

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.042; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.042.

马超群, 弋志强, 员学锋, 等. 不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及影响因素分析: 以秦岭西安段为例[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 389-399.

Ma Chaoqun, Yi Zhiqiang, Yuan Xuefeng, et al. Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: Taking the Xi'an section of Qinling Mountains as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 389-399.

# 不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及 影响因素分析

——以秦岭西安段为例

马超群<sup>1,2</sup>, 弋志强<sup>1</sup>, 员学锋<sup>1,2</sup>, 张硕蒙<sup>1</sup>, 张莎莎<sup>1</sup>

(1. 长安大学 土地工程学院, 西安 710064; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710064)

**摘要:** [目的] 探究生态系统服务价值空间分异的尺度效应, 为秦岭地区的生态保护和经济发展决策提供参考。[方法] 运用改进当量因子法, 计算了 2020 年秦岭西安段 5 km, 3 km, 2 km, 1 km 和 0.5 km 共 5 个格网尺度水平上的生态系统服务价值; 采用空间自相关分析和冷热点分析归纳了不同尺度下地均 ESV 空间分异特征; 并利用地理探测器对各尺度下的影响因素作用强度进行定量分析。[结果] (1) 地均 ESV 总体上呈北低南高的分布格局, 具有小分散、大集聚的空间分布特征, 并随尺度降低, 其局部越丰富, 但整体性降低; (2) 2 km 尺度适合进行宏观分析和做整体性布局规划, 1 km 尺度适合进行水域变化对区域 ESV 影响的研究; (3) 格网尺度越小, 各影响因素内部差异增加, 其整体性特征减少, 局部特征差异凸显, 空间分异性增强; (4) 人类活动带来的土地利用方式转变显著影响区域生态系统服务价值, 多因素耦合作用显著影响区域地均 ESV 空间分异, 随尺度降低, 其影响减弱。[结论] 秦岭西安段的生态保护要重点关注区域土地利用性质的转变, 可继续加强退耕还林政策, 管控建设用地的规模, 在兼顾生态保护的基础上, 制定经济发展的布局规划。

**关键词:** 生态系统服务价值; 空间分异; 地理探测器; 多尺度; 秦岭西安段

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0389-11

## Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales

— Taking the Xi'an section of Qinling Mountains as an example

Ma Chaoqun<sup>1,2</sup>, Yi Zhiqiang<sup>1</sup>, Yuan Xuefeng<sup>1,2</sup>, Zhang Shuomeng<sup>1</sup>, Zhang Shasha<sup>1</sup>

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Land Renovation, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the scale effect of spatial differentiation of ecosystem service value, and to provide reference for ecological protection and economic development decision-making in the Qinling Mountains region. [Methods] The ecosystem service value of the Xi'an section of the Qinling Mountains in 2020 was calculated with the improved equivalent factor method at five grid scale levels: 5 km, 3 km, 2 km, 1 km, and 0.5 km. The spatial differentiation characteristics of ground average ESV at different scales was analyzed with the spatial autocorrelation analysis and cold hot spot analysis. The intensity of the influencing factors at various scales was quantitatively analyzed with geographic detectors. [Results] (1) The overall distribution pattern of ground average ESV was low in the north and high in the

收稿日期: 2024-05-27

修回日期: 2024-06-29

资助项目: 国家自然科学基金秦岭专项(72349002); 国家自然科学基金项目(42371210); 陕西省重点研发项目(2022ZDLSF07-05); 陕西省土地整治重点实验室开放资助项目(211927180168); 长安大学中央高校资助项目(300102354204)

第一作者: 马超群(1976—), 男, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要从事农村变化研究。E-mail: chaoqunm@chd.edu.cn

通信作者: 员学锋(1977—), 男, 陕西延安人, 博士, 教授, 主要从事农村土地利用与乡村发展。E-mail: zyxifyun@chd.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

south with small dispersion and large agglomeration, and the local ESV became more abundant, while the overall ESV decreased with the scale decreasing. (2) The 2-km scale was suitable for macro analysis and overall layout planning, while the 1-km scale was suitable for studying the impact of water changes on regional ESV. (3) The smaller the grid scale, the greater the internal differences among various influencing factors, resulting in a decrease in overall features, highlighting local feature differences, and enhancing spatial differentiation. (4) The transformation of land use caused by human activities significantly affected the value of regional ecosystem services, and the coupling effect of multiple factors significantly affected the spatial differentiation of regional average ESV. As the scale decreased, its impact weakened. [Conclusion] The ecological protection of the Xi'an section of the Qinling Mountains should focus on the transformation of regional land use nature. The policy of returning farmland to forests should be further strengthened, and the scale of construction land should be controlled. On the basis of considering ecological protection, economic development layout planning can be formulated.

**Keywords:** ecosystem service value; spatial difference; geographic detector; multi-scale; Xi'an section of Qinling Mountains

生态系统服务是指人类从生态系统运行的过程、结构和功能直接或间接获得的所有产品和价值,为人类维持赖以生存的自然环境和生态系统的健康良性发展提供必要的条件和效用<sup>[1-2]</sup>。随着工业化和城市化的发展,人类活动对生态系统的影响已不容小觑,生态系统面临着巨大的压力<sup>[3-4]</sup>。科学量化生态系统服务可以为政府因地制宜制定相应的生态保护政策和调控经济发展的模式提供依据和参考<sup>[5-6]</sup>。因此,生态系统服务价值的定量研究成为国内外学者的热点方向<sup>[7-8]</sup>。

国外学者 Costanza 等<sup>[9]</sup>首先提出科学测算 ESV 当量因子法的原理和方法,用于分析中宏观尺度的生态价值,得到国内外学者的广泛认可并应用到相关领域研究<sup>[10-12]</sup>。中国学者谢高地等<sup>[13]</sup>在此基础上,根据中国的实际,调整和完善了其中的相关因子,为我国相关 ESV 的研究奠定了基础<sup>[14]</sup>。近年来,国内学者在此方法基础上以行政区<sup>[15]</sup>、流域<sup>[16]</sup>和格网<sup>[17]</sup>为评价单元,采用空间自相关分析<sup>[18]</sup>、地理探测器模型等<sup>[19-20]</sup>研究方法,探索 ESV 时空演变规律和影响 ESV 时空分异的因素。其中,构建格网能直观反映研究区 ESV 空间分布特征,以及可定量、模块化分析不同区域时空价值变化,能够和地理探测器、回归模型等方法结合,分析影响生态价值时空分异因素的特征,因此,已有相关研究据此开展分析。约日古丽卡斯木等<sup>[21]</sup>使用 5 km 格网尺度分析新疆艾比湖流域 ESV 时空变化特征,采用多元回归模型对流域生态价值变化的驱动力进行分析。郭椿阳等<sup>[22]</sup>以 3 km 格网尺度为评价单元分析了伏牛山区 ESV 时空分异特征以及 ESV 变化的原因。朱琳娜等<sup>[23]</sup>以 2 km 格网尺度构建 ESV 评估模型、ESV 流向损益模型和双变量空间自相关等模型,探讨了西安都市圈 ESV 与人类活

动强度的时空关系。杨光宗等<sup>[24]</sup>基于 1 km 格网尺度,分析南昌市土地利用变化对 ESV 的影响及其空间格局的变化。陈相等<sup>[25]</sup>以 0.5 km 格网尺度定量分析了 2000—2020 年石林 ESV 的时空演变及权衡与协同关系。在研究 ESV 上,尺度的确定十分重要,在不同尺度下生态系统格局和过程的特征存在明显差异<sup>[17]</sup>。Wiens<sup>[26]</sup>早在 1989 年就提出尺度问题是所有生态研究的基础。但目前,研究者在选择格网尺度时,或者根据研究区面积的大小酌情选取,或者依据前人在相同研究区或同类型研究区的尺度直接应用,尺度确定的主观性较强;通过最小可塑性单元对生态价值空间分布的影响,确定研究区格网尺度虽一定程度上降低了尺度确定的主观性,但这仅考虑到生态价值在空间上分布的整体性,并未考虑影响因素在不同尺度下作用强度会发生变化。生态系统服务功能的形成与一定的时空尺度上生态系统结构和运行过程有密切联系,其主导作用和效果随时空尺度变化会发生相应改变<sup>[27]</sup>。

秦岭生态系统类型多样且复杂,生态价值显著但也极其脆弱,是国家生态保护的重点区域之一。围绕秦岭开展 ESV 的格网尺度研究,可更好反映格网尺度变化带来的 ESV 空间分异和影响因素响应特征的改变。因此,本文选择秦岭西安段为研究区,使用 2020 年土地利用类型数据,利用 Arc GIS 划分得到 5 km, 3 km, 2 km, 1 km 和 0.5 km 共 5 个格网尺度,运用空间自相关分析、热点分析和地理探测器等分析方法,分析不同尺度下生态价值空间分异以及影响因素作用大小,以期探索格网尺度变化对秦岭西安段 ESV 空间分布的影响和影响因素作用大小,为促进区域生态保护和制定发展决策提供一定的科学依据和尺度参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

秦岭西安段(图 1)地处秦岭中段,其北邻西安市区,西接宝鸡市的太白县和眉县,南接汉中市的佛坪县、安康市的宁陕县和商洛市的柞水县,东接商洛市的商州区和洛南县,区域涵盖了西安市的周至县、鄠邑区、长安区和蓝田县共 4 个辖区部分范围,其包括 39 个镇及街道,面积 0.6 万 km<sup>2</sup>。秦岭西安段作为西安市的生态屏障,不仅肩负着西安市的用水安全,而且承载了调控径流,净化水体、调节气候等多重生态功能。该段受西安市城镇化进程影响显著,人类活动强烈,潜在生态风险增加。其北部区域为平原,耕地、城镇及村落分布较多,城镇化和人类活动对该区域生态环境影响显著,面临着环境污染、水资源污染和毁林开耕等问题;南部区域绝大部分为山地,树木茂密,动植物资源丰富,同时也蕴涵着大量矿产资源,开采过程中存在的环境污染、植被破坏、水土流失及土地退化等问题对区域生态环境影响明显。

1.2 数据来源

本文用于分析 ESV 空间分异的影响因素主要有两方面,分别为自然因素和社会经济因素。选取的自

然因素依次为高程、坡度、降水、气温和 NDVI(高程和坡度通过 ArcGIS10.2 对 DEM 提取得到);社会经济因素依次为县域 GDP、人口密度、土地利用综合度、人为影响综合指数和道路密度。道路密度通过提取单位格网上的道路长度计算得出。通过 ArcGIS 的自然断点法对各影响因素进行分级,分级数依据各因素特点确定。

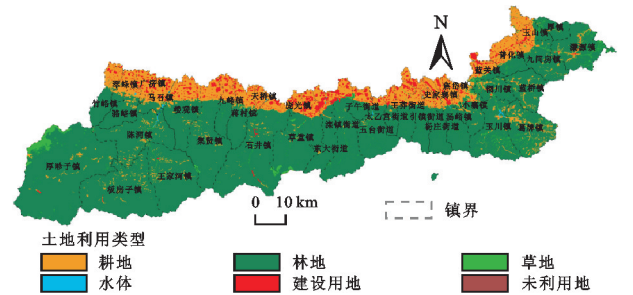


图 1 秦岭西安段土地类型图

Fig. 1 Land type map in Xi'an section of Qinling Mountains

研究所使用的 2020 年土地利用数据,空间分辨率为 30 m,来自国家基础地理信息中心:<http://www.webmap.cn/mapDataAction.do?method=globalLandCover>。粮食产量数据来源于 2020 年的《西安统计年鉴》,粮食价格从 2020 年《全国农产品成本收益资料汇编》得到。其他数据情况见表 1。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据名称	数据类型	时间	分辨率	数据来源
数字高程数据/DEM	栅格	2020	30 m×30 m	地理空间数据云
降水	栅格	2020	1000 m×1000 m	国家地球系统科学数据中心
气温	栅格	2020	1000 m×1000 m	国家地球系统科学数据中心
归一化植被指数	栅格	2020	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
县域 GDP	栅格	2020	1000 m×1000 m	西安市统计年鉴
人口密度	栅格	2020	1000 m×1000 m	国家地球系统科学数据中心
路网	矢量	2020		中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据云平台

2 研究方法

2.1 土地利用综合度

土地利用综合度可以综合反映区域的土地利用程度,也间接反映社会经济发展引起的土地利用变化结果。根据庄大方等<sup>[28]</sup>提出的土地利用程度分级赋值表,由表 2 可知,其计算通过 ArcGIS 统计单位格网内的各土地利用类型的面积,再乘以相应土地利用类型的分级指数计算得到。

表 2 土地利用程度分级赋值表

Table 2 The classification values of land use degree

土地利用类型	未利用地	林地、草地、水域	耕地	建设用地
分级指数	1	2	3	4

2.2 人为影响综合指数

人类活动与景观格局变化存在很强的关联性,景观类型的原始自然特性随人类活动增强而逐渐降低,且不同的景观类型对应不同的人类开发利用强度<sup>[29]</sup>。因此,本文采用人为影响综合指数来表述人类活动对区域内景观类型总体的干扰强度,公式如下:

$$HAI = \sum_{i=1}^N A_i P_i / TA \tag{1}$$

式中:HAI 为人为影响综合指数;N 为景观类型的总量,本文划分为 6;A<sub>i</sub>为第 i 种景观类型的面积;P<sub>i</sub>为第 i 种景观类型对应的人为影响强度系数;TA 为所有景观类型的面积。本文参考严恩萍等<sup>[29]</sup>研究计算方法,得到秦岭西安段各景观类型的人为影响强度系数(表 3)。

表 3 秦岭西安段各景观类型人为影响强度系数

景观类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
人为影响强度系数	0.65	0.13	0.1	0.11	0.95	0.07

2.3 生态系统服务价值当量表及敏感性分析

本文根据谢高地等改进的当量因子法来计算研究区的生态系统服务价值,通过查阅《西安统计年鉴》等资料,确定研究区主要种植的农作物为玉米和小麦,经计算其单位面积产量分别为 5 842.7 kg/hm<sup>2</sup>, 4 951.5 kg/hm<sup>2</sup>。通过查阅《中国农产品价格调查年

鉴》,获得 2020 年玉米和小麦单价分别为 2.243 元/kg 和 2.328 元/kg,经计算研究区的平均粮食作物市场经济价值为 12 316.13 元/hm<sup>2</sup>,单位面积耕地生态系统服务价值按平均粮食作物单产市场经济价值的 1/7 计算<sup>[13]</sup>,最后得到单位面积生态系统服务价值系数见表 4。

表 4 秦岭西安段单位面积生态系统服务价值系数

Table 4 Factor table of ecosystem services value per unit area in Xi'an section of Qinling Mountains		生态系统服务价值(元·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )					
一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1495.53	439.86	668.59	1407.56	0	17.59
	原料生产	703.78	1020.48	985.29	404.67	0	52.78
	水资源供给	35.19	527.84	545.43	14585.84	0	35.19
调节服务	气体调节	1178.83	3360.55	3466.12	1354.78	0	193.54
	气候调节	633.40	10046.46	9166.74	4029.14	0	175.95
	净化环境	175.95	2938.28	3026.25	9764.95	0	545.43
	水文调节	475.05	6580.34	6721.10	179886.20	0	369.48
支持服务	土壤保持	1812.23	4081.92	4222.68	1636.29	0	228.73
	维持养分循环	211.13	316.70	316.70	123.16	0	17.59
	生物多样性	228.73	3730.03	3835.60	4486.60	0	211.13
文化服务	美学景观	105.57	1636.29	1689.07	3325.36	0	87.97
合计		7055.39	34678.75	34643.57	221004.55	0	1935.38

基于 ArcGIS 10.2,得到各尺度格网单元内的各土地类型面积,根据表 2,获得各土地类型的单位面积所提供的生态系统服务价值系数,最终可计算格网单元的生态系统服务价值。公式<sup>[30]</sup>如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^m U_i \times P_i \tag{2}$$

式中:ESV 为格网单元的生态系统服务价值(元/a); $U_i$ 表示第*i*种土地类型单位面积所提供的各种生态功能的价值系数总和[元/(hm<sup>2</sup>·a)]; $P_i$ 为格网单元内第*i*种土地类型的面积(hm<sup>2</sup>);*i*为土地类型;*m*为土地类型的数量为 6。

使用敏感性指数(CS)判别生态系统服务价值受价值系数的影响程度,以增强结果的准确度<sup>[31]</sup>。公式如下:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(\beta_{ja} - \beta_{ia}) / \beta_{ia}} \right| \tag{3}$$

式中:CS 为敏感性指数;ESV 为生态系统服务价值总量; $\beta$ 为 ESV 价值系数;*i*,*j* 分别表示原始价值当量系数和研究区的价值当量系数;*a* 为土地类型。当

$\beta$  变化 1% 时引起 ESV 的变化后,若  $CS > 1$  时,说明 ESV 对  $\beta$  富有弹性;若  $CS < 1$  时,则缺乏弹性。

2.4 生态系统服务价值空间分析

2.4.1 全局空间自相关分析 使用空间自相关分析得到不同尺度下地均 ESV 的空间分布特征,即其是否呈现聚集或离散的趋势以及这种趋势的强度和显著性。公式<sup>[18]</sup>如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - x_a) (x_j - x_a)}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_a)^2} \tag{4}$$

式中:*I* 是 Global Moran's *I* 指数; $x_i$  和  $x_j$  分别为第*i*个 ESV 评价单元和第*j*个 ESV 评价单元的观测值; $W_{ij}$ 为单元*i*和单元*j*之间的空间权重矩阵; $x_a$ 为 ESV 平均值; $(x_i - x_a)$ 为第*i*个格网单元上测度值与平均值的偏差;*n*为样本量,即不同格网尺度下的格网数量。

2.4.2 冷热点分析 使用冷热点分析能探测高值聚集和低值聚集并且可以显示被全局分析掩盖了的局



部小范围的相关性。使用该方法是为了揭示各格网尺度下地均 ESV 局部分布特征,公式<sup>[32]</sup>如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n W_{ij}(d)x_j}{\sum_j^n x_j} \quad (5)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{var}(G_i^*)}} \quad (6)$$

式中: $E(G_i^*)$ 和  $\text{var}(G_i^*)$ 分别为  $G_i^*$  的数学期望和方差; $W_{ij}$ 为空间权重。取  $Z(G_i^*) > 2.58$ ,为热点区; $Z(G_i^*)$ 在  $1.96 \sim 2.58$  之间,为次热点区; $Z(G_i^*)$ 在  $-1.96 \sim 1.96$  之间,为不显著变化区; $Z(G_i^*)$ 在  $-1.96 \sim -2.58$  之间,为次冷点区; $Z(G_i^*) < -2.58$ ,为冷点区。

## 2.5 地理探测器

本文使用因子探测和交互探测对各格网尺度下研究区地均 ESV 影响因素进行分析,揭示不同尺度下影响因素作用大小变化以及多因素耦合作用变化。交互作用探测器通过比较单一因子的  $q$  值和双因子交互的  $q$  值来判断双因子交互类型,即交互探测结果  $q(x_i \cap x_j)$  值提高或降低了单因子对因变量的解释力<sup>[27]</sup>。

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

式中: $h=1,2,\dots,L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分类或分区; $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $h$  和全区  $Y$  值的方差。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统服务价值的空间分异

在 2020 年秦岭西安段的生态系统服务价值系数中,水域的贡献比最高,达到了 73.84%,林地和草地占比次之,依次为 11.59% 和 11.57%(见表 4)。因此,水域面积占比高的格网,其地均 ESV 值相对最高;林草地占比高的格网,其地均 ESV 值相对较高;建设用地占比高的格网,其地均 ESV 值相对最低;格网的 ESV 等级由其内部分布的地类面积决定。经敏感性分析得出,各地类的 CS 值均小于 1,表明生态系统服务总量受各地类的 ESV 系数影响不明显,因此本文所使用的生态系统服务价值系数适用于研究区。

研究区边界区域格网破碎,划分的地类面积少,使该区域计算出的生态系统服务价值低,因此本文使用地均 ESV(单位面积上的 ESV)来减少这种影响。应用 ArcGIS 的自然断点法对 5 个格网尺度的地均 ESV 进行分级,可分为 5 个等级,其中红色表示低值区,橙色表示较低值区,绿色表示中值区,淡蓝色表示

较高值区,深蓝色表示高值区(见图 2)。总体而言,研究区内生态系统服务价值低值区主要分布在北部建设用地与耕地聚集区,城镇和村庄分布较多,地势平坦;较低值区分布在北部耕地、建设用地聚集区与林地的过渡地带;中值区主要分布在地类过渡带和东、西部的耕地分布区;较高值区与高值区主要分布在南部林草地与水域范围。从格网尺度变化来看,研究区内生态系统服务价值的分布格局随尺度变化发生一定程度的改变。尺度由 5 km 降至 3 km,低值区向南部扩展,其仍保持内部连贯性,在北部地类过渡带,较低值区与中值区分布基本呈现此消彼长;尺度降至 2 km,1 km 和 0.5 km,北部耕地、建设用地聚集区内分布的少量水域和林草地由高值区、较高值区和中值区逐尺度显示,低值区的连贯性下降。在 5 km,3 km 和 2 km 尺度下,东、西部耕地分布区基本由中值区单一呈现;尺度降至 1 km,0.5 km,其分布变为由内而外呈现低值区、较低值区和中值区的趋势,分布细节显著提升,但整体性特征明显下降。不同等级区的连贯性,随斑块尺度减小,发生先增后减的变化,在 3 km 水平上地均 ESV 各等级区分布的连贯性最强。随尺度降低,较高值区与高值区分布格局发生明显改变,在大尺度下,较高值区分布在南部林草地区域,分布范围最大,高值区与大面积水域分布基本一致;尺度降至 1 km,0.5 km,较高值区与高值区呈现在林、草地交错分布的格局,研究区内西以 108 国道为核心、东以蓝小公路为核心的低值区显现,承载的地类信息增加的同时,地均 ESV 空间分布的复杂度显著提升。研究区内尺度越小,局部越丰富,但整体性降低。

### 3.2 生态系统服务价值空间分异特征分析

3.2.1 生态系统服务价值全局空间自相关分析 为揭示尺度变化对地均 ESV 空间分布的影响,利用空间自相关分析,得出秦岭西安段在各格网尺度下的 Moran's  $I$  值和  $Z$  值。结果显示,研究区地均 ESV 在各尺度下的 Moran's  $I$  值均大于 0, $Z$  值均大于 2.58,表明其空间自相关性  $Z$  检验为显著性( $p < 0.01$ ),均具有较强的空间集聚性。地均 ESV 在 5 个格网尺度下的 Moran's  $I$  指数呈现先上升后下降的趋势(见图 3),整体较为平缓,其最大值位于 3 km 格网尺度下,表明在 3 km 格网尺度下,其空间集聚性最大。说明虽然研究区随格网尺度减小分割,格网数量增加,承载的地类信息逐渐丰富的同时,由网格内地类过渡导致的地均 ESV 等级改变并未同步。这一

现象反映出研究区内,地均 ESV 的空间分布特征具有小分散、大集聚的特点,而 3 km 是研究区格网尺度与格网内 ESV 信息差异匹配较好的水平。

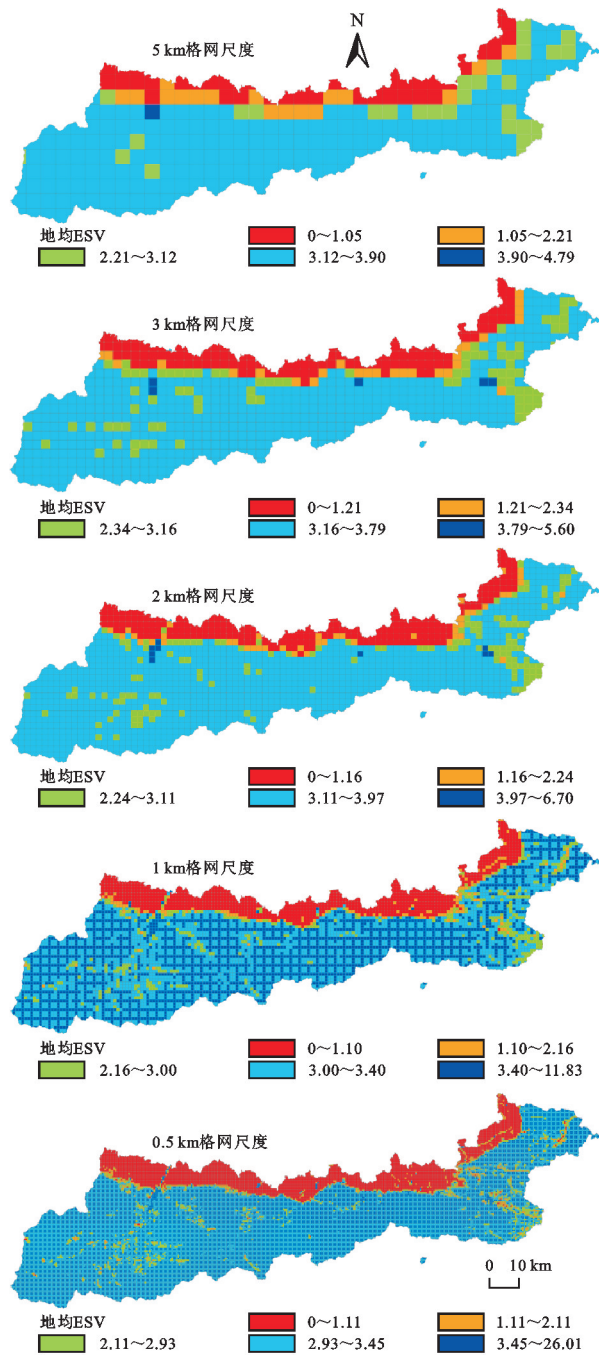


图 2 不同格网尺度下地均 ESV 的空间分布

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

3.2.2 生态系统服务价值局部空间相关性分析 为更准确揭示格网尺度变化带来的地均 ESV 的局部空间格局变化,采用冷热点分析法探究不同格网尺度下秦岭西安段地均 ESV 冷热点区的空间分布特征。总的来看,不同格网尺度下地均 ESV 的冷热点区分布格局基本一致(图 4):研究区分布面积最大的为不显

著区;冷点区域聚集分布在研究区北部耕地、建设用地聚集区;热点区域分布最少且分散,零星分布于研究区东部和西部的水域范围。

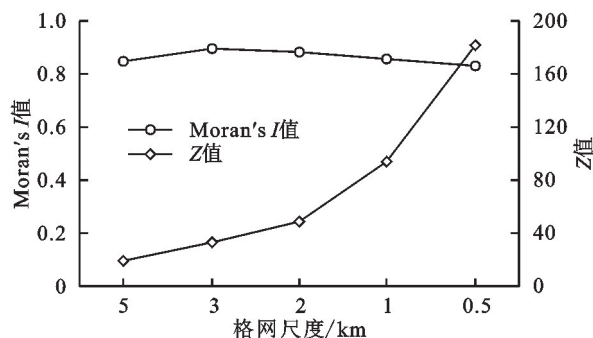


图 3 不同格网尺度下地均 ESV 的 Moran's I 值和 Z 值

Fig. 3 Moran's I-value and Z-values of ESV per hectare at various grid scales

随着格网尺度的降低,冷点区域的空间分布大体上保持不变,呈集中分布于研究区的北部,但其内部细节增加,在 1 km 和 0.5 km 格网尺度下,少量分布在研究区北部的水系和小范围水域被从冷点区域中剥离,在 1 km 格网尺度下变为不显著区。这是因为在该尺度下,水域聚集区被分割在少数邻近格网中,其地均 ESV 值虽高,但由于格网数量不多,难以在统计学内确定为高值的分布有显著的空间自相关性。在 0.5 km 格网尺度下部分转换为热点区域,这是因为在更小尺度下,水域聚集区被分割的格网数量增加,其上的地均 ESV 高值在统计学上有了明显的空间聚类性,因此部分转换为热点区域。热点区域随着格网尺度的变化相对冷点区域变化明显,特别是小面积的水域聚集区在随格网尺度降低,以热点区域的形式逐尺度显示出,并在 0.5 km 尺度下最接近水域分布范围,但同时在该尺度下,热点区域也更为零散。在 1 km 尺度下,热点区域分布的整体性最强,既反映了水域聚集区的分布特征,又舍弃了局部小水域冗余的分布细节,因此该尺度适合进行水域变化对区域生态系统服务价值影响的研究;2 km 尺度在保证冷、热点区域分布特征整体性的基础上,又能最大程度反映研究区大面积水域和北部耕地、建设用地交错区的分布特征,该尺度适合进行宏观分析和做整体性布局规划。

格网单元越小,其内部细节特征越明显,整体性特征越难以归纳。单一尺度难以满足不同评价的要求,因此,在选择评价单元尺度时,要根据研究目的、方法和满足人类决策的需要,进行针对性选择。多尺度综合评价的方法有利于归纳和总结出各尺度下的特征和其之间的差异性,为人们在确定评价单元尺度时提供参考和依据。

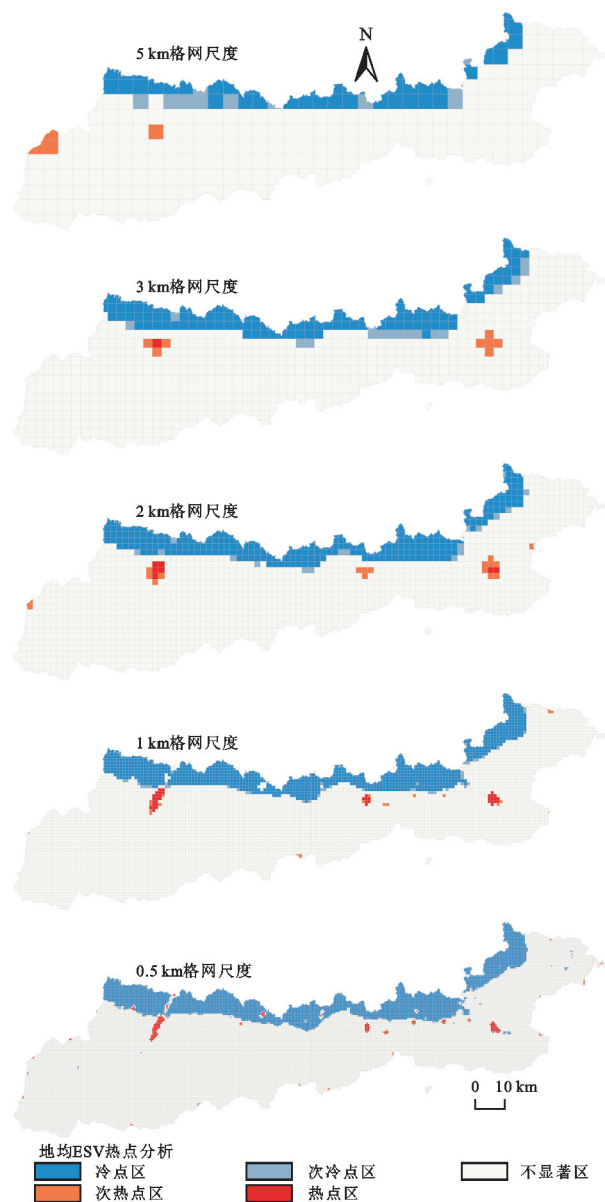


图 4 不同格网尺度下地均 ESV 冷热点空间分布

Fig. 4 Density and hotspot Spatial distribution of ESV per hectare at various grid scales

### 3.3 多尺度生态系统服务价值影响因素分析

3.3.1 生态系统服务价值空间分异的影响因子探测 由图 5 看出,随着格网尺度的降低,各驱动因素  $q$  统计量总体上都呈下降趋势,这说明格网尺度越小,各影响因素内部差异增加,其整体性特征减少,局部细节特征差异凸显,空间分异性增强。自然因素和社会经济因素共同导致秦岭西安段地均 ESV 空间差异性,但在不同尺度下,因子作用强度并不一致。社会经济因素中的人为影响综合指数和土地利用综合度在各格网尺度中  $q$  统计量均处于前两位,表明人类活动带来的土地利用方式转变显著影响研究区生态环境。5 km 尺度下  $q$  统计量大于 0.8 为人为影响综合指数、土地利用综合度、人口密度、坡度、气温和高程,共 6 个因素,表明该尺度地均 ESV 受所选影响因素作用最

显著;尺度降至 3 km, 2 km 和 1 km,  $q$  统计量大于 0.8 的为人为影响综合指数和土地利用综合度,表明在这 3 个尺度下,人类活动带来的土地利用方式转变为秦岭西安段 ESV 空间分异的主导因素,人口密度、坡度、气温和高程的  $q$  统计量随尺度降低,下降明显,这是因为这 4 个影响因素在 5 km 尺度下,整体性分布特征与研究区 ESV 空间分布的整体特征一致性较强,但随着尺度降低,不同影响因素的局部特征显现,因素间分布差异性及其与研究区 ESV 空间分布特征的区别逐渐增加,而人为影响综合指数和土地利用综合度是对土地类型数据进行赋值加权得到的,当量因子法计算生态系统服务值的本质也与其基本一致,因此两者的显著性降低不明显;在 0.5 km 尺度下,  $q$  统计量大于 0.6 的为人为影响综合指数、土地利用综合度和坡度,表明在小尺度下,地均 ESV 空间分异性增强及影响因素局部特征凸显导致不同因素显著性较更大尺度降低,但主导因素基本保持不变。

人为影响综合指数	0.967	0.942	0.920	0.860	0.796
土地利用综合度	0.963	0.945	0.912	0.854	0.788
道路密度	0.469	0.425	0.365	0.272	0.165
人口密度	0.823	0.747	0.650	0.608	0.558
县域GDP	0.016	0.019	0.016	0.012	0.011
NDVI	0.032	0.030	0.023	0.013	0.013
坡度	0.856	0.695	0.715	0.642	0.601
气温	0.827	0.760	0.689	0.553	0.431
降水	0.384	0.321	0.257	0.232	0.198
高程	0.878	0.705	0.622	0.568	0.546
	5 km	3 km	2 km	1 km	0.5 km

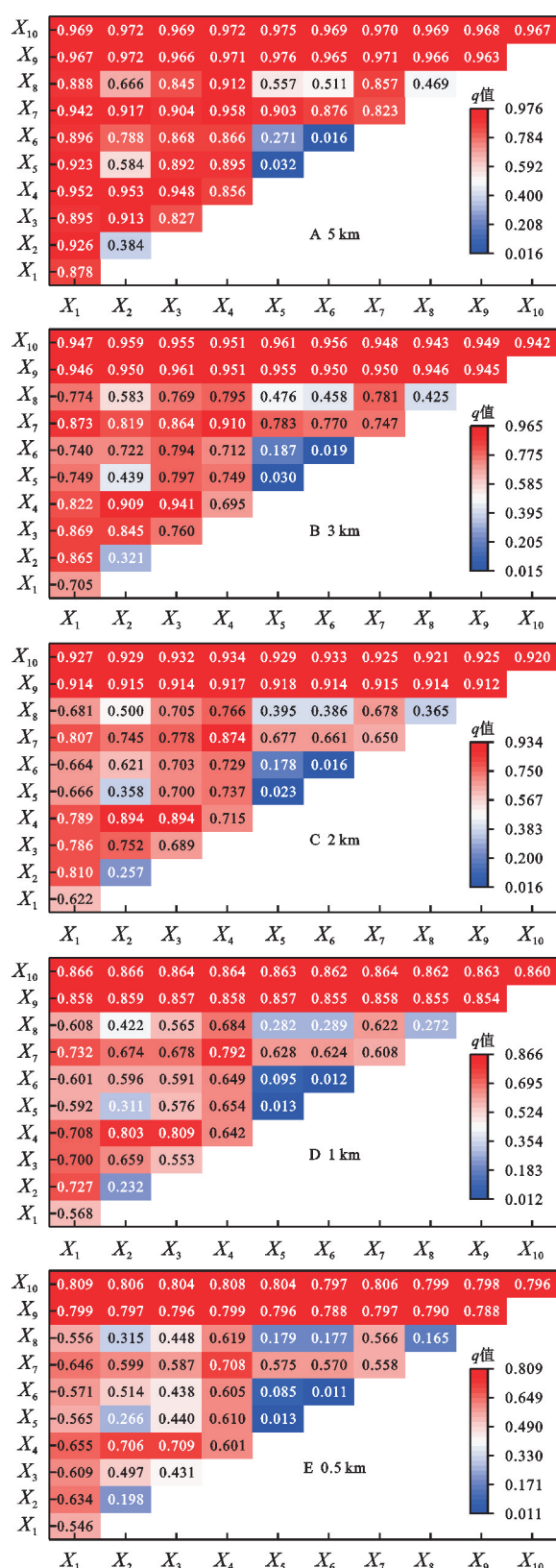
图 5 不同格网尺度下影响因素贡献率变化图

Fig. 5 Change of contribution rate of influencing factors at different grid scales

3.3.2 生态系统服务价值空间分异的影响因子交互探测 由于在不同尺度上,因素交互程度发生变化,也会影响 ESV 的差异。使用交互探测来判断两个因子 A 和 B 的共同作用对地均 ESV 的作用类型。结果表明,在各尺度上任意两影响因素的交互作用对研究区地均 ESV 空间分布都大于单因子的作用(见图 6),两两交互的类型均为线性增强和非线性增强(线性增强多),表明研究区各尺度地均 ESV 空间分异受多个因子综合影响,不是单个因子引起的。

从整体上看, HAI、土地利用综合度在各尺度上与其他因子交互作用均呈显著增强,表明人类活动带来的土地利用方式转变对区域生态系统服务价值影响最为显著。但在各尺度上对研究区地均 ESV 空间分布影响最大的双因子交互作用均不同。在 5 km 尺度下为土地利用综合度  $\cap$  ndvi,  $q$  值为 0.976。在 3 km 尺度下为 HAI  $\cap$  ndvi,  $q$  值为 0.961。在 2 km 尺度下为 HAI  $\cap$  坡度,  $q$  值为 0.934。在 1 km 尺度下为 HAI  $\cap$  降水,  $q$  值为 0.866。在 0.5 km 尺度下为 HAI  $\cap$  高程,  $q$  值为 0.809。





注:  $X_1$  为高程,  $X_2$  为降水,  $X_3$  为气温,  $X_4$  为坡度,  $X_5$  为 ndvi,  $X_6$  为县域 GDP,  $X_7$  为人口密度,  $X_8$  为道路密度,  $X_9$  为土地利用综合度,  $X_{10}$  为人为影响综合指数/HAI。

图 6 不同网格尺度下地均 ESV 影响因素交互探测结果

Fig. 6 The result of interaction detector of influencing factors of ESV per hectare at various grid scales

同时,在不同尺度水平下,具有显著影响的交互

因子数量也有较大不同。在 5 km 尺度下,双因子交互作用结果  $q$  值普遍较大,除了降水  $\cap$  ndvi、降水  $\cap$  道路密度、降水  $\cap$  县域 GDP, ndvi  $\cap$  县域 GDP, ndvi  $\cap$  道路密度和县域 GDP  $\cap$  道路密度外,其他双因子交互作用  $q$  值均大于 0.8,表明在该尺度下研究区地均 ESV 空间分布受影响因素耦合作用影响最大,同时值得注意的是在该尺度下,多个因子交互探测结果之间  $q$  值在各尺度中最大且接近,难以确定主导因子;在 3 km 尺度下,各影响因素双因子交互作用  $q$  值大于 0.8 的个数减少,多因素耦合作用减弱,其中,高程、降水、气温和坡度彼此间交互结果仍大于 0.8,以及人口密度与四者交互作用也大于 0.8,表明在该尺度下自然因素和社会经济因素交织,共同影响区域生态系统服务价值;在 2 km, 1 km 和 0.5 km 尺度下,显著因子交互作用进一步减弱,在 HAI、土地利用综合度与其他各因子交互作用继续保持显著增强外,降水  $\cap$  坡度、气温  $\cap$  坡度和坡度  $\cap$  人口密度仍呈显著增强,表明随着尺度降低,研究区地均 ESV 空间分异对各影响因素作用大小趋于稳定,呈现人类活动带来的土地利用方式转变对区域生态服务价值占主导,自然因素次之的特点。

## 4 讨论

采用谢高地改进的当量因子法,测算生态系统服务价值,优点是方便快捷,但其不足处也十分明显。由于人与环境系统的交互方式复杂多样以及存在明显的空间异质性,然而应用该方法测算不同类型区域的生态系统服务价值,存在价值泛化和生态功能间价值转化误差等问题;基于经验关系的生态服务价值货币化测算中存在的可靠性、有效性和不确定性仍有待解决<sup>[30,33]</sup>。

本文使用地均 ESV 来表示研究区生态系统服务价值空间分异的等级变化,在一定程度上虽减少了边界网格破碎导致其生态价值低的情况,但在研究时间序列上的 ESV 变化时,地均 ESV 并不能满足分析研究区 ESV 总量变化,因此在基于网格尺度分析时,如何两者同时解决仍需进一步研究。

在网格尺度由 5 km 下降到 1 km, 0.5 km, 地均 ESV 空间分布格局发生明显改变,但对其进一步进行冷热点分析,结果显示冷热点区域分布格局并未发生显著变化,这是因为水域对地均 ESV 贡献比最高,高值区位于水域聚集区,在 5 km 至 2 km 尺度下,水域被较大的网格分割在一个网格单元或相邻的少数



格网单元内,高值区的地均 ESV 显著高于其他等级区,呈零散分布在水域范围上;格网尺度降至 1 km, 0.5 km,水域被分割在多个格网单元,面积占比减少,其上的地均 ESV 值未显著高于林草地分布区上格网单元的地均 ESV 值,因此采用自然断点法对地均 ESV 分级时,高值区向林草地分布区扩展。

秦岭西安段地类变化相对简单,因此生态价值空间分异随尺度变化研究中,需重点关注地类过渡导致的生态价值分布转变。在使用地理探测器分析影响因素作用大小随尺度变化中,5 km 尺度下,地均 ESV 受所选影响因素作用最显著,因素间耦合作用也最大,但这是由于该尺度的格网单元高度概括了区域内地类变化引起的地均 ESV 等级变化,影响因素分布特征的局部差异也被整体性特征所掩盖,呈现出多个影响因素因子探测和交互探测结果均显著的现象。因此,对于地类变化较单一、地类间空间分布构成较简单的小区域,应用大尺度格网时,需结合研究目的与分析决策谨慎选取。

地理探测器用于找出影响生态系统服务价值空间分异的主导因子及其展现因子交互特征,是较好的分析手段,但因变量分析结果受自变量因子数据的精度、离散化分级的标准等影响明显,需进一步改进和制定相应的规范和标准来提高该方法应用的可靠性和准确性。且本文影响因素的选择主要在前人相关研究的基础上确定,可能不够全面,在今后的研究中还需综合考量加以完善。

## 5 结论

本文以秦岭西安段为研究区,使用空间自相关分析和冷热点分析得出不同格网尺度下研究区 ESV 空间分布特征,并基于地理探测器揭示格网尺度变化带来的影响因素对生态价值空间分异作用大小的改变,以及各因素交互作用受尺度变化的影响,结论如下:

(1) 在不同格网尺度下,研究区地均 ESV 空间分布总体上较一致,呈现北低南高的分布格局。地类过渡带上地均 ESV 空间分布复杂性随尺度降低逐渐增大,局部越丰富,承载地类信息增多,但整体性降低,其中 3 km 尺度下,地均 ESV 空间聚集性最大,表明地均 ESV 具有小分散、大集聚的空间分布特征,该尺度是研究区格网尺度与格网内 ESV 信息差异匹配较好的水平。

(2) 冷热点分析结果表明,冷点区域与热点区域的分布格局随尺度变化基本保持稳定,冷点区域位于

北部耕地、建设用地上,低值区,热点区域与水域分布范围的高值区基本一致。其中,2 km 尺度在保证地均 ESV 低值区与高值区分布整体性的基础上,又能最大程度反映研究区大面积水域和北部耕地、建设用地交错区的分布特征,该尺度适合进行宏观分析和做整体性布局规划;1 km 尺度下,热点区域分布的整体性最强,既反映了水域聚集区的分布特征,又舍弃了局部小水域冗余的分布细节,适合进行水域变化对区域生态系统服务价值影响的研究。

(3) 因子和交互探测结果表明,格网尺度越小,各影响因素内部差异增加,其整体性特征减少,局部细节特征差异凸显,空间分异性增强。其中,在各尺度下,人类活动带来的土地利用方式转变均为显著影响研究区 ESV 的原因;多因素耦合作用显著影响区域地均 ESV 空间分异,随格网尺度降低,其影响逐渐减弱。在 3 km 尺度下,研究区地均 ESV 空间分布受社会经济因素和自然因素共同作用最显著;在 2 km 至 0.5 km 尺度下,研究区地均 ESV 空间分异对各影响因素作用大小趋于稳定,呈现人类活动带来的土地利用方式转变对区域生态服务价值占主导,自然因素次之的特点。

### 参考文献 (References):

- [1] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5): 607-613.  
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 607-613.
- [2] Costanza R, de Groot R, Braat L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? [J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 1-16.
- [3] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, et al. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation[J]. Nature Communications, 2016, 7: 12558.
- [4] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].地理学报,2019,74(3):446-459.  
Zhu W B, Zhang J J, Cui Y P, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 446-459.
- [5] Jia Z X, Wang X F, Feng X M, et al. Exploring the

- spatial heterogeneity of ecosystem services and influencing factors on the Qinghai Tibet Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2023,154:110521.
- [6] 殷楠,王帅,刘焱序.生态系统服务价值评估:研究进展与展望[J].*生态学杂志*,2021,40(1):233-244.
- Yin N, Wang S, Liu Y X. Ecosystem service value assessment: Research progress and prospects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021,40(1):233-244.
- [7] 马舒意,黄小兰,黄晶.环鄱阳湖城市群生态系统服务价值时空变化及权衡协同关系[J].*水土保持研究*,2024,31(3):391-400.
- Ma S Y, Huang X L, Huang J. Temporal and spatial variation of ecosystem service value and its trade-offs and synergies in the urban agglomeration around Poyang Lake [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(3):391-400.
- [8] Naime J L, Mora F, Sánchez-Martínez M, et al. Economic valuation of ecosystem services from secondary tropical forests: Trade-offs and implications for policy making[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 473:118294.
- [9] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387:253-260.
- [10] Li C, Wu Y M, Gao B P, et al. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,132:108328.
- [11] Zhao Y Q, Han Z L, Yan X L, et al. Integrating spatial heterogeneity into an analysis between ecosystem service value and its driving factors: A case study of Dalian, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022,19(24):17055.
- [12] 谢梦,吴伟成.赣东北土地利用及景观格局变化对生态系统服务价值的影响[J].*水土保持研究*,2024,31(3):331-341.
- Xie M, Wu W C. Effects of land use and landscape pattern changes on ecosystem service value in northeast Jiangxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(3):331-341.
- [13] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].*自然资源学报*,2003,18(2):189-196.
- Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003,18(2):189-196.
- [14] 郑博福,黄琼瑶,陶林,等.赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响[J].*生态学报*,2021,41(15):5940-5949.
- Zheng B F, Huang Q Y, Tao L, et al. Landscape pattern change and its impacts on the ecosystem services value in southern Jiangxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(15):5940-5949.
- [15] 李胡跃,戴全厚,胡泽银,等.黔中城市群生态系统服务价值评估及预测[J].*水土保持研究*,2024,31(4):248-257.
- Li H Y, Dai Q H, Hu Z Y, et al. Evaluation and prediction of ecosystem service value in urban agglomeration of Central Guizhou[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(4):248-257.
- [16] 严长安,杨汝兰,付潇华,等.土地利用变化对滇池流域生态系统服务价值的影响[J].*生态学报*,2023,43(15):6194-6202.
- Yan C A, Yang R L, Fu X H, et al. Impact of land-use change on ecosystem services value in Dianchi Lake Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(15):6194-6202.
- [17] 危小建,辛思怡,张颖艺,等.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[J].*生态学报*,2023,43(18):7585-7597.
- Wei X J, Xin S Y, Zhang Y Y, et al. Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: Taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(18):7585-7597.
- [18] 李琛,吴映梅,高彬斌.滇中城市群城镇化与资源环境承载力耦合协调研究[J].*水土保持研究*,2022,29(2):389-397.
- Li C, Wu Y M, Gao B P. Research on coupling and coordination of urbanization and resources and environmental carrying capacity in city agglomeration of central Yunnan [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(2):389-397.
- [19] Fang L L, Wang L C, Chen W X, et al. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,314:127995.
- [20] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [21] 约日古丽卡斯木,杨胜天,孜比布拉·司马义.新疆艾比湖流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].*农业工程学报*,2019,35(2):260-269.
- Yueriguli K S M, Yang S T, Zibibula S M Y. Impact of land use change on ecosystem service value in Ebinur Lake

- Basin, Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 260-269.
- [22] 郭椿阳,高尚,周伯燕,等.基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J].生态学报, 2019, 39(10): 3482-3493.
- Guo C Y, Gao S, Zhou B Y, et al. Effects of land use change on ecosystem service value in Funiu Mountain based upon a grid square[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [23] 朱琳娜,赵牡丹,李云维,等.西安都市圈生态系统服务价值与人类活动强度的时空关系[J].生态与农村环境学报, 2024, 40(3): 325-334.
- Zhu L N, Zhao M D, Li Y F, et al. The space-time relationship between the ecosystem service value and the human activity intensity in Xi'an metropolitan area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(3): 325-334.
- [24] 杨光宗,吕凯,李峰.基于格网尺度的南昌市土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J].中国土地科学, 2022, 36(8): 121-130.
- Yang G Z, Lyu K, Li F. Spatial and temporal correlation analysis of land use change and ecosystem service value in Nanchang city based on grid scale[J]. China Land Science, 2022, 36(8): 121-130.
- [25] 陈相标,丁文荣.石林喀斯特岩溶区生态系统服务时空演变及权衡协同关系[J].水土保持研究, 2023, 30(2): 285-293.
- Chen X B, Ding W R. Spatial-temporal evolution and trade-off synergy relationships of ecosystem services in Karst Area of Shilin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 285-293.
- [26] Wiens J A. Spatial scaling in ecology[J]. Functional Ecology, 1989, 3(4): 385-397.
- [27] 武燕,吴映梅,李琛,等.基于 MAUP 下川滇生态屏障区生态系统服务价值多尺度空间分异及地理探测响应[J].水土保持研究, 2023, 30(2): 333-342.
- Wu Y, Wu Y M, Li C, et al. Multi-scale spatial differentiation and geographic detection response of ecosystem service value in sichuan-Yunnan ecological barrier based on the modifiable areal unit problem[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 333-342.
- [28] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111.
- Zhuang D F, Liu J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. Journal of Natural Resources, 1997, 12(2): 105-111.
- [29] 严恩萍,林辉,王广兴,等.1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J].生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.
- Yan E P, Lin H, Wang G X, et al. Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir Region during 1990-2011[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [30] 黄木易,岳文泽,方斌,等.1970—2015年大别山区生态系统服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J].地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920.
- Huang M Y, Yue W Z, Fang B, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain Area, central China from 1970 to 2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [31] 杨强强,徐光来,李爱娟,等.青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究[J].生态学报, 2021, 41(23): 9315-9327.
- Yang Q Q, Xu G L, Li A J, et al. Evaluation and trade-off of ecosystem services in the Qingyijiang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23): 9315-9327.
- [32] 赵霖雨,崔柳,王佳,等.基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究:以湛江市中心城区为例[J].生态学报, 2023, 43(15): 6307-6320.
- Zhao J Y, Cui L, Wang J, et al. Multi-scenario simulation of urban green space development and construction Timeline based on PLUS model analysis: A case study of the central Zhanjiang City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6307-6320.
- [33] Wong C P, Jiang B, Kinzig A P, et al. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy[J]. Ecology Letters, 2015, 18(1): 108-118.