

DOI: 10.5846/stxb202103030579

刘永婷, 杨钊, 徐光来, 杨强强, 刘世杰, 何开玲. 基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析——以皖南国际旅游文化示范区为例. 生态学报, 2022, 42(13): 5200-5210.

Liu Y T, Yang Z, Xu G L, Yang Q Q, Liu S J, He K L. Correlation between ecosystem services value and human activity intensity based on the four-quadrant model: A case study in the International Tourism and Culture Demonstration Area, the South Anhui Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5200-5210.

基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析

——以皖南国际旅游文化示范区为例

刘永婷^{1,2}, 杨 钊^{1,*}, 徐光来^{1,2}, 杨强强^{1,2}, 刘世杰¹, 何开玲¹

1 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241003

2 安徽省江淮流域地表过程与区域响应重点实验室, 芜湖 241003

摘要: 运用空间热点分析定量分析了生态系统服务在不同尺度上的空间分异特征, 基于四象限模型对生态质量进行评价, 并采用地理探测器探讨影响其空间分异的主要驱动因素。结果表明: (1) 生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)存在显著的空间异质性, 分布格局呈现空间自相关性, 冷热点分布具有明显尺度效应。(2) 示范区人类活动强度与ESV耦合程度基本协调一致, 生态质量总体状况较好。人类活动强度与ESV耦合程度因研究尺度不同而存在一定差异。(3) 各探测因子的解释力在县域和乡镇尺度上存在显著差异, 社会经济驱动因素在县域尺度上解释力大于乡镇尺度。各驱动因子之间存在明显的协同增强效应, 双因子交互作用增强了对ESV空间分异的解释力。

关键词: 生态系统服务价值; 生态质量; 驱动机制; 地理探测器; 皖南国际旅游文化示范区

Correlation between ecosystem services value and human activity intensity based on the four-quadrant model: A case study in the International Tourism and Culture Demonstration Area, the South Anhui Province

LIU Yongting^{1,2}, YANG Zhao^{1,*}, XU Guanglai^{1,2}, YANG Qiangqiang^{1,2}, LIU Shijie¹, HE Kailing¹

1 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

2 Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu 241003, China

Abstract: Understanding the spatial characteristics of ecological environment quality at different spatial scales and their underlying social-ecological drivers was essential for forming the efficient management decisions of ecosystems. Taking the International Tourism and Culture Demonstration Area in South Anhui Province as an example, this paper analyzed the spatial heterogeneity of the ecosystem service value (ESV) at different scales based on the methods of spatial hotspot analysis. The four-quadrant model was used to evaluate the ecological quality at the county and township scale. Last, this study examined the ESV' responses to the social-ecological drivers at the two spatial scales and explored the interaction mechanism between the ESV and the geographical environment. The results show that: (1) there was significant heterogeneity in the ESV on the spatial pattern. The distribution pattern showed obviously spatial auto correlation. The spatial pattern of the ESV was affected by scale, and the distribution of cold and hot spots were some differences between

基金项目: 国家自然科学基金项目(412711172); 国家自然科学基金青年项目(41301029, 41301011)

收稿日期: 2021-03-03; **网络出版日期:** 2022-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangzhao@mail.ahnu.edu.cn

the county and township scale. (2) The intensity of human activities was basically consistent with the degree of the ESV coupling, and the overall ecological quality was in good condition. In addition, the degree of coupling between the intensity of human activities and the ESV showed significantly spatial heterogeneity across scales. (3) The spatial differentiation of the ESV was affected by a variety of factors. The explanatory power of each factor to the ESV spatial heterogeneity was significantly different. Moreover, the magnitudes of social-ecological drivers' impacts on the ESV varied at different scales. Across the two spatial scales, the drivers of the ESV exhibited scale dependence, the smaller the scale, the more diverse the drivers. The socioeconomic factors were key drivers for the ESV at the county scale, while the natural and socioeconomic drivers were key drivers at the township scale. There were obviously mutual reinforcements among the driving forces, while the interaction between two-factor interaction enhanced the explanatory ability of the spatial differentiation of the ESV. The results of our study advocated the multiscale assessment of the human activity effect on ecosystem services and emphasized the necessity of embracing scale dependency in the regional ecosystem management. It was of practical significance to implement more precise management measures at a smaller scale. The results can help decision makers to formulate corresponding ecological management strategies at appropriate spatial scales and promote sustainable development in the area.

Key Words: ecosystem service value; ecological quality; driving factor; geographical detector; International Tourism and Culture Demonstration Area in the South Anhui Province

生态系统是人类社会的重要组成部分,为人类生存和发展提供了一系列至关重要的服务和功能^[1]。生态系统服务(Ecosystem Services, ES)是生态系统对人类福祉的贡献,为人类的生存和社会发展提供了自然物质基础^[1-3]。生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)作为表征生态安全程度的重要指标,是评估生态保护成效的手段,为区域生态保护和生态文明建设提供科学参考^[4-7]。在快速城镇化进程中,土地利用/覆被利用强度逐渐增大,进而引起区域生态系统结构、功能及其服务的变化,同时对人类的可持续发展造成极大威胁^[8-11]。定量分析区域生态系统服务空间分异特征,探讨其与人类活动强度在不同尺度上的空间关联特征,对协调人地关系,区域生态系统管理和可持续发展具有重要作用^[12-14]。目前,许多学者虽对人类活动强度与ES的空间分布及其相互关系进行了研究,但人类活动与ES之间的线性或非线性关系仍不清楚^[15]。人类活动与ES的耦合关系较为复杂,具有较大的空间异质性和尺度依赖性,它们之间的关系因研究区域的自然特征和社会经济因素的变化而发生改变^[16-17]。相对县域行政单元,较小尺度上的评价数据可以为上一级行政单元提供更精确的数据支持^[18]。开展县域和乡镇空间尺度下对比分析研究,考虑不同因素,对人类活动强度的空间特征进行量化,剖析微观区域ESV空间差异,进而对生态质量进行评价,利于生态系统的精细化管理,为制定针对性的生态政策,实现区域生态环境的修复保护提供参考依据^[19-20]。

人类活动通过改变土地利用/覆盖直接影响ES的空间分布,社会经济因素改变了一个或多个直接驱动因素间接影响ES之间的关系^[21-23]。ES空间异质性的内在机理有待进一步明晰,如何定量识别影响ES空间分异的关键驱动指标以及主导影响因子交互作用机制,现已成为生态系统服务研究的重要前沿议题^[23-25]。由于自然因素和生态过程的区域分异,ES具有显著的空间异质性,在不同空间尺度上,利益相关者对各类型ES实际需求和重视程度不同,ES与其驱动因素的关系强度也可能因空间尺度不同而存在差异^[26-27]。目前,ES对社会生态驱动因素的线性或非线性响应随空间尺度变化的研究相对较少,基于不同尺度对区域内ES与自然、社会驱动因素的研究,可以协助决策者在不同空间尺度制定相应的管理策略,从而为生态安全建设提供相应的理论支撑^[26-28]。鉴于此,本文以皖南国际旅游文化示范区(简称示范区)为案例地,应用探索性空间数据分析方法厘清县域和乡镇尺度的ESV空间上的分布特征,基于四象限模型衡量人类活动强度与ESV之间耦合关系,并运用相关性分析和地理探测器基于县域和乡镇尺度来厘清ESV与自然、社会经济驱动因素之间的关系,将宏观和微观尺度分析的优势相结合,深入地评估驱动因素如何影响ESV的空间格局,为决策者

在不同空间尺度制定区域经济发展与生态平衡的“双赢”政策,更加有效地实施生态系统服务管理,为示范区的山水林田湖草生态保护和生态文明建设提供基础性参考。

1 研究区概况

示范区位于安徽省的南部地区,包括 7 市、47 个县(市、区),面积 5.7 万 km²(图 1)。示范区属于典型的亚热带季风气候区,森林、湿地和水域是示范区主要的生态系统类型,这些生态系统的稳定空间格局对研究区乃至全省的经济发展起着重要的作用。示范区由于其优越的地理条件和生态环境,旅游资源禀赋极高,自然和人文景观相得益彰,具有较好的生态支撑能力。2009 年皖南国际文化旅游示范区设立,示范区城镇化步伐加快和旅游经济快速发展,至 2019 年底,区内平均城镇化率达到 58.06%,旅游总收入 4436.48 亿元,占全省比重的 52.0%。近年来,部分区域土地资源的不合理开发和利用,水土流失现象严重,生态脆弱区增多^[29]。这些条件严重影响了研究区的生态特性、生物多样性和生态系统服务,造成了水土资源的破坏和生态系统的破碎化。

因此,厘清人类活动与生态系统服务的耦合关系,利于实现区域生态环境协调发展和全面提升居民生活福祉。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据获取与处理

本文土地利用/覆被数据以 2019 年 Landsat8 OLI 遥感影像为主要数据源(地理空间数据云, <http://www.gscloud.cn>),基于 ENVI5.2 软件,通过人工目视解译,依据国家标准(GB/T 21010—2017)及研究区生态系统特征,采用面向对象分类法分为:耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地,并依据同期 Google Earth、天地图高清影像对人工选取的各地类感兴趣区(Region of Interest, ROI)进行目视校准,获得示范区 2019 年分辨率为 30m×30m 土地利用分类数据,随机选取 400 个点进行验证,总分类精度达 90.61%,kappa 系数为 0.89,满足应用精度要求。计算 2019 年各生态系统单位面积服务价值所用的粮食作物产量、粮食种植面积及粮食价格等资料来源于《安徽省统计年鉴》、《中国统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。

本文驱动因子指标主要选择影响 ESV 的自然和社会经济因素,并利用 K-Means 分类对各驱动因素进行空间离散化形成类型。高程(DEM)数据来源于地理空间数据云;坡度基于 DEM 提取;气温和降水观测资料均来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),以研究区 37 个气象站 2019 年的数据为参数,运用 ArcGIS 10.3 的普通克里金插值法获取年均气温和降水量的栅格数据;土地垦殖率和人为影响综合指数(Human Active Index, HAI)结合实际并参考相关文献计算^[18,30–31];道路密度和水网密度基于 ArcGIS 10.3 软件利用 2019 年道路、水体的矢量数据计算(<http://www.webmap.cn/>);2019 年夜间灯光遥感数据(DMSP/OLS)来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA);2019 年归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和人口密度数据均来自中科院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。为便于空间数据的分析处理,以上所有数据均基于 ArcGIS10.3 平台转换为统一的空间坐标系(WGS_1984_UTM_zone_50N)。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值评估

本文依据谢高地等^[7,32]的 ESV 当量因子法,根据研究区单位面积平均实际粮食产量和同期全国单位面

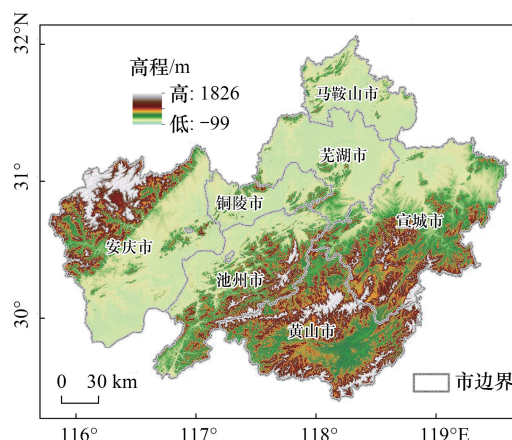


图 1 皖南国际旅游文化示范区的地理位置及高程

Fig.1 Geographical location and elevation in the International Tourism and Culture Demonstration Zone of the South Anhui Province

积粮食产量,以此得出研究区生态系统服务当量价值的修正系数,确定了 1 个标准当量因子的经济价值。依据示范区土地利用类型的特征,将土地利用分类价值当量与最接近谢高地的生态系统类型相联系,耕地对应农田;林地对应森林,即针阔混交、阔叶与灌木的平均值;草地取灌草丛和草甸的平均值;水域对应水系;未利用地对应裸地,建筑用地系数参考已有研究^[32-33]。相关计算公式详见参考文献[32]。

2.2.2 ESV 空间异质性

采用探索性空间数据分析(ESDA)中全局空间自相关 Moran's *I* 测度区域 ESV 是否存在空间异质性^[34-35]。采用 Getis-Ord G_i^* 指数揭示(ESV)在局部空间的依赖性 & 异质性,以识别县域和乡镇尺度 ESV 在不同空间单元区域的热点和冷点集聚区,进一步探析局部空间自相关特征^[35]。

2.2.3 生态质量评价

生态质量受到自然和社会经济等多种因素的制约,其优劣程度与 NDVI 和不透水建筑面积有密切关系^[36]。目前,许多学者主要基于景观格局、构建综合指标体系和遥感综合生态指数等方法量化生态质量优劣^[37-39]。本研究通过衡量 ESV 和人类活动强度的耦合关系来刻画区域生态质量。由于 NDVI 一般代表区域绿度,是衡量生态环境优劣的重要指标^[40]。人类活动是导致生态环境退化的主要驱动因素,因此,区域人类活动强度通过 NDVI 和人为干扰两个方面综合测算^[41]。人类活动频率、人口聚集和经济发展通常被认为是人为干扰的主要因素,这些活动可以加强 ESV 的空间异质性。本文选取了 NDVI、夜间灯光、人口密度、土地垦殖率和道路密度来衡量区域人类活动强度。其中,NDVI 是负指标,说明 NDVI 值越大,人类活动强度越低,其他四个因子为正指标,值越大,人类活动强度越高^[17,42]。由于不同指标数量级及量纲存在差异,为消除其对计算结果造成的影响,对各指标进行标准化处理,以降低随机因素干扰。基于层次分析法和熵值法相结合的主客观赋权法计算各指标相应的权重^[43-46]。基于 20 位本领域高校科研人员的主观赋权意见,邀请 5 位专家(人文地理学专家 3 名,生态学专家 2 名)依据各指标对 ESV 影响作用的强弱,分别对五个指标进行排序,由此构造指标间两两判断矩阵,再由各专家判断矩阵几何平均得到群决策矩阵,并进行一致性检验,确定指标主观权重。使用熵权法对指标权重客观赋值,再利用最小信息熵原理对主客观权重进行综合,确定各指标权重(表 1)。

$$w_i = \frac{(w_{1i} \times w_{2i})^{1/2}}{\sum_{i=1}^n (w_{1i} \times w_{2i})^{1/2}} \tag{1}$$

式中: w_i :综合权重, w_{1i} :层次分析法计算的主观权重, w_{2i} :熵值法计算客观权重^[46]。

表 1 评价指标权重
Table 1 The weight of evaluation index

指标 Indicators	单位 Unit	属性 Attribute	主观权重 Subjective weight	客观权重 Objective weight		综合权重 Comprehensive weight	
				县域	乡镇	县域	乡镇
NDVI	—	负	0.14	0.13	0.09	0.13	0.11
夜间灯光 Night-time light	D _N	正	0.21	0.22	0.26	0.22	0.24
人口密度 Population density	人/km ²	正	0.22	0.27	0.32	0.24	0.27
土地垦殖率 Land reclamation rate	%	正	0.24	0.16	0.11	0.20	0.17
道路密度 Road density	m/km ²	正	0.19	0.22	0.22	0.21	0.21

四象限模型是基于定性与定量研究相结合来分析房地产市场变化的一种工具^[47-48]。随着学科的融合和发展,该模型逐渐应用于研究水资源价值、文旅融合、景观生态质量和生态系统服务质量等方面^[17,47-49]。本文采用四象限模型基于县域和乡镇尺度衡量人类活动强度与 ESV 之间耦合关系,探究区域生态环境质量现状及空间分异特征。该模型以人类活动强度为横轴,ESV 为纵轴,构建出四象限模型,基于 jenkins 分级方法将

ESV 和人类活动强度划分区间,并依据 ESV 与人类活动强度耦合关系,划分为优质、良好、一般和劣质四个分区^[17,48](图 2 和表 2)。

2.2.4 自然-社会因子驱动力分析

ESV 空间分异受到自然和人文社会经济多种因素综合作用。根据相关文献和研究区实际社会-生态环境背景,选择了年均气温(X_1)、降水量(X_2)、DEM(X_3)、坡度(X_4)、水网密度(X_5)、NDVI(X_6)、HAI(X_7)、土地垦殖率(X_8)、夜间灯光(X_9)、人口密度(X_{10})和道路密度(X_{11})11 个代表性自然、社会经济因子。基本包括气候、地形、水系、植被覆盖、农业活动、人口聚集和城镇建设等方面,且具有较好的独立性。县域和乡镇尺度是进行景观空间规划和管理决策的基本尺度^[28],本研究基于县域和乡镇行政单元研究尺度,运用地理探测器模型探测影响 ESV 空间分异的因子贡献率和两因子交互作用对 ESV 的解释力^[50-52]。

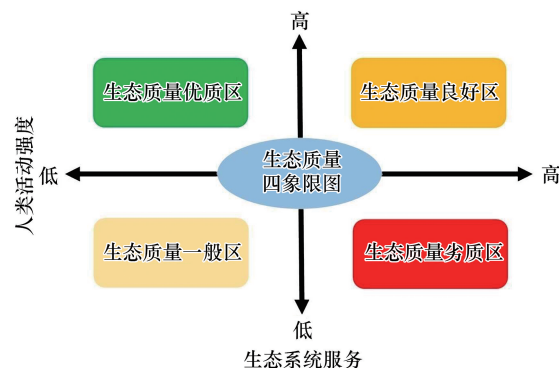


图 2 生态质量四象限模型^[17]

Fig.2 Four-quadrant evaluation of ecological quality

表 2 县域生态质量四象限分区

Table 2 Four-quadrant partition of ecological quality at the county scale

指标 Indicators	象限 I Quadrant I	象限 II Quadrant II	象限 III Quadrant III	象限 IV Quadrant IV
生态系统服务 Ecosystem Service Value	56.24×10^8 — 196.51×10^8	0.34×10^8 — 56.24×10^8	0.34×10^8 — 56.24×10^8	56.24×10^8 — 196.51×10^8
人类活动强度 Human activity intensity	0.01—0.28	0.01—0.28	0.28—0.92	0.28—0.92

3 结果分析

3.1 示范区 ESV 空间分异特征

县域和乡镇尺度上,ESV 全局 Moran's I 指数分别为 0.23、0.26,均通过 0.01 的显著性水平检验,这证实了示范区 ESV 存在较强的空间依赖性,具有明显的空间异质性。为了进一步反映局部地区高低值聚类程度,使用聚类分析工具 Getis-Ord G_i^* 指数进行分析,生成区域 ESV 空间格局冷热点图。ESV 冷点和热点区集聚性显著,县域和乡镇尺度上 ESV 和人类活动强度的热点和冷点空间格局分布呈现一定差异(图 3)。县域尺度上,ESV 热点区主要位于太湖县、宿松县和望江县,冷点区主要分布在芜湖市、马鞍山市和铜陵市的部分县区,其中镜湖区、鸠江区、当涂县为极显著冷点区。乡镇尺度上,ESV 冷热点分别有 35 和 25 个乡镇,热点区集中在宿松县、东至县、黟县、黄山区和宣州区等地区的乡镇,呈连片分布;冷点区多分布于北部区域的乡镇,并且在东部地区也有少量分布。ESV 空间集聚特征显著,核心热点区集中分布于一些生态保护区,呈片状分布特征,生态系统服务功能较强。ESV 冷点地区主要分布于长江沿岸平原地区。这些区域地形平坦,人口密集,是城市建成区或耕地分布的重点区域,在带来较高社会经济效益的同时,也容易导致 ESV 损失。

3.2 基于四象限模型的生态质量评价

在四象限模型的基础上,对生态质量进行了评价,示范区的生态质量空间分布因研究尺度不同存在一定的差异(图 4)。县域尺度上,生态质量良好的县(区)的面积较大,占总面积的 60%以上,生态质量低的县域较少。QI、QII 和 QIII 的县数分别为 15、17 和 15 个,分别占总面积的 59.39%、31.15%和 9.46%。QI 和 QII 主要分布在示范区的南部山地丘陵区,QIII 主要集中分布在沿江平原地区。乡镇尺度上,大部分乡镇属于生态质量一般区,部分乡镇属于生态质量劣质区,而生态良好和优质的乡镇数量较少。QI 和 QII 主要分布在示范

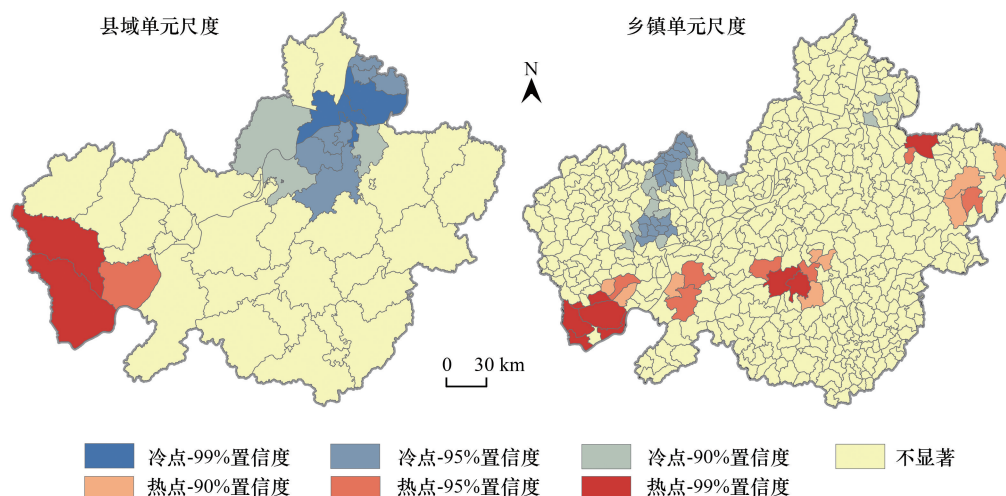


图3 县域和乡镇尺度下ESV的热点分析

Fig.3 Getis-Ord G_i^* scores of ESV at different scale

区的南部,约占研究区域的50%,而QIII和QIV主要集中在沿江平原地区。QI、QII、QIII和QIV的乡镇数分别为38、284、206和15个,分别占总面积的16.77%、48.89%、29.76%和4.58%。生态质量劣质区主要分布在沿江平原地区,生态质量一般区分布在研究区域南部和西部地区,其他地区分布比较零星。从地貌特征上可以看到,这些生态质量良好区主要分布在皖南低山丘陵和皖西生态资源比较丰富的地区,生态质量较差区主要分布在沿江平原城乡建设用地比例高及耕地资源丰富的地区。

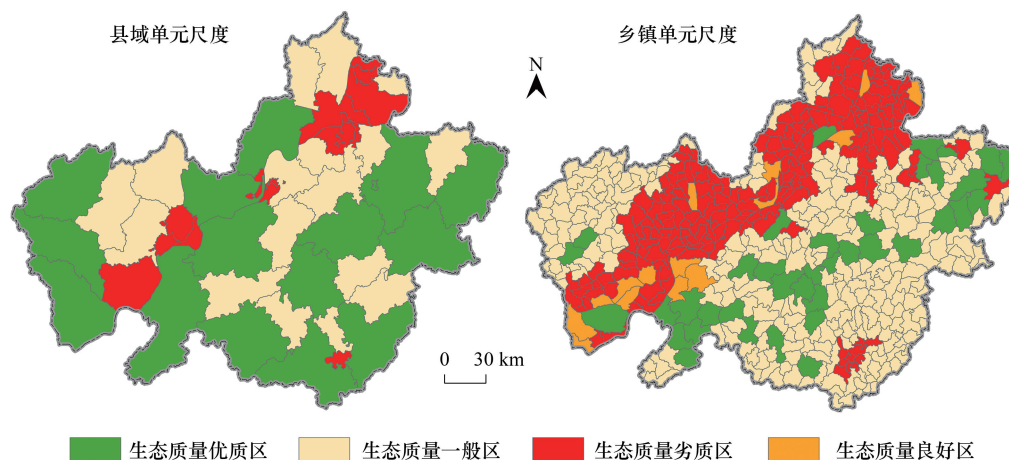


图4 县域和乡镇尺度下生态质量四象限分布

Fig.4 The four-quadrant distribution of ecological quality at different scale

3.3 ESV 驱动机制分析

为保证驱动因子选择的合理性和科学性,利用相关分析对ESV与自然-人文驱动因素进行检验,并判别驱动因子对ESV的作用力方向(图5)。在县域尺度上,除了X1外,ESV与各因子的相关性均通过显著性水平检验,X2、X3、X4、X5、X6和ESV之间存在正相关关系,其他则存在负相关关系。在乡镇尺度上,X5、X6、X7、X8、X9、X10、X11与ESV的相关性相对较高,均达到显著性水平,其他因子的相关性较低。

基于地理探测器计算各探测因子对示范区县域和乡镇尺度ESV的探测力 q 统计值及显著性检验,并定

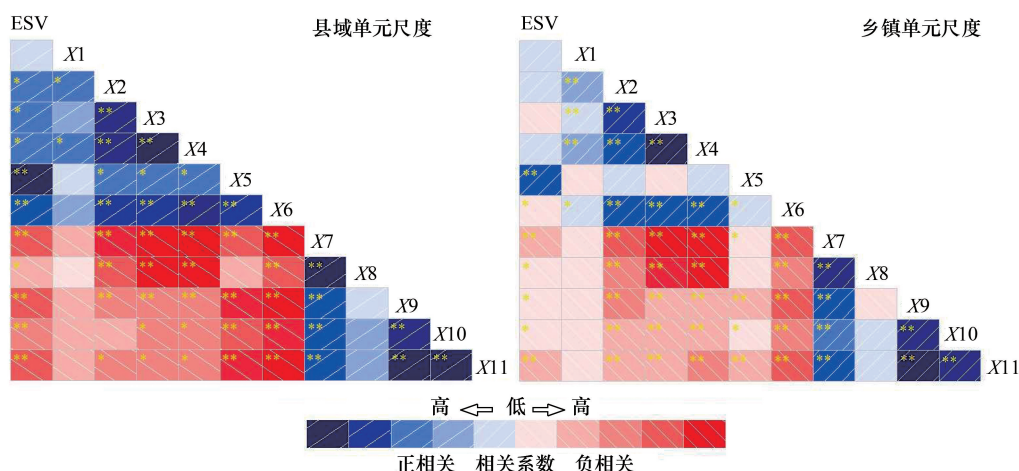


图5 ESV驱动因子相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of driving forces for ESV at different scale

* :通过 0.05 的显著性水平检验; * * :通过 0.01 的显著性水平检验

量识别其空间异质性特征(图6)。同一因子因空间尺度不同对ESV的作用强度(q 值)存在显著差异。各驱动因子之间存在交互作用,双因子或非线性地加强了对ESV空间分布的解释力。县域尺度上,除X1外,其他探测因子 q 值均通过0.05水平的显著性检验,对ESV的空间分异特征具有较强的解释力。影响县域ESV空间分异的第一主导因素是X5($q=0.88$),第二主导因子是X10($q=0.50$),其次是X9($q=0.39$)、X11($q=0.36$)、X7($q=0.34$)和X6($q=0.27$),均通过了0.01的显著性检验,表明上述因子的解释贡献度较高。主导交互因子为 $q(X5 \cap X8)$, q 值为0.98,即这组因子的交互作用能在98%的程度上解释县域ESV空间分异特征。X5、X10与其他驱动因子交互作用均在0.50以上,进一步验证了X5和X10对ESV空间分异特征的解释力高于其它驱动因素。乡镇尺度上,除X1和X3外,其他影响因子 q 值均通过0.05水平的显著性检验,具有相当的解释作用。X5($q=0.28$)和X7($q=0.05$)对ESV空间分异特征的解释力较强,且通过了0.01的显著性检验,其次是X4($q=0.04$)和X6($q=0.04$),是ESV的空间分异的重要影响因素,而X2($q=0.02$)、X9($q=0.02$)和X10($q=0.02$)解释贡献度相对较小,是ESV的空间分异基础性影响因子。交互主导因子为 $q(X5 \cap X6)$, q 值为0.52,进一步验证了X5和X6是ESV空间差异的重要驱动因子。

由上述分析可知,年均气温在示范区内空间差异相对较小,对ESV空间分布的影响不显著。水网密度、HAI、人口密度、NDVI和路网密度等因子之间交互作用显著影响示范区ESV空间分异特征,除水网密度(X5)外,其他各驱动因子在县域和乡镇尺度上对ESV影响程度存在一定差异。在交互作用探测中,各因子对ESV空间分布影响的差异性表现显著,在县级和乡镇尺度上均呈现出较强的双因子增强交互作用。任意两两驱动因素交互作用后,对ESV空间分布的影响力均存在协同增强的作用,说明研究区ESV空间异质性是受多种因素协同交互的影响。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文选取地处江南山地丘陵的皖南国际旅游文化示范区为案例地,运用全局空间自相关和Getis-Ord G_i^* 指数,基于县域和乡镇尺度对ESV空间分布特征进行探讨,利用四象限模型衡量人类活动强度与ESV之间耦合关系,并运用地理探测器厘清ESV与自然、社会经济驱动因子之间的关系。示范区ESV存在明显的空间异质性,ESV冷点和热点区呈一定集聚性特征,其空间分布特征因研究尺度不同而存在一定差异。ESV热点区主要在一些生态保护区呈片状分布。调节-支持型生态系统(林、草地)主要分布于皖西和皖南等生态保护区,

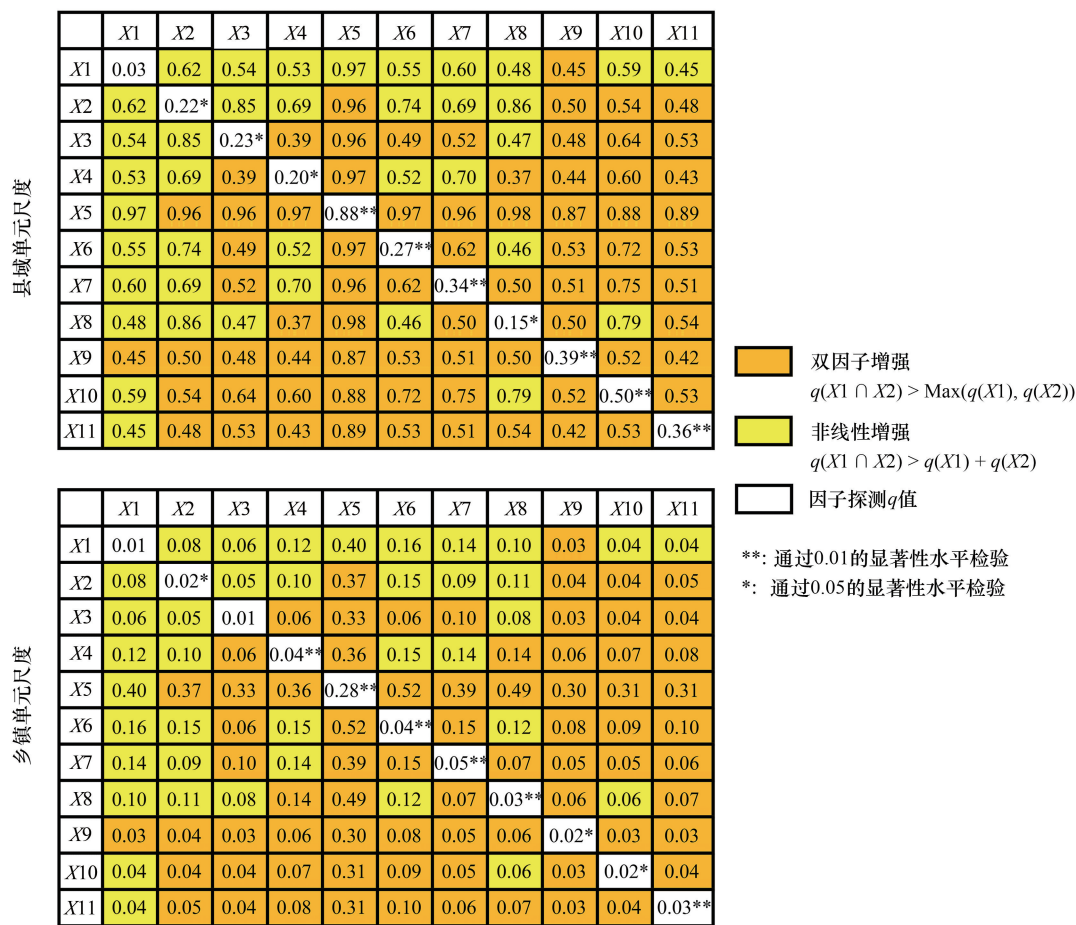


图6 示范区ESV驱动力交互探测结果

Fig.6 Interactive detection results of driving forces for ESV at different scale

植被覆盖度高,人口密度和土地利用强度均较低,正是这种社会生态环境的空间异质性导致生态系统服务呈现了显著的尺度依赖^[53]。冷点区集中分布在沿江平原呈片状或零星分布特征,与耕地、建设用地在空间分布上吻合。沿江平原地区人口密集,大量粮食需求导致农业活动强度较大,土地利用强度高,植被覆盖度相对较低,该区域供给型生态系统(耕地)占比较大。

随着城镇化进程加快,人类活动对生态环境的干扰明显增强,生态质量是人类活动干扰与生态系统自身稳定性的综合反映^[30]。生态质量模型反映了人类活动强度与ESV在相互影响和制约下的耦合关系^[54]。示范区人类活动强度与ESV耦合程度因空间尺度不同而存在很大差异。县域生态状况总体较好,生态质量优质区约占总面积的60%,生态质量较差的县区较少,只占总面积的9.46%,主要集中在沿江经济较为发达的地区,这与以往的研究相一致^[36]。乡镇生态状况主要分布在QI、QII和QIII,而只有4.58%的乡镇分布在高度耦合的QIV。人类活动强度与ESV的耦合关系在研究区基本协调一致,生态质量则表现出明显的地域性差异。皖南山地丘陵区具有很大的生态优势和丰富的森林资源,由于山区多,交通不便,人类活动强度与ESV耦合程度较高。沿江平原地区,人口密度大,城镇建设用地扩大,生态资源被占用和破坏现象较为严重,人类活动强度与ESV的耦合程度较低。改善人类活动强度与ESV之间的耦合关系将是一个长期而渐进的过程^[17]。对于示范区人口密度高、ESV低的乡镇,应进一步采取针对性的可持续生态恢复措施,协调人与环境的耦合关系^[55]。

自然、社会经济因素因空间尺度不同而存在异质性,在不同的尺度上对ES产生影响方向和程度也可能

存在差异^[56-57]。了解 ES 和驱动因素之间关系的多尺度特性,利于 ES 的分级治理和促进区域可持续发展^[58]。自然和社会经济因素共同主导示范区 ESV 的空间分布特征,这些因素对示范区 ESV 空间分异的作用强弱因空间尺度不同而存在一定程度的变化。社会经济因素在县域尺度上对 ESV 空间异质性的影响力高于自然因素,乡镇尺度上,ESV 空间分异特征是自然、社会经济因素综合作用的结果。水网密度、HAI、人口密度、NDVI 和路网密度是县域和乡镇尺度下 ESV 空间分异的主要驱动因子,降水量虽然对 ESV 空间分异的解释力较小,但仍然是 ESV 空间分异不可或缺的因素。沿江平原地区社会经济发展迅速,人口密度逐渐增大,经济快速发展带动土地城镇化速度加快,在此过程中植被减少,加大了对生态系统服务威胁。南部地区主要是山地和丘陵,土地利用和人类活动强度以及经济发展规模相较于沿江平原地带较小,植被覆盖度较高,破碎化程度低,受人类活动干扰小,ESV 保持在较高水平。因此,区域内 ESV 的空间分异主要受制于人类活动强度,其原因是人口密度的增加造成耕地及建设用地侵占其他生态类型用地,加重了周边城镇地区的生态压力。针对生态质量较差的乡镇,未来加大保护自然环境的力度,不适宜耕作的区域恢复成林地或滩涂,实施生态修复和恢复生物多样性,对林地和水域进行科学合理的旅游景区开发,提升其文化服务价值,在一定程度上可以保障该区域生态安全。

本文运用了价值当量因子法,并考虑示范区实际情况对其进行了修正,但评估结果与实际价值可能会存在一定差异,如何实现对 ESV 更为精确的估算是今后一个重要的研究方向。本文基于多尺度视角仅探讨了人类活动强度与 ESV 耦合程度空间分布特征,未来将补充相关数据资料,进一步探究 ESV 与人类活动强度耦合关系的时空变化特征及相互作用机制。由于社会经济数据多以县域为单元,乡镇及以下尺度的数据获取存在困难,本文未将产业结构、生态工程措施和人为政策等因素纳入到 ESV 格局分异机制的分析框架中。如何更精准地定量研究各驱动因子在不同尺度上对 ESV 的影响,尤其是人类活动中生态工程措施的作用将是后续研究关注的重点。与传统研究方法相比,应用地理探测器在分析地理现象空间分异并揭示其潜在影响因子方面具有独特优势,但其基本原理决定了在揭示驱动要素背后影响机制时具有一定局限性^[41,58]。ESV 的空间异质性是自然和社会经济因子复杂耦合作用的空间现象,在空间分布上具有耦合性的要素不一定具有直接的因果关系,仅从因子解释贡献度难以全面厘清 ESV 的影响机制^[25,50,52]。未来将结合社会调查数据,重视不同影响因素尺度效应,运用质性研究方法探讨 ESV 空间异质性的影响机制。

4.2 结论

(1)示范区 ESV 具有明显的空间异质性,其冷点和热点区集聚性显著,存在一定的尺度依赖性。相对于乡镇尺度,ESV 冷热点区在县域尺度上分布较为集中,并呈面状分布。

(2)示范区人类活动强度与 ESV 耦合程度基本协调一致,生态质量总体状况较好。县域和乡镇尺度生态状况主要属于生态质量优质区(QI)、一般区(QII)和劣质区(QIII),分布在高度耦合 QIV 的县域和乡镇均较少。

(3)ESV 的空间异质性是自然和社会经济因子复杂耦合作用的结果,各因子对 ESV 空间分异的解释力具有尺度依赖性。在交互作用探测中,各影响因素两两交互作用对 ESV 空间分异的影响力均存在协同增强效应。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997.
- [4] De Groot R, Brander L, Van Der Ploeg S, Costanza R, Bernard F, Braat L, Christie M, Crossman N, Ghermandi A, Hein L, Hussain S, Kumar P, McVittie A, Portela R, Rodriguez L C, Ten Brink P, Van Beukering P. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 50-61.

- [5] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, Lacey R E. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. *Ecological Economics*, 2001, 39(3): 333-346.
- [6] Quintas-Soriano C, Martín-López B, Santos-Martín F, Loureiro M, Montes C, Benayas J, García-Llorente M. Ecosystem services values in Spain: A meta-analysis. *Environmental Science & Policy*, 2016, 55: 186-195.
- [7] Xie G D, Zhang C X, Zhen L, Zhang L M. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 146-154.
- [8] 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.
- [9] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 118-126.
- [10] 刘慧敏, 刘绿怡, 丁圣彦. 人类活动对生态系统服务流的影响. *生态学报*, 2017, 37(10): 3232-3242.
- [11] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [12] 南滔, 杨子寒, 毕旭, 付奇, 李波. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例. *中国环境科学*, 2018, 39(9): 3531-3541.
- [13] 李理, 朱连奇, 朱文博, 徐帅博, 李艳红, 马贺. 生态系统服务价值与人类活动强度关联性分析及权衡——以淇河流域为例. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 365-374.
- [14] Wu X, Liu S L, Zhao S, Hou X Y, Xu J W, Dong S K, Liu G H. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1375-1386.
- [15] Xu J Y, Chen J X, Liu Y X. Partitioned responses of ecosystem services and their tradeoffs to human activities in the Belt and Road region. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123205.
- [16] Xu Z H, Wei H J, Fan W G, Wang X C, Zhang P, Ren J H, Lu N C, Gao Z C, Dong X B, Kong W D. Relationships between ecosystem services and human well-being changes based on carbon flow—a case study of the Manas River Basin, Xinjiang, China. *Ecosystem Services*, 2019, 37: 100934.
- [17] Sun Y X, Liu S L, Shi F N, An Y, Li M Q, Liu Y X. Spatio-temporal variations and coupling of human activity intensity and ecosystem services based on the four-quadrant model on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 743: 140721.
- [18] 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.
- [19] 彭建, 吴见, 徐飞雄, 吕俭. 基于价值评估的黄山市生境质量时空演变特征分析. *生态学报*, 2021, 41(2): 665-679.
- [20] 张学斌, 罗君, 石培基, 周亮. 格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 543-553.
- [21] Gong J, Liu D Q, Zhang J X, Xie Y C, Cao E J, Li H Y. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 283-293.
- [22] Liu L B, Wang Z, Wang Y, Zhang Y T, Shen J S, Qin D H, Li S C. Trade-off analyses of multiple mountain ecosystem services along elevation, vegetation cover and precipitation gradients: A case study in the Taihang Mountains. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 94-104.
- [23] Baró F, Gómez-Baggethun E, Haase D. Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: Insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, 2017, 24: 147-159.
- [24] 徐建英, 陈吉星, 刘焱序, 樊斐斐, 魏建瑛. “一带一路”地区生态系统服务关系的时空分异与区域响应. *生态学报*, 2020, 40(10): 3258-3270.
- [25] 耿甜伟, 陈海, 张行, 史琴琴, 刘迪. 基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析. *自然资源学报*, 2020, 35(7): 1714-1727.
- [26] Bai Y, Chen Y Y, Alatalo J M, Yang Z Q, Jiang B. Scale effects on the relationships between land characteristics and ecosystem services—a case study in Taihu Lake Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137083.
- [27] Sun W, Li D H, Wang X R, Li R X, Li K, Xie Y J. Exploring the scale effects, trade-offs and driving forces of the mismatch of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 617-629.
- [28] Shen J S, Li S C, Liu L B, Liang Z, Wang Y Y, Wang H, Wu S Y. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 290: 125193.
- [29] 张亭亭, 鲁成树, 徐鹏, 胡祥伟. 皖南国际文化旅游示范区经济持续发展与土地生态安全协调性研究. *湖南农业科学*, 2015, (11): 142-146.
- [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] 张锐, 刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(7): 945-951.
- [32] 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.
- [33] Kang Y, Cheng C X, Liu X H, Zhang F, Li Z H, Lu S Q. An ecosystem services value assessment of land-use change in Chengdu: Based on a

- modification of scarcity factor. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, 110: 157-167.
- [34] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [35] 吕安民, 李成名, 林宗坚, 史文中. 中国省级人口增长率及其空间关联分析. *地理学报*, 2002, 57(2): 143-150.
- [36] 张立伟, 张运, 黄晨. 皖江城市带近 20a 生态环境变化遥感指数分析. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(5): 1061-1070.
- [37] 李明珍, 李阳兵, 冉彩虹. 土地利用转型背景下的乡村景观格局演变响应——基于草堂溪流域的样带分析. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2283-2298.
- [38] 陈艺, 蔡海生, 张学玲, 曾珩, 邵晖, 洪士林. 基于 MCE 的饶河流域国土空间生态质量综合评价及其空间分异. *生态学报*, 2021, 41(6): 2236-2247.
- [39] 薛陈利, 张会琼, 邹滔, 孙紫坚, 程细音. 中老铁路经济廊带生态质量及其与人类活动的关系. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 638-648.
- [40] 王渊, 赵宇豪, 吴健生. 基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测——以粤港澳大湾区为例. *生态学报*, 2020, 40(23): 8461-8473.
- [41] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 张红. 基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 826-836.
- [42] Li S C, Zhang Y L, Wang Z F, Li L H. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 276-286.
- [43] Saaty T L, Bennett J P. A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy. *Behavioral Science*, 1997, 22(4): 237-245.
- [44] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用. *中国安全科学学报*, 2008, 18(5): 148-153.
- [45] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(4): 623-656.
- [46] 梁龙武, 王振波, 方创琳, 孙湛. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局. *生态学报*, 2019, 39(4): 1212-1225.
- [47] 赵娟, 穆兴民, 王飞, 高鹏, 张捐社. 水资源价值理论的四象限模型探讨. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 134-136.
- [48] 马守臣, 谢放放, 丁翠, 张合兵. 基于四象限模型煤粮复合区景观生态质量时空变化及影响因素. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 259-268.
- [49] 马波, 张越. 文旅融合四象限模型及其应用. *旅游学刊*, 2020, 35(5): 15-21.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 张潇, 张晓瑶, 陆林, 李冬花. 旅游干扰下流域多尺度景观格局演化特征及驱动因素——以新安江流域为例. *生态学报*, 2021, 41(9): 3415-3428.
- [53] 高艳丽, 李红波, 侯蕊. 汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7): 1619-1630.
- [54] Zhou D Y, Tian Y Y, Jiang G H. Spatio-temporal investigation of the interactive relationship between urbanization and ecosystem services: Case study of the Jingjinji urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 152-164.
- [55] Sun Y X, Liu S L, Dong Y H, An Y, Shi F N, Dong S K, Liu G H. Spatio-temporal evolution scenarios and the coupling analysis of ecosystem services with land use change in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 681: 211-225.
- [56] Cui F Q, Tang H P, Zhang Q, Wang B J, Dai L W. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: a case study in Hulunbuir, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984.
- [57] Sun X, Tang H J, Yang P, Hu G, Liu Z H, Wu J G. Spatiotemporal patterns and drivers of ecosystem service supply and demand across the conterminous United States: a multiscale analysis. *Science of the Total Environment*, 2019, 703: 135005.
- [58] 张玥, 许端阳, 王子玉, 张晓宇. 2000-2015 年锡林郭勒盟防风固沙服务功能变化驱动因素分析. *生态学报*, 2021, 41(2): 603-614.