引文格式：龙清成,何亚文,冯都贤. 多尺度生态系统调节服务价值时空演化分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):43-46. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.009

多尺度生态系统调节服务价值时空演化分析

龙清成[1,2]，何亚文[1,2*]，冯都贤[1,2]
（1. 中国石油大学（华东）海洋与空间信息学院，山东 青岛 266580；2. 资源与环境信息系统国家重点实验室，北京 100101）

摘 要：以湖北省郧阳区为研究区，在地块尺度及30 m×30 m、300 m×300 m和1 km×1 km格网尺度探究了2015—2020年生态系统调节服务价值时空演变特征。结果表明：①2015—2020年郧阳区生态系统调节服务价值随核算尺度增大而减少，各尺度调节服务价值均呈先减少后增加的变化趋势，整体增加6.28~7.27亿元，增幅约1.41%~1.59%，价值增加的各地块和格网单元占总面积64.73%~72.99%。②随核算尺度提升，调节服务价值呈现更细致的空间信息。各尺度下地均调节服务价值均呈“南北高、中间低”的空间分布特征，高值区主要位于森林和湿地生态系统。③各单项服务功能价值均随核算尺度增大而减少。气候调节功能价值贡献最大，贡献度均大于44.00%。研究结果可为区域国土空间优化和生态环境保护与修复等提供决策依据。

关键词：地块尺度；格网尺度；生态系统调节服务价值；时空演化
中图分类号：P208　　文献标志码：B　　文章编号：1672-4623（2025）06-0043-04

Spatio-temporal Evolution Analysis of Multi-scale Ecosystem Regulation Services Value

LONG Qingcheng[1,2], HE Yawen[1,2], FENG Duxian[1,2]
(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Beijing 100101, China)

Abstract: Taking Yunyang District, Hubei Province as the research area, we explored the spatio-temporal evolution characteristics of ecosystem regulation services value (ERSV) at the plot scale and 30 m×30 m, 300 m×300 m, and 1 km×1 km grid scales from 2015 to 2020. The results showed that ①the district ERSV decreased with the increase of accounting scale from 2015 to 2020, and showed a trend of first decreasing and then increasing, with an overall increase by 628~727 million yuan, an increase of about 1.41%~1.59%. The plots and grid cells with increased ERSV accounted for 64.73% to 72.99% of the total area. ②The ERSV presented more detailed spatial details with the improvement of accounting scale. The spatial distribution characteristics of ERSV at different scales were “high in the north and south, low in the middle”, and the high value areas were mainly located in the forest and wetland ecosystem. ③The value of each single regulation service function in Yunyang District decreased with the increase of accounting scale. The contribution of climate regulation function to the total ERSV was the largest, and the contribution degree was greater than 44.00%. The results can provide a targeted and scientific basis for spatial optimization, ecological environment protection and restoration in Yunyang District.

Key words: plot scale, grid scale, ERSV, spatio-temporal evolution

当前GEP核算研究中，基于市级[1]、县级[2]、乡镇级[3-4]、村级[4-5]等行政区划单元开展的GEP核算与差异分析，因核算基础单元不够精细难以揭示其内部空间差异，而以土地利用栅格数据分辨率为基准开展10 km×10 km、1 km×1 km、500 m×500 m、300 m×300 m、90 m×90 m、30 m×30 m和2 m×2 m等不同格网尺度的GEP核算研究，虽初步揭示了区域内部GEP的空间差异，但存在土地利用栅格数据的分类误差会影响GEP评估的不确定性等问题[6-10]。此外，受数据可获取性等影响，对多尺度和多时序生态系统服务价值时空演化特征的分析研究鲜见报道。

因此，本研究以湖北省郧阳区为例，在考虑生态系统调节服务价值的重要作用和数据可获取性等基础上，集成构建了多尺度生态系统调节服务价值核算模型方法，在地块尺度30 m×30 m、300 m×300 m和1 km×1 km格网探究了2015—2020年郧阳区生态系统调节服务价值时空演变特征，以期为区域国土空间优化管理、生态环境保护与修复等提供决策依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

郧阳区（32°25′~33°16′N，110°07′~111°16′E）地处湖北省十堰市，共辖16个镇，3个乡，1个林场，国土总面积3 863 km²。其位于秦岭南坡与大巴山东

项目来源：资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金资助项目。
第一作者简介：龙清成（1996— ），硕士研究生，研究方向为生态系统服务与时空统计分析，E-mail：z21160082@s.upc.edu.cn。
通信作者：何亚文（1985— ），博士，副教授，研究方向为地理信息系统，E-mail：heyw@upc.edu.cn。

延余脉之间，地势南北高、中间低，海拔在106～1 805 m，属于亚热带湿润性季风气候区，年均降水量824 mm，是南水北调中线工程核心水源区。全区森林覆盖率达66.87%，在调节气候、涵养水源、净化水环境等方面发挥着重要作用。如图1所示。

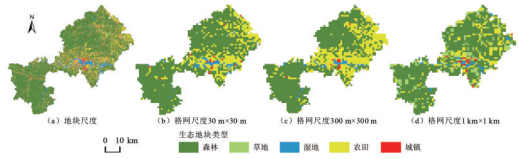


图1 2020年郧阳区不同尺度下生态系统类型空间分布

1.2 数据来源及处理

2015、2018年和2020年土地利用地块图斑数据来源于郧阳区国土资源部门，30、300 m和1 km土地利用/覆盖栅格数据分别来自武汉大学黄昕团队生产的中国地表覆盖产品（http://irsip.whu.edu.cn/）、欧空局全球土地覆盖数据集（https://www.esa-soilmoisture-cci.org/）和资源环境科学与数据中心获取的中国多时期土地利用遥感监测数据集（https://www.resdc.cn/）。本研究将各尺度土地利用数据重分类为森林、草地、农田、湿地和城镇共5类生态系统类型，2020年各尺度下生态系统类型空间分布见图1。数字高程模型（digital elevation model, DEM）来源于地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn/）提供的ASTER GDEM V3数据，空间分辨率为30 m。归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）来自航天宏图（https://engine.piesat.cn/）提供的MODIS_NDVI数据月度产品，按年度合成得年均NDVI数据，空间分辨率为250 m。植被净初级生产力（net primary productivity，NPP）数据选自MODIS/MOD17A3HGF数据集，空间分辨率为500 m。年蒸散发量（evapotranspiration，ET）数据来自于MODIS/MOD16A2数据集，通过逐像元求和得年度ET数据，空间分辨率为500 m。土壤相关数据来自世界土壤数据库（harmonized world soil database，HWSD）（v1.1）（https://daac.ornl.gov/）的中国土壤数据集（http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/），空间分辨率为1 km。温度、降雨量、风速等气象统计数据来自郧阳区气象部门。水库相关数据来自郧阳区水利部门和《湖北省郧阳区水资源公报》。居民消费价格指数（consumer price index，CPI）核算所需数据、作物产量、农业灌溉和化肥使用情况等来自郧阳区农业部门和《湖北省郧阳区统计年鉴》。本研究使用郧阳区矢量边界对各栅格参数数据进行掩膜提取，并对各栅格参数数据重采样和统计数据空间化处理，将多源数据统一到各地块和格网单元，参与不同尺度下生态系统调节服务价值核算。

1.3 多尺度生态系统调节服务价值核算模型方法

为更精准、全面地反映生态系统调节服务价值及其空间异质性，本研究以地块图斑数据和不同格网尺度的土地利用栅格数据作为生态系统调节服务价值核算的基础空间载体，构建了多尺度生态系统调节服务价值核算模型，如公式（1）和（2）所示：

$$\mathrm{ERSV}=\sum_{k=1}^{n}(\mathrm{ERSV}_k) \tag{1}$$

$$\mathrm{ERSV}_k=\sum_{j=1}^{t}\sum_{i=1}^{m}\mathrm{ERS}_{kji}\times P_i \tag{2}$$

式中，ERSV为生态系统调节服务价值；ERSV_k为基础核算地块单元k或格网单元k的生态系统调节服务价值；ERS_{kji}为地块单元k或格网单元k所属生态系统类型j的第i个生态系统调节服务功能核算的功能量；P_i为第i个生态系统调节服务功能核算的单位价格；n为核算基础载体数据的地块单元总数或格网单元总数；m为态系统调节服务功能数；t为生态系统类型数。

结合现有GEP研究中常见的生态系统调节服务价值核算指标[11-12]，参考《陆地生态系统生产总值（GEP）核算技术指南》（以下简称《指南》）[13]和《生态产品总值核算规范》（以下简称《规范》）[14]，选择气候调节、水源涵养、洪水调蓄、土壤保持、防风固沙、固碳释氧、空气净化和水体净化共8项调节服务功能进行总的调节服务价值核算。其中，释氧功能价值计算方法参考《指南》，其余各调节服务功能价值的计算方法参考《规范》。为消除价格波动的影响，采用郧阳区CPI指数将各核算年份的生态系统服务功能价值修正到2020年可比价格进行对比分析[15]。

2 结果与分析

2.1 生态系统调节服务价值时间维度分析

2015、2018年和2020年郧阳区不同尺度下的生态系统调节服务价值及变化情况如表1所示，通过逐地块和逐格网单元对不同尺度的调节服务价值变化情况逐年统计，结果如表2所示。从表1可看出，2015—2020年郧阳区不同尺度下的生态系统调节服务价值均呈现先减少后增加的变化特征，这与郑晓豪等[16]研究的2015—2019年湖北省生态系统服务价值降低0.57 %和酒金柱[17]研究的2020年湖北省生态系统服务价值相较2015年有所增加的总体变化趋势一致。结合表1和表2分析，按由大到小核算尺度分析，郧阳区生态系统调节服务价值逐年增加，且2015—2020年各大到小尺度的生态系统调节服务价值整体上分别

增加6.28~7.27亿元，增幅在1.41%~1.59%之间，价值增加的各地块和格网单元面积占总面积比为64.73%~72.99%。其中，2015—2018年郧阳区不同尺度下的生态系统调节服务价值减少4.78~5.21亿元，降幅约为1.05%~1.17%，价值减少的各地块和格网单元面积占比约51.27%~61.47%；2018—2020年调节服务价值增加11.49%~12.05亿元，增幅约2.60%~2.67%，价值增加的各地块和格网单元面积占比约73.60%~82.57%。

表1　2015—2020年郧阳区不同尺度下生态系统调节服务价值及变化情况

核算尺度	价值量/亿元			变化量/亿元			变化率/%		
	2015年	2018年	2020年	2015–2018年	2018–2020年	2015–2020年	2015–2018年	2018–2020年	2015–2020年
地块尺度	456.35	451.57	463.62	−4.78	12.05	7.27	−1.05	2.67	1.59
格网尺度30 m×30 m	454.07	449.13	460.99	−4.94	11.86	6.92	−1.09	2.64	1.52
格网尺度300 m×300 m	446.72	441.56	453.26	−5.16	11.70	6.54	−1.16	2.65	1.46
格网尺度1 km×1 km	446.38	441.17	452.66	−5.21	11.49	6.28	−1.17	2.60	1.41

表2　2015—2020年郧阳区不同尺度下生态系统调节服务价值变化占比/%

核算尺度	2015–2018年			2018–2020年			2015–2020年		
	增加	减少	不变	增加	减少	不变	增加	减少	不变
地块尺度	35.00	61.47	3.53	82.57	15.28	2.15	72.99	24.95	2.06
格网尺度30 m×30 m	38.74	57.23	4.03	82.22	15.02	2.76	70.35	27.03	2.62
格网尺度300 m×300 m	38.25	58.09	3.66	83.59	14.01	2.40	68.79	28.92	2.28
格网尺度1 km×1 km	45.24	51.27	3.50	73.60	24.00	2.40	64.73	33.00	2.27

2.2　生态系统调节服务价值空间维度分析

使用自然断点法对郧阳区不同尺度下的地均调节服务价值进行分级显示制图（见图2）。结合图2分析可知，随核算精细尺度的提升，郧阳区生态系统调节服务价值核算结果中呈现出越来越细致的空间信息。不同尺度下的地均调节服务价值空间分布差异明显，均呈现“南北高、中间低”的分布特征，且高值区主要分布于西南地区鲍峡镇、叶大乡、沧浪山和北部大柳乡等森林生态系统以及郧阳区湿地生态系统分布区，低值区主要分布在中部城关镇、茶店镇、柳陂镇和东北部梅铺镇等人类活动密集城镇区。与已有郑晓豪[16]、李紫健等[17−19]研究的湖北省各类生态系统的服务价值高低分布特征一致。此外，结合图2可以看出，森林和湿地生态系统分布区对应的地均调节服务价值变化也较为显著，因而持续深入开展生态保护和修复工程，是支撑森林和湿地等生态系统对生态系统服务价值产生更大贡献的基础。

单项生态系统调节服务功能价值量贡献分析汇总不同尺度下的郧阳区各单项调节服务功能价值，得出郧阳区各单项调节服务功能价值均呈现出随核算尺度增大而减少特征，与总生态系统调节服务价值的变化趋势一致。气候调节功能价值对总调节服务价值的贡献最大，贡献价值在200.37~206.03亿元，占不同核算尺度下生态系统调节服务价值的44.01%~45.64%；水源涵养、洪水调蓄和土壤保持功能贡献价值次之，年贡献的价值均不低于53.58亿元，贡献度均在12.00%以上；其余各调节服务功能价值按贡献由大到小依次分别为固碳释氧、防风固沙、空气净化和水体净化功能价值，贡献度均不超过4.21%。

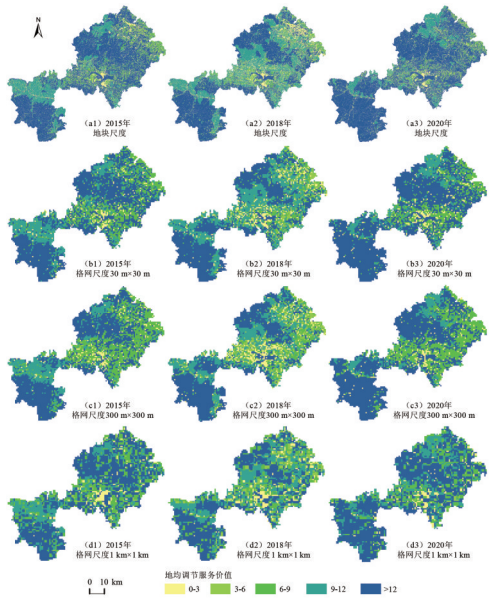


图2　2015—2020年郧阳区不同尺度下的地均调节服务价值空间分布

3　结论与讨论

本研究通过构建地块尺度以及30 m×30 m、300 m×300 m和1 km×1 km格网尺度等多尺度生态系统调节服务价值核算模型方法，探究了郧阳区不同尺度下的生态系统调节服务价值时空演变特征，主要结论如下：

1）时间维度，2015—2020年郧阳区不同尺度下的生态系统调节服务价值均呈先减少后增加的变化趋势，各年调节服务价值随核算尺度的增大而减少。各大到小核算尺度的调节服务价值整体上分别增加6.28~7.27亿元，增幅在1.41%~1.59%之间，价值增加的各地块和格网单元面积占总面积64.73%~72.99%。

2）空间维度，随核算精细尺度的提升，郧阳区生态系统调节服务价值呈现出更细致的空间细节信息。不同尺度下的地均调节服务价值均呈现出“南北高、中间低”的空间分布特征，高值区主要位于森林

和湿地生态系统分布区。

3）各单项生态系统调节服务功能价值量贡献分析表明，郧阳区各单项调节服务功能价值均随核算尺度增大而减少，与总生态系统调节服务价值的变化趋势一致。气候调节功能价值对总调节服务价值的贡献最大，不同尺度下贡献度均大于44.00%。

本研究从地块尺度和不同格网尺度探究了郧阳区生态系统调节服务价值及各单项调节服务功能价值的贡献情况，可更细致全面、多尺度对比分析生态系统调节服务价值时空演化特征差异。各格网尺度生态系统调节服务价值核算所需的土地利用栅格数据存在分类误差，造成不同尺度土地利用栅格数据与地块图斑数据中的各类生态系统空间分布差异，具有高价值产出的森林和湿地生态系统面积普遍比地块尺度小（见图1），这是各尺度生态系统调节服务价值核算结果存在差异，且各格网尺度核算结果值均比地块尺度低的主要原因。同时，对各栅格参数数据进行重采样和掩膜提取等处理，也会影响生态系统调节服务价值核算结果，引起生态系统调节服务价值时空演化特征的差异。然而，本研究仍有以下不足，生态系统调节服务价值核算涉及学科领域众多，核算指标、模型方法和参数数据等人为主观选择性较大，同时受数据可获取性等影响，使得核算结果可比性较差。其次，本研究参考已有研究从地块尺度以及30 m×30 m、300 m×300 m和1 km×1 km格网尺度对比分析了生态系统调节服务价值时空演变特征，而没有根据实验过程来确定合适分析的尺度，可能会影响本研究分析结论的科学完整性[20]。因此，今后的研究中，通过实验分析验证并针对性制定区域指标选择和核算标准，确定合适的研究和分析尺度，这对实现更精准的生态系统服务价值核算及其时空分异特征探究是非常必要的。

参考文献

[1] Liang L N,Siu W S,Wang M X,et al. Measuring Gross Ecosystem Product of Nine Cities Within the Pearl River Delta of China[J]. Environmental Challenges,2021,4:100 105

[2] Geng J,Liang C. Analysis of the Internal Relationship Between Ecological Value and Economic Value Based on the Forest Resources in China[J]. Sustainability,2021(13):6 795

[3] 牟雪洁,王夏晖,张箫,等. 北京市延庆区生态系统生产总值核算及空间化[J]. 水土保持研究,2020,27(1):265-274

[4] 陈华阳,王远,黄逸敏,等. 生态承载力与生态系统生产总值耦合的生态系统服务评估:以福建省长汀县为例[J]. 水土保持学报,2021,35(5):150-160

[5] 张乾,陈光炬,许大明. 镇域尺度下生态系统生产总值核算探索:以缙云县舒洪镇为例[J]. 丽水学院学报,2022,44(4):26-36

[6] 魏巍. 基于能值生态足迹方法与生态系统生产总值的青海省生态补偿量化研究[D]. 兰州:兰州大学,2020

[7] Ou Y X,Wei X,Wei G E,et al. The Expansion Efficiency of Urban Land in China's Urban Agglomerations and Its Impact on Ecosystem Services[J]. Habitat International,2023,141:102 944

[8] 林瑒焱,徐昔保. 长三角地区生态系统生产总值时空变化及重要生态保护空间识别[J]. 资源科学,2022,44(4):847-859

[9] Zou Z Y,Wu T,Xiao Y,et al. Valuing Natural Capital Amidst Rapid Urbanization: Assessing the Gross Ecosystem Product (GEP) of China's Chang-Zhu-tan'megacity[J]. Environmental Research Letters,2020,15(12):124 019

[10] Hao C Z,Wu S Y,Zhang W T,et al. A Critical Review of Gross Ecosystem Product Accounting in China:Status Quo,Problems and Future Directions[J]. Journal of Environmental Management,2022,322:115 995

[11] 宋昌素,欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值GEP核算研究:以青海省为例[J]. 生态学报,2020,40(10):3 207-3 217

[12] 吉玮,王光宝,李丽,等. 基于土地利用的爱辉区生态价值动态评估[J]. 地理空间信息,2021,19(2):90-95

[13] 中华人民共和国生态环境部. 陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南[S].

[14] 国家发展和改革委员会,国家统计局. 生态产品总值核算规范[M]. 北京:人民出版社,2022

[15] Fu J,Zhang Q,Wang P,et al. Spatio-temporal Changes in Ecosystem Service Value and Its Coordinated Development With Economy: A Case Study in Hainan Province,China[J]. Remote Sensing,2022,14(4):970

[16] 郑晓豪,陈颖彪,郑子豪,等. 湖北省生态系统服务价值动态变化及其影响因素演变[J]. 生态环境学报,2023,32(1):195-206

[17] 酒金柱. 湖北省土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021

[18] 熊秀海,代侦勇. 奉化市生态服务与土地利用强度的相关性分析[J]. 地理空间信息,2017,15(4):102-104

[19] 李紫健,陈江平,张伟康,等. 湖北省生态系统服务价值演变及影响因素分析[J]. 测绘科学,2023,48(1):245-257

[20] Shen J S,Li S C,Liu L B,et al. Uncovering the Relationships Between Ecosystem Services and Social-ecological Drivers at Different Spatial Scales in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Cleaner Production,2021,290:125 193