

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.023.

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 Yan, WU Yingmei, LI Chen, 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.

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

武燕¹, 吴映梅¹, 李琛¹, 高彬斌¹, 郑可君^{1,2}, 李婵¹

(1. 云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2. 云南省社会科学院, 昆明 650000)

摘 要:为探析生态系统服务价值(ESV)在可塑性面积问题(MAUP)下的分区效应,以川滇生态屏障区为例,基于 2018 年土地利用数据,划分格网、行政区和流域 3 类不同尺度类型 9 级评价单元,运用空间自相关分析、地理探测器等方法探究了 ESV 多尺度空间分异特征及地理探测响应。结果表明:川滇生态屏障区 2018 年 ESV 为 7 945.81 亿元,以林地和草地的贡献最为突出;3 类尺度下 ESV 空间分布具有明显的分区效应,大体呈现出评价单元尺度类间差异性大,类内差异性小的空间分异特征,同时其空间集聚效应及冷热点区空间分布随着评价单元尺度划分大小的不同而差异显著;通过对比分析,将格网尺度与行政区尺度结合分析,可作为大区域生态功能区 ESV 综合评价的尺度参考;自然因素及社会经济因素的交互协同增强效应共同影响了川滇生态屏障区 ESV 分异效果,不同尺度下,因子解释力大小不同。综上,评价单元划分的不同会影响评价结果的准确性,结合具体研究需求开展多尺度评价成为未来 ESV 科学量化的前提条件。

关键词:MAUP; 多尺度; 生态系统服务价值; 地理探测器; 川滇生态屏障区

中图分类号:F062.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0333-10

Multi-Scale Spatial Differentiation and Geographic Detection Response of Ecosystem Service Value in Sichuan-Yunnan Ecological Barrier Based on the Modifiable Areal Unit Problem

WU Yan¹, WU Yingmei¹, LI Chen¹, GAO Binpin¹, ZHENG Kejun^{1,2}, LI Chan¹

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Academy of Social Sciences, Kunming 650000, China)

Abstract: In order to explore the zoning effect of ecosystem service value (ESV) under the modifiable areal unit problem (MAUP), taking the Sichuan-Yunnan Ecological barrier as the research object, based on the data of land use in 2018, we used three different scale types and 9 level evaluation units including grid, administrative region and river basin, the method of spatial autocorrelation analysis, geographic detector to examine the ESV multi-scale space differentiation characteristics, and to explore the factor detection and geographic detector response under MAUP. The results indicate that the ESV of the Sichuan-Yunnan Ecological Barrier was 794.581 billion yuan in 2018, with woodland and grassland contributing the most; the spatial distribution of ESV had obvious partitioning effect at different scales, showing the spatial differentiation characteristics of large inter-class differences and small intra-class differences in the scale of evaluation units; at the same time, the spatial agglomeration effect and the spatial distribution of cold and hot spots were

收稿日期:2021-10-12

修回日期:2021-11-20

资助项目:国家自然科学基金(41761037);云南省哲学社会科学创新团队科研项目(2021tdxmy04);云南省哲学社会科学规划社会智库项目(SHZK2021415)

第一作者:武燕(1997—),女,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为区域经济开发与管理。E-mail:546264721@qq.com

通信作者:吴映梅(1968—),女,云南昆明人,博士,教授,主要从事区域经济与地方发展研究。E-mail:wuyingmei@hotmail.com

<http://stbcj.paperonce.org>

significantly different with the different sizes of the evaluation units; through comparative analysis, the grid scale and administrative district scale were combined and analyzed, which could be used as a scale reference for the comprehensive evaluation of ESV for comprehensive evaluation of ESV in large-scale ecological barrier areas; the interaction and synergistic enhancement effects of natural factors and social and economic factors jointly affected the ESV differentiation effect of the Sichuan-Yunnan ecological barrier. In conclusion, the different division of evaluation units will affect the accuracy of evaluation results, and multi-scale evaluation with specific research needs becomes a prerequisite for future scientific quantification of ESV.

Keywords: modifiable areal unit problem; multi-scale; ecosystem service value; Geodetector model; Sichuan-Yunnan Ecological Barrier

可塑性面积单元问题(The modifiable areal unit problem, MAUP)反映出空间数据具有多粒度、多尺度的特性^[1],其属性数据之间的关系会随着研究粒度和区划方式的不同而发生变化,其中分区效应作为 MAUP 主要类型之一,是指由于研究评价单元尺度划分不同而使研究结果不同^[2-3]。本文所讨论的尺度是指研究区评价单元的大小。生态系统服务^[4]是指人类从生态系统结构、过程和功能直接或间接得到的产品或利益,对生态系统形成及对维持人类赖以生存和发展来说是必不可少的环境条件和效用,已成为国际科研领域重点关注的前沿和热点^[5]。生态系统服务功能形成只有依赖于一定的空间和时间尺度上生态系统结构和过程^[6],才能表现出显著的主导作用和效果^[7-10]。因此,在生态系统服务价值(Ecosystem service value, ESV)的研究过程中,尺度选择显得尤为重要。

生态系统服务价值作为生态安全重要表征指标,科学核算生态系统的服务价值,并对其时空演化特征进行量化描述,可为制定合理的生态保护政策以及国土功能分区提供重要参考^[11-12]。国内外有关 ESV 研究主要是围绕 ESV 核算方法修正^[13]、ESV 时空演变特征及权衡协同研究^[14]、土地利用变化对 ESV 响应^[15]以及模拟未来发展变化等^[16],研究方法日趋完善且与多学科交叉广泛^[11,17]。空间尺度是定量核算 ESV 的重要影响因素,在不同空间尺度下生态系统结构、过程和功能差异显著,较大尺度易忽视内部差异,而较小尺度则不能代表整体特征,因此不同空间尺度下 ESV 响应特征不同,同时所对应的宏观政策调控也不同^[18-20]。乔斌等^[21]基于格网尺度对青海玛多县土地利用变化和 ESV 相关关系进行了探讨,认为格网微观尺度下是测度土地利用时空演变以及 ESV 空间分布的有效评价单元;黄木易等^[22]以乡镇尺度为基本评价单元对大别山区 ESV 进行核算,认为 ESV 在乡镇尺度上信息量丰富,乡镇是大别山区 ESV 空间分异的特征尺度;冯源等^[23]基于县域评价

单元量化了 2000 年以来重庆市巴南区土地利用变化对生态系统服务价值的影响,并预测 2020—2030 年 ESV 损益的时空动态;Ling 等^[24]选取玛纳斯河流域从植被覆盖度、人为干扰指数和温度植被干旱指数 3 个因子的时空变化研究其对 ESV 的影响。从现有研究可知,尽管已有学者从格网尺度、乡镇尺度、县域尺度等不同评价单元尺度对不同区域 ESV 进行相关研究分析,但在研究过程中多以单一尺度划分为主,对评价单元选取的主观随意性所造成的空间分析结果不同这一问题的重视程度较低,鲜有学者针对其展开多尺度核算系统论述^[22]。在此情形下,亟需以多尺度视角探究区域 ESV 空间分布特征及分析其影响因素的相似性和差异性,对在核算 ESV 过程中选取不同评价单元上所呈现的不同特征研究进行补充,揭示因 MAUP 分区效应所带来的 ESV 空间差异现象,为科学核算 ESV 及制定区域生态环境保护政策提供科学依据。此外,在有关 ESV 研究的实证对象多聚焦在城市群^[25]、快速城镇化地区^[26]以及生态脆弱地区等^[27],对于生态安全格局至关重要的大区域生态功能区的实证分析仍不多见。

川滇生态屏障区作为我国“两屏三带”生态安全战略的重要组成部分,同时也是中国生态脆弱区、重点生态功能区、重要屏障区,其作为西南地区生态安全屏障肩负着涵养水源、保持土壤、维持生物多样性等生态服务功能^[16]。本文针对 ESV 研究中评价单元选取上存在单一性、静态性的现状,采用不同公里格网、行政区以及流域尺度 3 类不同类型 9 级评价单元作为综合评估 ESV 的尺度依据,合理探究川滇生态屏障区 ESV 在不同尺度下的空间集聚特征,同时利用地理探测器,从自然因素、社会经济因素探测 ESV 空间分异的影响因素响应,可更直观剖析 ESV 多维空间分异机制。并且尝试突破涉及因尺度单元评价所带来的空间整合以及区域异质性产生的效应变异性等问题,以期今后综合评估大区域

国家生态功能区 ESV 及后续管理调控提供科学依据和实践基础。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

川滇生态屏障区位于 $26^{\circ}32'—34^{\circ}19'N, 98^{\circ}03'—104^{\circ}58'E$, 涉及到的行政区有四川省 76 个县(区)和云南省 17 个县(区), 总面积达 $2.367 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[28] (图 1)。该区气候以亚热带季风气候为主, 处于我国地势第一阶梯向第二阶梯过渡区域, 地形复杂多样且地势高差悬殊, 破碎度高, 生态环境复杂而脆弱。作为衔接西南山区整体生态安全保证的重要一环, 在水土保持、优化生态环境、维持生物多样性等生态系统服务功能发挥上显得极其重要。近年来, 由于人类活动增多以及气候变化异常, 导致川滇生态屏障区的生态系统敏感复杂性加剧, 生态环境问题凸显。

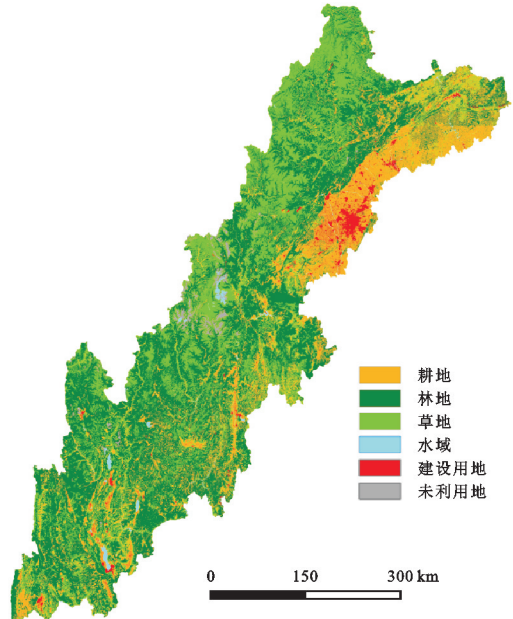


图 1 土地覆被类型

1.2 数据来源

本研究所使用的数据主要包括土地利用数据、粮食价格数据、DEM 高程数据、坡度数据、社会经济数据、夜光遥感数据、道路数据、土壤数据。(1) 2018 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>), 依据中国科学院生态遥感监测土地利用/覆盖分类体系, 将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地共 6 类;(2) 粮食作物的播种面积、粮食产量数据来源于 2018 年《云南省统计年鉴》、《四川省统计年鉴》及各地方经济社会公报, 粮食价格数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编 2019》;(3) 高程数据

来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>), 并采取移动窗口法提取最佳地形起伏度;(4) 年降水量、GDP、人口密度空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>); (5) 夜光遥感数据来源于来自 EESD 公开发表的“类 NPP-ⅧRS”夜间灯光数据集(<https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD>); (6) 路网数据来源于 1:100 万全国基础地理数据库(<https://www.webmap.cn>); (7) 土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn>)。

2 研究方法

2.1 评价单元尺度划分

划分 3 类不同类型 9 级评价单元, 即 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$, $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$, $7 \text{ km} \times 7 \text{ km}$, $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$, 镇域尺度、县域尺度、流域尺度。依托多尺度评价单元划分对川滇生态屏障区 ESV 进行多维核算以及探测其不同尺度下的影响机制, 可减少研究因为单一尺度划分下带来的误差以及主观划分评价单元中不完全考虑空间异质性的问题, 最大化揭示 MAUP 分区效应的存在, 并探析不同尺度下影响因素的响应机制。

2.2 生态系统服务价值核算

谢高地等^[29-30]根据 Costanza 提出的 ESV 评估方法对中国 ESV 系数进行优化修正, 针对川滇生态屏障区社会经济发展状况, 考虑到区域之间的差异性, 将四川、云南两地耕地当量因子进行面积加权平均, 对单位面积农田每年自然粮食产量的经济价值进行修正, 同时参考李晓赛等^[13]对建设用地和未利用地当量因子进行设定, 计算出研究区单位面积 ESV 当量因子表(表 1)。

具体修正过程为:在不考虑价格波动情况下, 参考 2018 年四川省、云南省两地平均粮食价格 2.42 元/kg 作为农作物的单价进行计算, 考虑到在没有人力投入的情况下, 现有 ESV 是单位面积农田提供的食物生产经济价值的 $1/7$ ^[31], 计算得出川滇生态屏障区农田自然粮食产量的经济价值为 $1\,736.38 \text{ 元/hm}^2$, 具体参考公式:

$$VC_k = \frac{1}{7} P \times \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1)$$

式中: VC_k 为生态系统服务价值当量因子的价值量(元/ hm^2); P 为研究区平均粮食价格(元/kg); Q 为研究区平均粮食产量(kg/ hm^2)。

表 1 川滇生态屏障区单位面积生态系统服务价值当量

| 一级类型 | 二级类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
|------|---------|------|------|------|-------|-------|------|
| 供给服务 | 食物生产 | 1.16 | 0.33 | 0.43 | 0.53 | 0.10 | 0.02 |
| | 原材料生产 | 0.45 | 2.98 | 0.36 | 0.35 | 0.00 | 0.04 |
| | 气体调节 | 0.84 | 4.32 | 1.50 | 0.51 | 0.00 | 0.06 |
| 调节服务 | 气候调节 | 1.13 | 4.07 | 1.56 | 2.06 | 0.00 | 0.13 |
| | 水文调节 | 0.89 | 4.09 | 1.52 | 18.77 | −7.51 | 0.07 |
| | 废物处理 | 1.61 | 1.72 | 1.32 | 14.85 | −2.46 | 0.26 |
| 支持服务 | 保持土壤 | 1.71 | 4.02 | 2.24 | 0.41 | 0.02 | 0.17 |
| | 维持生物多样性 | 1.18 | 4.51 | 1.87 | 3.43 | 0.34 | 0.40 |
| 文化服务 | 美学景观 | 0.20 | 2.08 | 0.87 | 4.44 | 0.01 | 0.24 |

根据川滇生态屏障区土地利用分类结果,对研究区的 ESV 计算公式如下:

$$ESV=\sum_{k=1}^n(A_k\times VC_k)$$
 (2)

式中:ESV 为生态系统服务价值; A_k 为土地利用类型 k 的面积; VC_k 为单位面积上土地利用类型 k 的生态系统服务价值。

2.2.1 全局自相关(Global Moran's I) 全局空间自相关是探究研究区域中相邻属性值在全局空间上关联度和相似性的指标参数,本研究选用 Global Moran's I 进行空间关联程度分析,计算公式如下^[32]:

$$I=\frac{n}{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nW_{ij}}\times\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nW_{ij}(x_i-x_a)(x_j-x_a)}{\sum_{i=1}^n(x_i-x_a)^2}$$
 (3)

式中: I 为 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; x_a 为 ESV 平均值; W_{ij} 为单元 i 和单元 j 之间的空间权重矩阵; n 为样本量,即研究区某一尺度上的 ESV 评价单元的总个数。其指数变化范围为 $[-1,1]$,若 Moran's $I>0$,则表示空间呈正相关关系,值越接近 1 表示评价单元内空间相关性越显著,相似特征明显;相反,若 Moran's $I<0$,则表示空间呈负相关关系,且值越接近 -1 表示评价单元内空间差异越大,分布特征越分散;若 Moran's $I=0$,则表示全域空间分布特征没有相关性,呈随机性分布。

2.2.2 冷热点分析(Getis-Ord General G_i^*) 该统计量是某一给定距离范围内邻居位置上的观测值之和与所有位置上的观测值之和的比值,是一种基于距离权重矩阵的局部空间自相关指标,能探测高值聚集和低值聚集并且可以用来检测被全局分析掩盖了的局部小范围的相关性,其原理和公式参考文献^[33]。

2.3 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[34]创建的一种新型空

间分异性分析工具,是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,具有共线性免疫等优点,主要包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测。本文重点研究的是 ESV 影响因素,因此选择了因子探测和交互作用探测进行定量阐述和分析。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 值来判断双变量间交互作用特点,该方法对于相互作用的假设不仅限于传统统计学方法,因此具有一定的优势,驱动因子的交互作用通过探测结果的 $q(x_i\cap x_j)$ 值来识别驱动因子之间的共同作用是否增加或减弱对分析变量的解释力。

区域 ESV 的空间分异是自然和社会经济因素复杂的耦合作用过程在空间上的表征结果,综合国内外研究和川滇生态屏障区实际情况,同时遵循数据可获取性原则,本文在自然因素和社会经济因素方面各选取了 5 种驱动因子,即(1) 自然因素:年降水(X_1)、高程(X_2)、坡度(X_3)、地形起伏度(X_4)、土壤有机质(X_5);(2) 社会经济因素:GDP(X_6)、人口密度(X_7)、路网密度(X_8)、土地利用程度(X_9)、夜光遥感(X_{10})。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值多尺度空间分异格局

由表 2 可知,2018 年川滇生态屏障区 ESV 总量达 7 945.81 亿元,其中林地对 ESV 贡献最多,达到 5 771.11 亿元,占总数的 72.63%,草地次之,达 1 351.26 亿元,提供最少的是建设用地,其所带来生态系统服务的负价值达 -67.88 亿元,由此表明川滇生态屏障区 ESV 以林地、草地贡献最为突出,两者共占总价值 89.64%;建设用地由于人为干扰较大,因此 ESV 贡献较小。林地和草地面积所占比例较大,对生态系统服务功能具有突出贡献,成为改善区域生态环境质量,提高生态系统服务功能的关键;而在成都平原及其周边地区由于城镇化扩张,大部分用地类型以建设用地为主,

且耕地转化为城市建设用地速度加快,耕地相对收缩使得该区域 ESV 呈现低级分布。

将川滇生态屏障区 ESV 空间化以体现多尺度下其空间分异特征,为消除分级标准差异导致在不同尺度下

ESV 缺乏可比性的局限性,将各尺度下 ESV 进行归一化处理^[35]。各尺度按统一标准分为 5 级(图 2):Ⅰ为低级(0~0.2);Ⅱ为较低级(0.2~0.4);Ⅲ为中级(0.4~0.6);Ⅳ为较高级(0.6~0.8);Ⅴ为高级(0.8~1)。

表 2 川滇生态屏障区各土地利用类型生态系统服务价值 亿元

| 一级类型 | 二级类型 | 不同土地利用类型的生态系统服务价值 | | | | | | 合计 |
|------|---------|-------------------|---------|---------|--------|--------|------|---------|
| | | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 | |
| 供给服务 | 食物生产 | 84.32 | 67.73 | 49.79 | 2.55 | 0.71 | 0.11 | 205.20 |
| | 原材料生产 | 32.88 | 611.59 | 41.68 | 1.68 | 0.00 | 0.21 | 688.05 |
| | 气体调节 | 60.71 | 886.60 | 173.68 | 2.45 | 0.00 | 0.32 | 1123.76 |
| 调节服务 | 气候调节 | 81.79 | 835.29 | 180.63 | 9.90 | 0.00 | 0.69 | 1108.29 |
| | 水文调节 | 64.92 | 839.40 | 176.00 | 90.18 | -53.66 | 0.37 | 1117.21 |
| | 废物处理 | 117.20 | 353.00 | 152.84 | 71.35 | -17.58 | 1.38 | 678.18 |
| 支持服务 | 保持土壤 | 123.94 | 825.03 | 259.37 | 1.97 | 0.14 | 0.90 | 1211.35 |
| | 维持生物多样性 | 86.00 | 925.59 | 216.53 | 16.48 | 2.43 | 2.12 | 1249.15 |
| 文化服务 | 美学景观 | 14.33 | 426.88 | 100.74 | 21.33 | 0.07 | 1.27 | 564.62 |
| | 合计 | 666.09 | 5771.11 | 1351.26 | 217.88 | -67.88 | 7.36 | 7945.81 |

由图 2 可知,不同尺度下 ESV 空间分布具有差异性与相似性。评价单元越小,精度越高,ESV 的空间分布表现越精细,随着评价单元增大,ESV 在空间分布更能体现出整体特征,但难以具体反映出评价单元内部单元信息。具体来看,在 1~3 km 格网尺度上,ESV 整体空间分布较为一致,ESV 较高级、高级区在研究区大面积分布,但并未在空间上完全表现出显著的规律性特征,此外,ESV 低级区主要以人类活动较为频繁的成都平原及其周边城镇扩张区域为主,这是由于城镇空间对生态空间挤压使得 ESV 整体表现出较低水平。随着格网尺度的增大,在 7~15 km 格网尺度下研究区 ESV 较高级以及高级区特征大面积突出。而在行政区尺度下 ESV 空间分布与格网尺度存在明显区别,主要表现为 ESV 整体分布状态呈现以低级和较低级为主,少部分地区为 ESV 高级区,同时镇域和县域 ESV 分布范围相对一致。流域尺度 ESV 空间分布与格网尺度和行政区尺度分布特征较大,大部分地区呈现不同等级穿插分布。对于同一研究区而言,运用同样的数据以及相同的研究方法,由于评价单元尺度划分的不一致,往往会在空间分布特征表现不同,呈现出尺度类间差异性大,类内差异性小的特征,即:在不同类型评价单元下,ESV 在空间分布上存在明显差异性,如格网尺度、行政区尺度以及流域尺度整体而言 ESV 空间分布差异较大;而在同一尺度类型中,受到评价单元划分大小的影响,差异较小且具有一定相似性,如 1~3 km 较为精细且尺度差异较小的评价单元内

ESV 总体分布呈现明显相似性。因此,在具体衡量 ESV 空间分异特征中不可忽视 MAUP 下分区效应的存在,单一尺度的评价往往不能全面反映区域真实情况,多尺度综合评价分析显得尤为重要。

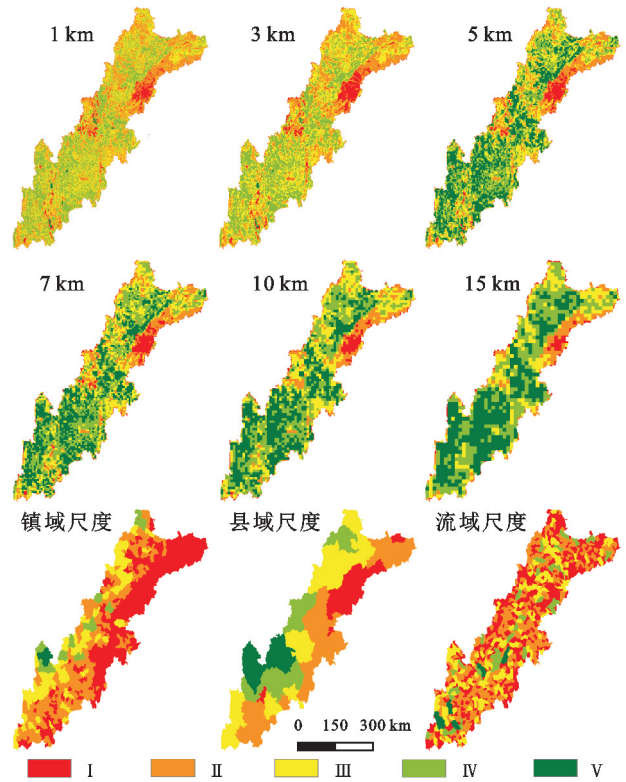


图 2 不同尺度下生态系统服务价值空间分布

3.2 生态系统服务价值多尺度空间响应特征

3.2.1 生态系统服务价值全局空间相关性多尺度响应特征 为进一步分析尺度变化对 ESV 空间分布影

响,利用探索性空间数据法对不同尺度水平的描述性统计参数进行分析,分别计算川滇生态屏障区在 9 级不同大小尺度评价单元 $Moran's I$ 值。研究期间 ESV 在不同尺度下 $Moran's I$ 值均大于 0, p 值均小于 0.001,说明在各个尺度上 ESV 整体上始终呈显著的正向空间自相关,均具有明显的空间集聚性。

由图 3 可知,ESV 在 9 级尺度下(1 km,3 km,5 km,7 km,10 km,15 km,镇域尺度、县域尺度以及流域尺度)的 $Moran's I$ 值分别是 0.708 4,0.655 6,0.621 9,0.601 4,0.591 8,0.557 1,0.700 1,0.649 8,0.146 7,不同尺度下 ESV 的 $Moran's I$ 值存在明显差异,整体呈现“下降—上升—下降”的波动趋势,最大值在 1 km 格网尺度,最低值为流域尺度。在格网尺度下从 1 km 增至 15 km 时, $Moran's I$ 值呈现平稳下降趋势, $Moran's I$ 值变化幅度小,整体维持在 0.6 左右,空间集聚明显;在行政区尺度下,镇域尺度 $Moran's I$ 值略高于县域尺度;流域尺度的 $Moran's I$ 值在 9 级尺度下最低仅 0.146 7,与其余评价相比单元空间集聚不明显。可以看出在同一类型中评价单元下,越精细的评价单元下 $Moran's I$ 值越高,ESV 在空间上越集聚。

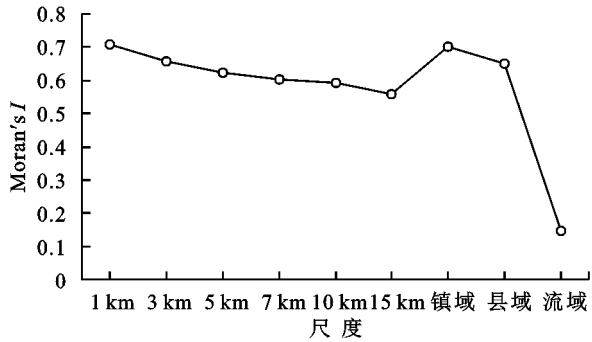


图 3 不同尺度下生态系统服务价值 $Moran's I$ 值

3.2.2 生态系统服务价值局部空间相关性多尺度响应特征 为进一步揭示 ESV 的局部空间自相关多尺度响应特征,选取 $Moran's I$ 值尺度类间相似的评价单元:格网尺度、行政区尺度以及流域尺度,运用热点分析法探析不同尺度下川滇生态屏障区 ESV 的冷热点区的空间分布特征。

由图 4 可知,不同尺度下 ESV 冷点区分布于成都平原及周边等建设用地密集地区,而热点区空间分布范围存在明显差异。具体来看,在格网尺度下,由于选取格网尺度划分精细,除成都平原周围大面积地区为冷点区,此外大部分地区大致为热点区,且格网越小,热点区越破碎,ESV 热点区具体分布特征难以归纳;在行政区尺度中,热点区域主要以九寨沟县、松

潘县、黑水县、理县、小金县、康定市、泸定县、石棉县、木里县、宁蒗县、盐源县、香格里拉市、玉龙县、兰坪县一线大致呈东北—西南走向分布,大部分属于林、草地密集,生态环境良好、植被覆盖茂密的区域;流域尺度与其余尺度相比冷热点区域差异明显,冷点区仅分布于成都市的青白江区以及温江区等小面积区域,热点区则集中于研究区中央的雅砻江流域南部,研究区南部的岷江及金沙江流域和北部的岷江、沱江和涪江 3 个流域的交界处。流域作为一个综合的自然地域系统,具有空间整体性强、地区关联度高的特点,相比行政区尺度而言,其热点空间分布更与自然状态的格网尺度相似。

整体而言,各级尺度下 ESV 的热点区空间分布大体相似,但局部冷点区域差异明显。从 ESV 热点区域范围和走向来看都具有明显相似性,即分布于成都平原以西,呈现东北—西南向且大范围分布。但在 3 类尺度下冷点区分布范围和面积差异显著:1~3 km 格网尺度下 ESV 冷点区大致沿成都平原大面积分布,分布面积和范围相似度高,但在行政区尺度以及流域尺度 ESV 冷点区以小范围分布为主。同时除流域尺度外,其余尺度 $Moran's I$ 值相似,由于没有一个单一的理想尺度适合所有的综合评估,因此对尺度的选择要依靠分析的目的、可获得资料的实际情况及要符合人类决策需要^[10]。而较小的格网尺度和镇域尺度在 ESV 空间表现上具有空间相似性,格网以精细化单元进行评估,以突出内部单元具体细节特征特殊优势表现鲜明,同时镇域尺度对于行政管理调控而言意义重大,更易在生态功能管控实践中进行操作。未来在 ESV 核算以及地区管控中可着眼以镇域尺度为主,辅之精细化格网尺度,即以行政边界明晰的镇域尺度为 ESV 管理调控的重要行政边界依据,同时考虑到自然状态下精细化微观格网 ESV 分布特征,二者综合分析可为川滇生态屏障区这类大区域生态功能区生态系统服务功能后续要素综合管理调控提供相应综合思路及尺度参考。

3.3 生态系统服务价值多尺度影响因素响应及差异分析

3.3.1 生态系统服务价值空间分异的影响因子探测 对 3 类不同类型 9 级尺度川滇生态屏障区 ESV 空间分异的各驱动因子的贡献率进行探测,对比 10 个指标因子对川滇生态屏障区 ESV 空间分异的解释力,按因子解释力大小进行排序,探讨不同尺度下 ESV 间分异的主导因子差异性。

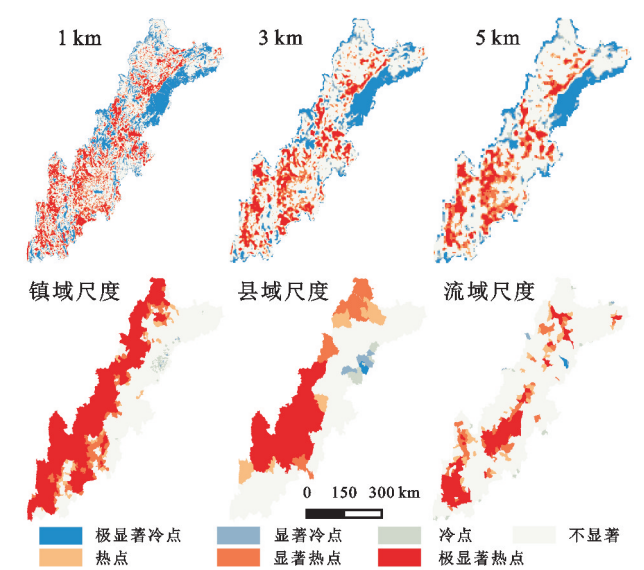


图 4 不同尺度下生态系统服务价值冷热点空间分布

由图 5 可知,川滇生态屏障区 ESV 空间分异特征显著总体受自然因素和社会经济因素的共同影响,但在不同尺度上各因子按照 q 统计量的大小排序不一致,主导因子存在明显差异。自然因素在 1~15 km 格网尺度下影响显著,其中以高程、地形起伏度、坡度、降水因子影响较为突出,均位于影响因子前五,并随着格网尺度的增大,降水的影响作用明显增强;社会经济因素相比格网尺度在行政区尺度下变化明显,其中路网密度、人口密度的排名提升最为突出,由格网尺度的排名第十在行政区尺度下跃居为前五;此外在流域尺度下以降水和土地利用程度因子影响突出,主要是由于一方面部分流域地区属经济发展水平较高的区域,社会经济因素影响较为突出,另一方面流域地区也会囊括一部分经济欠发达且为生态保护重点区域,自然因素作用表征强烈。由此可知,在不同尺度下 ESV 影响因素排序变化存在明显差异性,评价单元的划分关系到 ESV 影响因素的不同响应,对于同一研究区域而言,选取不同的评价单元尺度,ESV 的主要影响因素和主导因子存在差异性和相似性,若未能精准识别,将对后续管理调控造成一定难度。

总而言之,降水、土地利用程度在不同尺度下对川滇生态屏障区 ESV 空间分异的解释能力最高,明显占有主导优势。ESV 空间分布特征差异会因为受到外部人为影响因素的强烈干扰,而显著增强 ESV 在空间分布上的差异效果,表现为以土地利用程度的突出影响。土地利用方式的变化对土地利用覆被结构产生影响,而不同的覆被类型 ESV 不同,人为土地利用活动对生态系统的干扰影响程度大,从而在整体上影响区域 ESV 总量。此外 7 km 格网尺度以上,

降水作为气象因子影响物种和生态群落的生长发育,从而对于生态系统服务功能的重要性更易凸显,在一定程度上反映出降水对粮食生产以及森林资源、草地资源分布具有重要影响。

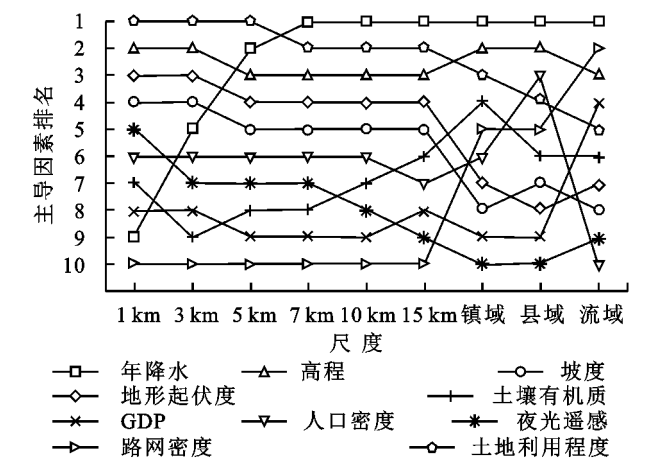
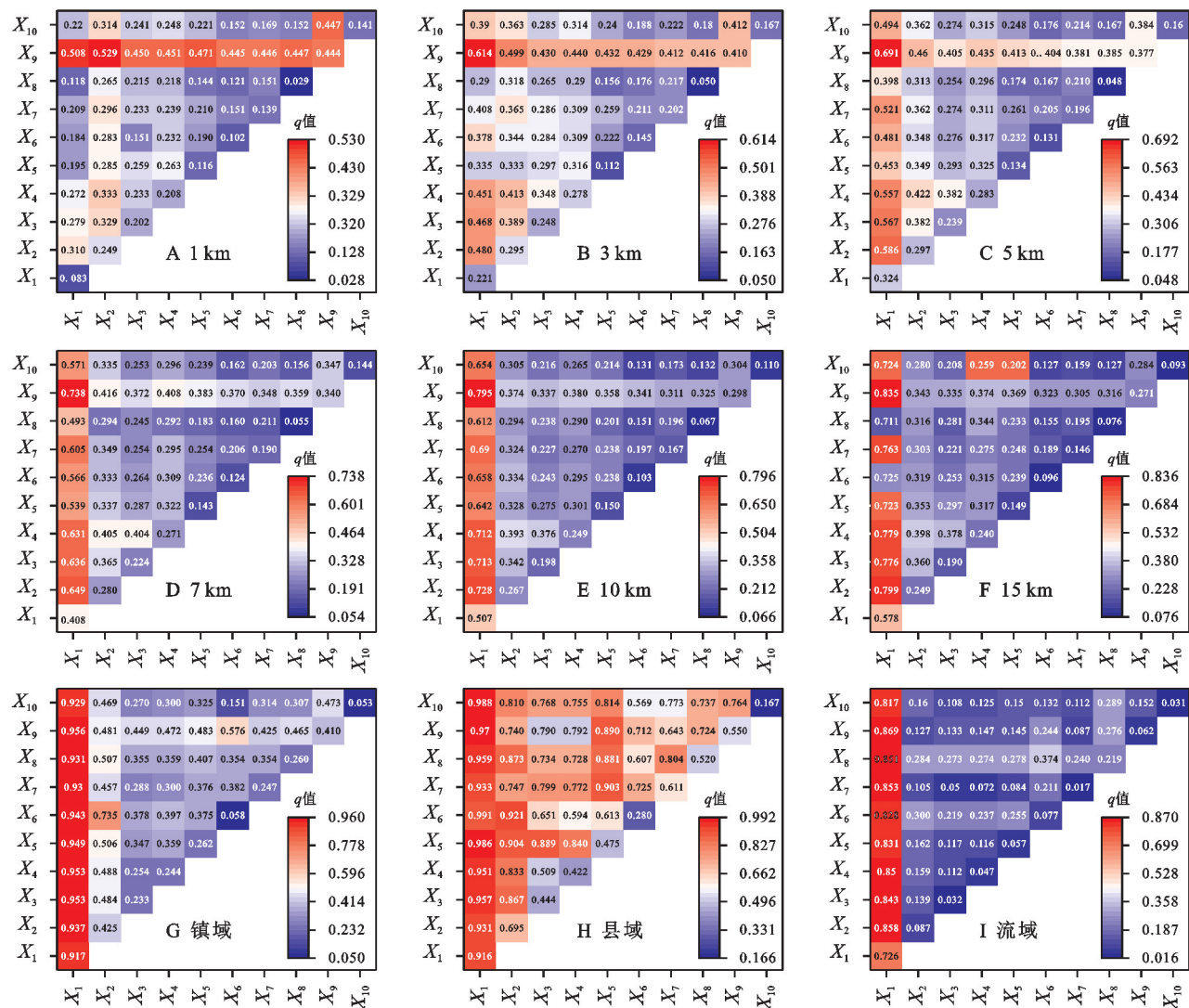


图 5 不同尺度下生态系统服务价值影响因素排名

3.3.2 生态系统服务价值空间分异的驱动力因子交互探测 在因子探测的基础上,采用交互探测可识别不同因子之间的交互影响影响,以此判断两个因子 A 和 B 的共同作用对 ESV 产生的影响类型。结果表明,研究区在所选因子中任意两个因子的交互作用均大于单个因子的影响,两两交互的类型主要为交互增强型和非线性增强型,说明导致研究区 ESV 空间分异结果并不是由单一影响因子造成的,而是由不同影响因素共同作用的结果。不同因子之间的复杂耦合作用所形成的协同增强效应共同影响了研究区 ESV 在空间上分异效果。

由图 6 可知,除流域尺度以外,降水(X_1)与其余 9 个影响因子交互作用强烈,同时其解释力大致呈现因尺度增大而增强的趋势。其中降水(X_1) \cap 土地利用程度(X_9)交互作用对 ESV 空间分异的影响十分强烈,这与因子探测结果中降水和土地利用程度为不同尺度首要影响因素吻合。具体来看,驱动因子两两交互作用的数值大小存在明显差异,除在县域尺度,其余 8 个尺度下均以降水(X_1) \cap 土地利用程度(X_9)两两交互作用 q 值最强,1 km 为 0.508,3 km 为 0.614,5 km 为 0.691,7 km 为 0.738,10 km 为 0.795,15 km 为 0.835,镇域尺度为 0.956,流域尺度为 0.869, q 值均达到 0.5 以上,解释力高达 50% 以上,而县域尺度下则以降水(X_1) \cap GDP(X_6)两者交互探测的 q 值最高为 0.991,解释力达 99% 以上。同时以行政区为代表的县域和镇域尺度评价上,两者 q 值均达到 0.95 以上,解释力高达 95% 以上,可以看出在行政区评价单元尺度上交互探测最为显著。



注: X_1 为年降水; X_2 为高程; X_3 为坡度; X_4 为地形起伏度; X_5 为土壤有机质; X_6 为国内生产总值; X_7 为人口密度; X_8 为路网密度; X_9 为土地利用程度; X_{10} 为夜光遥感。

图 6 不同尺度下生态系统服务价值影响因素的交互探测结果

综合来看,川滇生态屏障区 ESV 在不同尺度影响因素具有显著的空间异质性,降水和土地利用程度成为影响川滇生态屏障区的主要影响因子,但在不同评价单元尺度上因子解释力大小不一,多因子协同作用程度决定了 ESV 空间差异的显著性。基于衡量 ESV 具有明显的自然、社会经济多种驱动因子交互影响,由于自然因素中降水(X_1)最为突出,在 ESV 综合管控实践中,多应考虑在多尺度下,不同驱动因子的作用特点和各驱动因子交互协同增强的效果,采取差异化多元调控策略,已达保护管理最优化。同时,提倡对生态系统服务和自然-社会多种驱动因素进行多尺度评估,并强调在生态系统服务的分级治理中需包含规模依赖性。

4 讨论

(1) 尽管在有关面积单元选取的主观随意性问

题会给空间分析的结果会造成不同影响,但是学界研究对于 MAUP 效应重视程度不高,同时选择合适的尺度是一个长期存在的问题,对地理学家和规划者来说是一个挑战,在数据来源以及方法一致的情况下,以单一、静态的视角划分评价单元,往往会给研究结果造成差异。换言之,在地理空间分析过程中,评价单元划分的不同会影响评价结果的准确性,确定合适的评价单元可以提高研究结果的准确性、真实性。多尺度分析法是揭示 MAUP 分区效应的关键也是综合研究开展的核心所在,评价单元的多尺度选取可以纠正单一尺度所不可避免的偏误,有利于结合尺度类型划分的差异性,提高多个等级层次决策制定的有效性和可行性,在研究中应综合考虑评价单元尺度划分对研究结果所造成的不同影响,通过适宜的空间和时间尺度划分,从而达到把握复杂生态规律开展综合研究的根本目的,评价单元选取的随意性可能无法完全

反映出研究结果的真实空间异质性,需要对研究区进行评价尺度选择和分析,确定合理的评价单元大小,综合考量以求最大化全面测度地区实际状况。

(2) 以格网化微观视角进行评估研究,虽可精细化反映内部特征,但无法聚焦于整体特征;选择以行政区尺度为评价单元,可具体明晰其整体分布特征,并且帮助决策者依据行政区划实施精准管理调控,但无法细致反映出研究区内部微观空间信息。此外,考虑到不同利益相关者对生态系统服务的短期和长期利益有所不同,对于研究尺度的划分需要综合多种因素加以全面综合考量,可为后续管理调控的提供重要参考依据。

(3) 研究通过对不同尺度下 ESV 空间分异的驱动力探测发现川滇生态屏障区 ESV 具有显著的空间异质性,降水和土地利用程度虽成为川滇生态屏障区的主要影响因子,但在不同评价单元尺度上因子解释力大小不一,表明基于多尺度分析揭示的影响过程与机制在要素间实际的组织与结构特征各异。为提高研究结果的合理性和针对性,未来研究有必要对多尺度分析方法的结果进行对比评估,以筛选最为符合研究区实际的尺度开展后续研究。

(4) 未来在对 ESV 综合管控实践中,需要综合考虑不同尺度下驱动因子的作用特点和各驱动因子交互协同增强的效果,将研究尺度与政府决策目标相结合,强调在其研究过程中评价单元选取的重要性,并由此采取差异化多元调控策略,进行不同区域精准实施管理措施,分区调控是未来开展生态系统服务功能优化及其相关研究所需要关注的首要任务。

5 结论

(1) 从 ESV 总量上来看,2018 年川滇生态屏障区 ESV 总量达 7 945.81 亿元,林、草地贡献最为突出。从 ESV 空间分布来看,低值区总体分布于人类活动频繁,耕地收缩严重的成都平原及周边地区。

(2) 不同尺度下 ESV 在空间分布上呈现出尺度类间差异性大,类内差异性小的空间分异特征,即:较小格网尺度下难以明确其整体空间分布特征,但内部单元信息得以具体体现,行政区尺度下由于人为行政规划,可对于 ESV 空间分布特征表现较为清晰,但内部单元具体信息特征难以聚焦。同时在不同尺度响应特征分析表明,无论哪一种尺度下 ESV 均具有集聚性,且尺度类间评价单元越小, $Moran' I$ 值越高,ESV 在空间上越集聚。

(3) 在 $Moran' I$ 值相似的各尺度下,ESV 的热点区空间分布大体相似,但局部冷点区域差异明显,格网尺度下能体现更多的冷点区特征,因此将格网尺度与行政区尺度结合分析,从行政区划切入,辅之格网尺度精细化 ESV 特征反映,即在行政区划管理的同时考虑到自然状态下 ESV 的空间集聚特征分布,可为后续生态系统服务功能协调管理提供尺度依据参考,选取适宜评价单元以反映区域实际情况。

(4) 在不同尺度下,自然因素和社会经济因素协同交互作用叠加会大大增强对 ESV 空间分异的解释力,其中以降水和土地利用程度交互探测最为突出。格网尺度以自然因素占主导,行政区尺度相比格网尺度社会经济因素有明显提升,流域尺度下,由于流域的特殊性和复杂性,呈现出以自然因素为基底,社会经济因素混合影响为主要特征。由于 MAUP 分区效应的普遍存在,评价单元尺度选取的不同,对于结果来说具有不同影响,结合研究需求多尺度的分析可避免因分区所带来的影响,综合考量可最大化全面反映地区实际状况。

参考文献:

- [1] Jelinski D E, Wu J. The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology[J]. Landscape Ecology, 1996,11(3):129-140.
- [2] M, Yap M, Kok M R, et al. Incorporating geography into a new generalized theoretical and statistical framework addressing the modifiable areal unit problem[J]. International Journal of Health Geographics, 2019, 18(1):1-15.
- [3] 李广,侯扶江,黄高宝.临泽盐渍化草地空间格局的可塑性面积单元问题[J].生态学报,2008,28(1):154-161.
- [4] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.
- [5] Burkhard B, Petrosillo I, Costanza R. Ecosystem services: bridging ecology, economy and social sciences[J]. Ecological Complexity, 2010,7(3):257-259.
- [6] 张娜.生态学中的尺度问题:内涵与分析方法[J].生态学报,2006,26(7):2340-2355.
- [7] 孟斌,王劲峰.地理数据尺度转换方法研究进展[J].地理学报,2005,60(2):277-288.
- [8] 吕一河,傅伯杰.生态学中的尺度及尺度转换方法[J].生态学报,2001,21(12):2096-2105.
- [9] 李双成,蔡运龙.地理尺度转换若干问题的初步探讨[J].地理研究,2005,24(1):11-18.
- [10] 张宏锋,欧阳志云,郑华.生态系统服务功能的尺度特征[J].生态学报,2007,26(9):1432-1437.

- [11] 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,2020,40(1):233-244.
- [12] 金贵,王占岐,姚小微,等.国土空间分区的概念与方法探讨[J].中国土地科学,2013,27(5):48-53.
- [13] 李晓赛,朱永明,赵丽,等.基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J].中国生态农业学报,2015,23(3):373-381.
- [14] 张敏,迪丽努尔·阿吉.博斯腾湖流域生态系统服务价值时空演变及权衡协同关系[J].水生态学杂志,2022,43(2):29-36.
- [15] 周寒冰,王志泰,王志杰,等.喀斯特山地城市生态系统服务价值地形梯度响应:以贵阳市中心城区为例[J].水土保持研究,2021,28(6):338-347.
- [16] Li C, Wu Y, Gao B, 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.
- [17] 巩杰,徐彩仙,燕玲玲,等.1997—2018年生态系统服务研究热点变化与动向[J].应用生态学报,2019,30(10):3265-3276.
- [18] Jian S. Research advances and trends in ecosystem services and evaluation in China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011,10:1791-1796.
- [19] 孙宝娣,崔丽娟,李伟,等.湿地生态系统服务价值评估的空间尺度转换研究进展[J].生态学报,2018,38(8):2607-2615.
- [20] 姜栋栋,马伟波,邹凤丽,等.乡镇尺度大娄山区生态系统服务价值时空变化研究[J].环境科学研究,2020,33(12):2713-2723.
- [21] 乔斌,祝存兄,曹晓云,等.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[J].应用生态学报,2020,31(5):1660-1672.
- [22] 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.
- [23] 冯源,朱建华,曾立雄,等.县域土地利用变化下生态系统服务价值损益预测:以重庆市巴南区为例[J].生态学报,2021,41(9):3381-3393.
- [24] Ling H, Yan J, Xu H, et al. Estimates of shifts in ecosystem service values due to changes in key factors in the Manas River basin, northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019,659:177-187.
- [25] 曾杰,李江风,姚小微.武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征[J].应用生态学报,2014,25(3):883-891.
- [26] 李龙,吴大放,王芳,等.中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究:以佛山市为例[J].生态学报,2020,40(24):9023-9036.
- [27] 李辉,周启刚,李斌,等.近30年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):654-666.
- [28] 高彬嫔,李琛,吴映梅,等.川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素[J].应用生态学报,2021,32(5):1603-1613.
- [29] 谢高地,张钊铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001,16(1):47-53.
- [30] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [31] 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.
- [32] 李琛,吴映梅,高彬嫔.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.
- [33] 刘耀林,张扬,张琰,等.特大城市“三线冲突”空间格局及影响因素[J].地理科学进展,2018,37(12):1672-1681.
- [34] 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.
- [35] Sannigrahi S, Chakraborti S, Joshi P K, et al. Ecosystem service value assessment of a natural reserve region for strengthening protection and conservation[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 244:208-227.