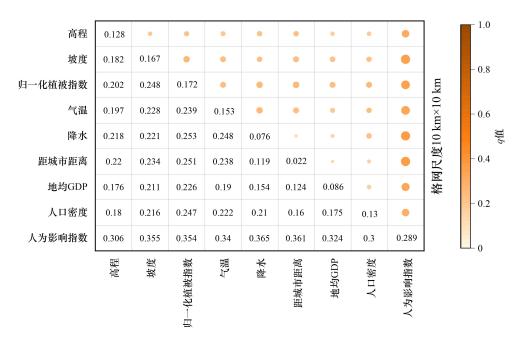


图 4 不同格网尺度下 ESV 空间分异的因子交互探测

Fig.4 Factor interaction detection of ESV spatial differentiation at various grid scales

(0.903)、HAI∩降水(0.899)、HAI∩地均 GDP(0.895)、HAI∩距城市距离(0.894)、HAI∩人口密度(0.893);在 3 km 和 5 km 格网中,HAI 和其他因素之间的相互作用对 ESV 的空间异质性也有超过 50%的解释力。其余双因子在各尺度上的交互作用对 ESV 的空间异质性的解释力不足 50%,但其交互作用强于单一因子。

3.3 生态系统服务价值的空间回归分析

利用 SPSS 软件对不同格网尺度 ESV 与各影响因素分别进行逐步线性回归,选取与研究区 ESV 拟合最好的模型构建线性回归方程。根据表 5 可知,1 km 格网回归结果最好,格网尺度越大,模型拟合结果越差,且不同格网尺度下影响 ESV 空间异质性的影响因素的作用强度不同,作用方向也可能发生变化。具体来看,在各个格网尺度下对 ESV 解释力最强的均为 HAI,呈现显著负作用;在 1 km 格网中高程、气温、降水、距城市距离、地均 GDP、人口密度对研究区 ESV 呈正向作用,坡度、NDVI 与研究区 ESV 呈负向作用;5 km 格网中的人

表 5 不同格网尺度下 ESV 逐步线性回归结果

Table 5 Stepwise linear regression analysis of ESV at various grid scales

变量	OLS 经典最小二乘 Ordinary least square						
Variable	1 km 格网 1 km grid	3 km 格网 3 km grid	5 km 格网 5 km grid	10 km 格网 10 km grid			
常数项 Constant term	5.843 ***	5.742 ***	5.811 ***	5.156 ***			
高程 Elevation	0.01 ***						
坡度 Slope degree	-0.104 ***	-0.084 ***	-0.138 ***				
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	-0.13 ***	-0.141 ***	-0.131***				
气温 Temperature	0.013 ***	0.031 **		0.185 ***			
降水 Rainfall	0.016 ***			-0.092 **			
距城市距离 Distance to city	0.006 ***	-0.018 **	-0.062 ***	-0.227 ***			
地均 GDP Average GDP	0.01 ***			-0.133 ***			
人口密度 Population density	0.04 ***	0.017 **	-0.058 ***				
人为影响指数 Human active index	-1.072 ***	-0.998 ***	-0.894 ***	-0.722 ***			
R^2	0.911	0.732	0.573	0.344			

^{*、**、***} 依次表示通过 10%、5%、1%的显著性水平检验

口密度因素、10 km 格网中的降水因素、3 km 和 5 km 以及 10 km 格网中的距城市距离因素与 ESV 呈负向作用,作用方向与其在 1 km 格网中不同,其他因素对 ESV 的作用方向和 1 km 格网一致。

从空间回归结果来看(表 6),模型的拟合效果较线性回归有所改进,总体上仍表现为格网尺度越大,模型的拟合效果就越差,且在各格网尺度中,HAI对 ESV 的解释仍最强,呈负向作用。与线性回归结果比较,考虑了空间效应,在各个格网尺度下,各影响因素的作用强度,甚至作用方向都存在不同。具体来看,与线性回归相比,1 km 格网中的高程因素和 5 km 格网中的距城市距离因素对 ESV 的作用明显发生了变化,分别呈负向和正向,且均未通过显著性检验;3 km 格网中的距城市距离因素和 10 km 格网中的降水因素对 ESV 的作用均呈正向;3 km 格网中的坡度因素和人口密度因素、5 km 格网中的人口密度因素、10 km 格网中的气温因素和地均 GDP 因素均未通过显著性检验,其他因素与线性回归结果基本一致。

Table 6 Spatial error regression model of ESV at various grid scales							
变量	SEM 空间误差模型 Spatial error model						
Variable	1 km 格网 1 km grid	3 km 格网 3 km grid	5 km 格网 5 km grid	10 km 格网 10 km grid			
常数项 Constant term	4.963 ***	3.793 ***	4.772 ***	3.658 ***			
高程 Elevation	-0.009						
坡度 Slope degree	-0.055 ***	-0.025	-0.072 ***				
归—化植被指数 Normalized difference vegetation index	-0.069 ***	-0.081 ***	-0.069 ***				
气温 Temperature	0.071 ***	0.206 ***		0.365			
降水 Rainfall	0.054 ***			0.002 ***			
距城市距离 Distance to city	0.006 ***	0.055 ***	0.011	-0.225 ***			
地均 GDP Average GDP	0.017 ***			-0.064			
人口密度 Population density	0.119 ***	0.038	-0.035				
人为影响指数 Human active index	-0.993 ***	-0.808 ***	-0.620 ***	-0.573 ***			
λ 系数 LAMBDA	0.620	0.749	0.723	0.759			
R^2	0.927	0.819	0.706	0.598			

表 6 不同格网尺度下 ESV 空间误差回归

Table 6 Spatial error regression model of ESV at various grid scales

4 结论与讨论

4.1 讨论

对比分析各尺度地理探测器和空间回归结果可以发现,空间回归模型与地理探测器揭示出 ESV 与各影响因素之间的不同关系。比如,3 km 格网中高程在地理探测器因子探测中对 ESV 的影响贡献力排序为第四,但逐步线性回归分析却建议将其剔除,距城市距离在地理探测器因子探测中对 ESV 影响力排序为第八,而逐步线性回归分析却建议将其输入。经深入分析发现在 3 km 尺度上坡度与高程呈现高度相关性(0.838),而地理探测器中的因子探测并没有考虑多重共线性问题。此外,相比于地理探测器,空间回归模型能揭示影响因素对 ESV 的不同作用方向。因此,将地理探测器与空间回归模型结合用于生态系统服务价值空间分异的探测,结果较好的展示了其空间分异的主导因子、因子交互特点以及正负作用情况,揭示了生态系统服务价值空间分异的影响机制。

ESV 受多种因素共同作用的影响。其中人为影响指数是 ESV 空间分布的主导因子,其原因是人类活动如城市扩张和开垦农田等的增多,导致土地利用结构发生变化,从而影响了 ESV 的空间分布。高程、坡度、NDVI、温度、降水等自然因素对 ESV 的空间分布也有着较大的影响,其中水热条件直接影响着植被的生长,由气候、地质活动、生物等共同作用形成的高程、坡度等地形条件的变化对人类的生产生活和土地利用有着重要影响,而 NDVI 能够反应植被的分布状态及生长潜力,是人类改造利用林地的重要依据之一。人口密度、GDP等社会经济因素对 ESV 的空间分布影响较小,因为研究区内林地、水域所占面积较大,境内生态系统稳定性

^{*、**、***} 依次表示通过 10%、5%、1%的显著性水平检验

强,受社会经济影响小。各影响因素之间的相互耦合作用加大了对研究区域 ESV 空间异质性的影响。

ESV 与影响因素的关系呈现出明显的尺度依赖特征。随着格网尺度增大,格网内各地类的比例变小,且分布越分散,格网内的同质性变低,ESV 的空间相关性也变低。空间自相关低或不显著的区域主要集中在不同地类的边界处,格网尺度越大,空间自相关低或不显著的区域越大。不同的影响因素也受到了格网尺度变化的影响,随着格网尺度增加,数据聚合程度越高,呈现出更强的空间异质性。随着格网尺度的增大,ESV 与影响因素同时受到尺度的影响,空间异质性增强,使得 ESV 与影响因素的拟合程度变低。且由于聚合过程的复杂性,不同格网尺度下,影响因素是否进入回归方程,以及作用方向都可能不同, ESV 空间异质性的影响因素差异较大。格网尺度越小,影响因素间交互作用越强,且双因子交互作用排序也发生改变。因此,改善生态系统的过程中,需要选取合适的分析尺度,且不仅需要考虑不同格网尺度下影响因素的不同,还需考虑各影响因素间的交互作用。

改善生态环境应精准调控生态环境空间,积极落实生态保护政策,持续推进生态环境治理。在规划改善生态系统服务空间结构时,可以考虑其空间布局以及影响程度较大的利益群体。本文研究结果表明人类活动对生态系统服务具有明显抑制作用,表明城市扩张、开垦农田等人类活动造成较高价值生态系统服务向较低价值生态系统服务转移,导致生态系统向负向发展。因此,建议应协调城乡发展,合理用地,实现高质量的经济发展建设,避免城市无序扩张。此外,管理政策和措施需要考虑尺度变化的影响,选择合适的尺度影响因素。尺度太小,其结果难以推广至大范围生态调节应用之中。基于生态环境保护的易操作性及区域性可持续发展的可行性,结合研究区的实际概况,考虑到数据量的大小,本文认为3km×3km格网的研究结果更具参考价值。此外,需要指出的是,格网尺度的分析有助于发现适合的分析尺度,但是不如行政区划单元样便于生态环境保护管控和治理。且本文所考虑的影响因素可能不够全面,在今后的研究中还需进一步加强与完善。

4.2 结论

以大南昌都市圈为研究对象,结合地理探测器和空间回归模型从多尺度角度全面分析大南昌都市圈 ESV 的影响因素,并探究 ESV 空间异质性的主导因子和各因子交互作用以及不同尺度下影响因素作用的差异性,结果表明:

- (1)在不同格网尺度下,地均 ESV 分布总体上较为一致,均为西部和北部的地均 ESV 较高,东部和南部的地均 ESV 较低。不同格网尺度下地均 ESV 呈现一定的空间异质性特点,且各格网尺度下均存在显著空间正相关性和空间集聚效应。随着格网尺度的增大,地均 ESV 的高值和低值集聚效应均在逐渐弱化,即生态价值空间集聚效应逐渐减弱。
- (2) 地理探测器结果表明,大南昌都市圈 ESV 空间异质性受到自然环境和经济社会发展的协同作用,不同因子对 ESV 的影响程度差异显著,在不同格网尺度下,HAI 贡献度均为最大,是影响大南昌都市圈空间异质性的主导因子,且任意两两因子都较单一因子对 ESV 空间异质性的解释力高。随着格网尺度的增大,因子探测与交互探测统计量明显下降,即因子及因子间对 ESV 空间异质性的解释力逐渐下降。
- (3)空间回归的结果显示,随着格网尺度增大, R^2 减小, 空间回归模型的拟合度降低。格网尺度不同, 各因子对 ESV 空间异质性的影响程度和正负作用方向存在差异。在不同格网尺度下, HAI 均对 ESV 解释力最强, 且呈明显负作用, 说明人类活动对 ESV 有较强抑制性。

参考文献 (References):

- [1] Pharo E, Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. The Bryologist, 1998, 101(3): 475.
- [2] Pearce D. Auditing the earth; the value of the world's ecosystem services and natural capital. Environment; Science and Policy for Sustainable Development, 1998, 40(2); 23-28.
- [3] Zhang J, Li X C, Zhang C C, Yu L, Wang J Z, Wu X Y, Hu Z W, Zhai Z H, Li Q Q, Wu G F, Shi T Z. Assessing spatiotemporal variations and predicting changes in ecosystem service values in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59 (1), 184, 199
- [4] 王思博, 龚晶, 陈俊红, 李冬冬, 李婷伟. 生态系统服务消费与经济增长、环保投入相关性研究——基于居民旅游对生态景观的需求视角. 价格理论与实践, 2021(5): 165-168, 196.

- [5] Ma Q, Zhou M Q, Liu J C, Zhao J, Xi M J. Coupling relationship between ecosystem service value and socioeconomic development in the Qinba Mountains, China. Diversity, 2022, 14(12): 1105.
- [6] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [7] Mamat A, Halik Ü, Rouzi A. Variations of ecosystem service value in response to land-use change in the Kashgar region, northwest China. Sustainability, 2018, 10(1); 200.
- [8] 高登. 大都市区土地利用变化及其生态系统服务价值响应——以济南市为例. 中国资源综合利用, 2021, 39(12): 72-74.
- [9] Wu X. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. Science of the Total Environment, 2019, 652: 1375-1386.
- [10] Häyhä T. Ecosystem services assessment: a review under an ecological-economic and systems perspective. Ecological Modelling, 2014, 289: 124-132
- [11] Lautenbach S. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 676-687.
- [12] 赵育恒, 曾晨. 武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素. 生态学报, 2019, 39(4): 1426-1440.
- [13] 彭保发, 陈端吕. 常德市土地覆被的生态服务价值空间变异分析. 经济地理, 2012, 32(1): 141-145.
- [14] Cai G, Lin Y Y, Zhang F Z, Zhang S H, Wen L S, Li B Y. Response of ecosystem service value to landscape pattern changes under low-carbon scenario; a case study of Fujian Coastal Areas. Land, 2022, 11(12); 2333.
- [15] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [16] 薛明皋, 邢路, 王晓艳. 中国土地生态系统服务当量因子空间修正及价值评估. 中国土地科学, 2018, 32(9): 81-88.
- [17] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值. 中国人口・资源与环境, 2007, 17(4): 55-60.
- [18] 王景升,李文华,任青山,刘某承.西藏森林生态系统服务价值.自然资源学报,2007,22(5):831-841.
- [19] Zhao Y Q, Han Z L, Yan X L, Wang X Z. Integrating spatial heterogeneity into an Analysis between ecosystem service value and its driving factors: a case study of Dalian, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(24): 17055.
- [20] 韩增林, 赵文祯, 闫晓露, 钟敬秋, 孟琦琦. 基于生态系统服务价值损益的生态安全格局演变分析——以辽宁沿海瓦房店市为例. 生态学报, 2019, 39(22): 8370-8382.
- [21] 江波,欧阳志云,苗鸿,郑华,白杨,庄长伟,方瑜.海河流域湿地生态系统服务功能价值评价. 生态学报, 2011, 31(8); 2236-2244.
- [22] 谢高地,张彩霞,张雷明,陈文辉,李士美.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进.自然资源学报,2015,30(8): 1243-1254.
- [23] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [24] 陈睿,杨灿,杨艳,董祥泽.洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素.应用生态学报,2022,33(1):169-179.
- [25] 危小建,陈竹安,张蕾,江平,吴芳.引入城市扩张干扰效应的生态服务价值化方法改进.长江流域资源与环境,2019,28(1):30-38.
- [26] 叶妍君,齐清文,姜莉莉,张岸.基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析.地理研究,2018,37(1):171-182.
- [27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [28] Fang L L. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins. Journal of Cleaner Production, 2021, 314, 127995.
- [29] 黄木易,方斌,岳文泽,冯少茹.近 20a来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测.地理研究,2019,38(11):2790-2803.
- [30] 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 李颜颜, 张宇, 秦明周. 黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变. 农业工程学报, 2020, 36 (11): 277-288.
- [31] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 冯少茹. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [32] Jie Y, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [33] 乔斌,祝存兄,曹晓云,肖建设,扎西拉旦,颜玉倩,陈国茜,史飞飞.格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析.应用生态学报,2020,31(5):1660-1672.
- [34] 侯孟阳,姚顺波,邓元杰,丁振民,鲁亚楠,郑雪,李雅男.格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景.自然资源学报,2019,34(3):539-552.
- [35] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [36] 姚小薇,曾杰,李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征. 农业工程学报, 2015, 31(9): 249-256.
- [37] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [38] 刘祗坤, 吴全, 苏根成. 土地利用类型变化与生态系统服务价值分析——以赤峰市农牧交错带为例. 中国农业资源与区划, 2015, 36 (3): 56-61.
- [39] 陈浮, 葛小平, 陈刚, 彭补拙. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究. 地理科学, 2001, 21(3): 210-216.
- [40] 侯孟阳,姚顺波,邓元杰,丁振民,鲁亚楠,郑雪,李雅男.格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景.自然资源学报,2019,34(3):539-552.
- [41] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 李苑菱, 杨琦, 陈小花. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析. 生态学报, 2019, 39(7): 2366-2377.
- [42] 马晓熠, 裴韬. 基于探索性空间数据分析方法的北京市区域经济差异. 地理科学进展, 2010, 29(12): 1555-1561.
- [43] 彭珏,何金廖. 电商粉丝经济的地理格局及其影响因子探析——以抖音直播带货主播为例. 地理科学进展, 2021, 40(7): 1098-1112.