裴星羽,张军以,邱大鹅.成渝地区双城经济圈多维城乡梯度的生态系统服务价值响应及驱动因素分析 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):329-341.
Pei X Y, Zhang J Y, Qiu D E. Analysis of ecosystem service value response and driving factors along the multidimensional urban-rural gradient in the Chengdu-Chongqing Economic Circle [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):329-341.

成渝地区双城经济圈多维城乡梯度的生态系统服务价值响应及驱动因素分析

裴星羽[1],张军以[1,2*],邱大鹅[1] (1.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331；2.三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室,重庆 401331)

摘要：基于土地利用、夜间灯光、POI 数据等,利用耦合协调度、XGBoost-SHAP 模型,从格网尺度分析了 2012~2022 年成渝地区双城经济圈多维城乡梯度下的生态系统服务价值(ESV)响应特征与两者的耦合协调度(CCD)空间分异、驱动因素.结果表明:2012~2022 年成渝地区双城经济圈 ESV 呈上升趋势,增长了 129.8 亿元.城乡梯度空间分异上,近郊空间占比由 0.55%上升到 0.89%,增长了 61.8%,是增长最快的空间类型,城乡空间近郊化趋势明显.城市空间占比由 0.15%上升到 0.21%,乡村空间占比由 96.67%下降到 94.25%,城乡梯度空间分异显著.成渝地区双城经济圈的 CCD 与 ESV 在城市化空间变化上存在负相关关系,其中 CCD 处于初级协调阶段且呈缓慢下降趋势.在乡村向城市过渡方向上,ESV 呈下降趋势,CCD 呈增长趋势.人口密度、植被归一化指数、$PM_{2.5}$浓度、土地利用变化是影响成渝地区双城经济圈城乡梯度与生态系统服务价值 CCD 的重要因素,并存在非线性影响作用.

关键词：城乡梯度；生态系统服务价值；耦合协调度；成渝地区双城经济圈
中图分类号：X171 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0329-13

Analysis of ecosystem service value response and driving factors along the multidimensional urban-rural gradient in the Chengdu-Chongqing Economic Circle.

PEI Xing-yu[1], ZHANG Jun-yi[1,2*], QIU Da-e[1] (1.School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China；2.Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：329~341

Abstract：Based on land use, night-time light, POI data, etc., we used the coupling coordination degree and XGBoost-SHAP model, the response characteristics of ecosystem service value (ESV) and the spatial differentiation and driving factors of coupling coordination degree (CCD) under the multi-dimensional urban-rural gradient of Chengdu-Chongqing Economic Circle from 2012 to 2022 were analyzed from the grid scale. It was found that the ESV of the Chengdu-Chongqing Economic Circle showed an increasing trend during the study period, with a total increase of 12.98 billion CNY. In terms of spatial differentiation along the urban-rural gradient, the proportion of suburban space was observed to rise from 0.55% to 0.89%, representing a growth rate of 61.8%, making it the fastest-growing spatial category and indicating a notable trend of suburbanization. The proportion of urban space increased from 0.15% to 0.21%, while that of rural space decreased from 96.67% to 94.25%. A negative correlation between CCD and ESV was identified in the urbanization process of the Chengdu-Chongqing Economic Circle. The CCD was found to be at the preliminary coordination stage and exhibited a slight declining trend. Along the transition from rural to urban areas, ESV was shown to decrease, while CCD demonstrated an increasing trend. Key factors influencing the urban–rural gradient and the CCD of ecosystem service value were identified as population density, normalized difference vegetation index (NDVI), $PM_{2.5}$ concentration, and land use change, all of which were revealed to exhibit nonlinear effects.

Key words：urban-rural gradient；ecosystem service value；coupling coordination degree；Chengdu-Chongqing Economic Circle

工业化城市化进程中人口、产业集聚、城市扩张导致的土地利用覆被变化及其城市人口、经济规模扩张对资源和生态服务的需求急剧增长,对区域生态系统结构与过程产生了直接或间接的影响[1-2].同时,生态系统为人类社会经济运行供给生态服务的能力也将产生适应性响应,进而影响城市社会经济的发展效率和质量.21 世纪全球城市化加速,人类活动与生态系统的作用关系研究呈现显著的多学科交叉,视角多样化,特别是遥感与 GIS、大数据、人工智能等海量数据采集及分析方法的广泛应用,使其成为了可持续发展研究的核心议题之一[1,3].

生态系统服务(ES)作为量化人类发展从生态系统中获取利益或服务的关键参数, 生态系统服务价

收稿日期：2025-06-03
基金项目：国家社会科学基金一般项目(23BJY156)
* 责任作者, 教授, hellojunyi@cqnu.edu.cn

值(ESV)评估是解析人类活动对生态系统的干预效应及生态系统的响应与可持续发展能力评价的重要指标[4].1997 年 Costanza 提出全球尺度生态系统服务货币化评估框架[5].创建的当量因子法,被广泛应用于生态系统服务评估[6].谢高地等[7]在此基础上构建了适用于中国生态系统的当量因子体系与修正体系.ESV 演化影响因素多围绕 GDP、城乡居民人均收入、人口等经济因子[8-9],地类结构、土地利用以及植被等生态因子[10-11],坡度、DEM、降水等自然因子[12-13].生态系统服务价值测算及驱动因子分析从单一行政单元到多尺度网格的精细模拟[14],GLOBIO 模型、机器学习[15]等方法被广泛引入.

城市化是人类改造地理环境的重要过程[16].城市化及其自然、社会经济效应研究发展迅速,如城市化测度[17]、城市空间格局演变、模拟及驱动机制分析[18]、城市空间与自然环境交互耦合影响[19]等.城市化测度从宏观测度指标体系[20]发展到多维度不同尺度格网单元下的微观测度[21].研究尺度从全国、省域等发展到多尺度网格的城市化空间分异[21].其中,景观生态学的城乡梯度分析方法被大量应用于城市空间分异研究,以描述城市土地利用空间模式[22]、生态系统结构与功能[23]、生物多样性保护[24]、人居环境变化[25]、耕地利用多功能[26]等,但城市空间异质性与生态系统服务交互影响方面缺乏拓展.目前,城市化空间异质性研究多基于地形梯度[27]、城乡景观聚类[28]、城镇土地利用结构[29]等单维测度.受限于单一分析维度,仍难以充分反映城市化空间梯度的多维特征及其环境影响.现有研究多关注城市化对 ESV 的单向影响,多聚焦中东部发达区域[30-31]的人类活动强度[32]、经济发展质量[30]、城市碳排放[31]对生态系统服务的影响.不同城市化空间下的生态服务空间异质性显著,明确不同城市化空间下的生态服务空间异质性响应,是优化城市化空间、实现城市可持续发展的基础.

成渝地区双城经济圈社会经济快速发展,城市化与生态保护矛盾突出,不同城乡梯度下的生态系统服务响应异质性显著.文章以成渝地区双城经济圈为研究区,利用耦合协调度、XGBoost-SHAP 模型等方法,在格网尺度上从土地、人口和产业解析城市化空间梯度及其生态系统服务价值的响应变化,以期为区域可持续发展提供科学参考.

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

成渝地区双城经济圈地处四川盆地腹地,地形丘陵山地为主,属亚热带季风气候区,年均温 16~18℃,降水 1000~1300mm.行政区涵盖重庆中心城区及万州等 27 个区县,四川的成都等 15 个地市,总面积 18.5 万 km²(图 1).作为中国西部社会经济发展最快的地区.2024 年,区域常住人口 9853.5 万人,占全国总人口的 6.97%,城镇人口占比 65.6%; GDP7.8 万亿元,占全国总量的 6.45%,人均 GDP 7.9 万元.成都、重庆主城区极化效应突出,社会经济发展空间差异显著.

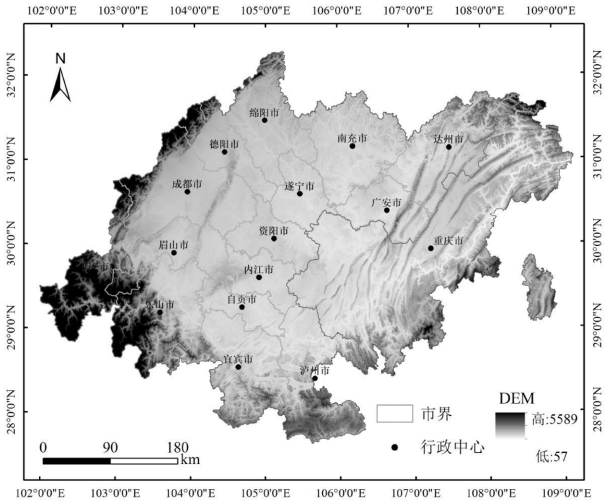


图 1 研究区地形及范围概况

Fig.1 The terrain and scope of the study area

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图无修改

1.2 数据来源

数据主要包括社会经济、自然环境、空间遥感等 8 类数据, 遥感数据利用 ArcGIS 10.8 投影校正,统一重采样为 1000m×1000m 的空间分辨率.2012、2017、2022 年土地利用数据、人口密度数据、夜间灯光数据以及二、三产业 POI 数据分别来源于武汉大学遥感信息处理研究所(http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809)、中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)、Harvard Dataverse (http://dataverse.harvard.edu)、百度地图及高德地图.2022 年高程、坡度等数据与行政区边界数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn).2012 与 2022 年

PM2.5 浓度数据来源于美国圣路易斯华盛顿大学大气成分分析组(https://sites.wustl.edu/acag/datasets/surface-pm2-5/),原始空间分辨率为 1000m×1000m. 2012、2017、2022 年粮食数据来源于《重庆市统计年鉴(2013-2023 年)》《四川省统计年鉴(2013-2023年)》《中国农产品价格调查年鉴(2013-2023)》《全国农产品成本收益资料汇编》.

2　研究方法

2.1　城乡梯度量化方法

以土地利用、夜间灯光、人口密度等数据为基础,通过对土地、人口、产业不同维度进行量化叠加得到城乡综合梯度(URG),将成渝地区双城经济圈划分为城市、近郊、远郊、乡村 4 类空间.

2.1.1　城乡土地梯度(SG)　以城乡土地利用变化特征作为依据,建立 1km×1km 的渔网相交,以每个网格内不透水面的比例为准计算得到城乡土地梯度(SG).

2.1.2　城乡人口梯度(PG)　夜间灯光数据、人口密度数据表征人类活动与人口分布状态,加权叠加得到城乡人口梯度(PG).

$$\mathrm{PG} = \alpha \cdot \mathrm{NL} + \beta \cdot \mathrm{PD} \tag{1}$$

式中:PG 为城乡人口梯度,NL 为矫正后的夜间灯光数据,PD 为成渝地区双城经济圈人口密度公里网格数据,α、β为权重系数.

2.1.3　城乡产业梯度(IG)　以成渝地区双城经济圈二、三产业 POI 数据为基础,以工厂、工业园区(建筑工地、矿区及矿产资源勘查区、冶金工厂等)表征第二产业;公司企业(网络科技、营销公司等)、餐饮服务(中西餐厅、综合酒楼等)、购物服务(综合商场、建材市场等)、住宿服务(酒店、民宿等)表征第三产业,并构建 1km×1km 格网单元,统计每个格网的 POI 点数量进行核密度、归一化处理计算城乡产业梯度(IG).

表 1　成渝地区双城经济圈城乡梯度类型划分标准

Table 1　Classification standard of urban-rural gradient type in Chengdu-Chongqing Economic Circle

类型	乡村空间	远郊空间	近郊空间	城市空间	权重
土地	0~0.05	0.05~0.15	0.15~0.5	0.5~1	0.28
人口	0~0.15	0.15~0.3	0.3~0.55	0.55~1	0.37
产业	0~0.08	0.08~0.15	0.15~0.3	0.3~1	0.35
综合		0.08~0.28	0.28~0.55	0.55~1	1

在充分参考已有多维度城市化水平测度研究的情况下划分各维度梯度类型的区间标准(表 1),结合德尔菲法对各维度进行赋权叠加得到城乡综合空间梯度(URG).

2.2　生态系统服务价值测算

本文基于成渝地区双城经济圈的生态系统服务特征,对中国单位面积生态系统服务价值当量因子表进行了修正[7],选择小麦、稻谷和玉米表征研究区粮食生产状况,计算粮食均价后,根据生态系统服务标准当量系数(区域平均粮食市场价值的 1/7[33]),确定研究区标准当量系数.公式为:

$$E_{\mathrm{a}} = \frac{1}{7}\sum_{i}^{n}\frac{m_i \times p_i \times q_i}{M} \tag{2}$$

式中:E_{a} 为单位面积农田生态系统服务价值,元/hm^2,是单位面积作物市场经济价值的 1/7;i 为粮食作物种类;M 为粮食作物总种植面积,hm^2;m_i 为第 i 种粮食作物面积,hm^2;p_i 为第 i 种粮食作物的平均价格,元/kg;q_i 为第 i 种粮食作物单位面积产量,kg. 网格单元单一土地利用类型的生态系统服务价值计算公式:

$$\mathrm{ESV}_I = \sum_{j=1}^{n} A_{ij}\mathrm{VC}_i \tag{3}$$

网格单元生态系统服务价值计算公式:

$$\mathrm{ESV}_{ij} = \sum_{j=1}^{m}\mathrm{ESV}_j \tag{4}$$

$$C = \frac{\mathrm{AESV}_{t2} - \mathrm{AESV}_{t1}}{\mathrm{AESV}_{t1}} \times 100\% \tag{5}$$

式中:ESV_i 为单元格中第 i 类土地利用类型的生态系统服务价值,元/(hm^2·a);VC_i 为第 i 种土地利用类型的生态系统服务价值系数,m 为土地利用类型的总数;AESV_{t1} 和 AESV_{t2} 为不同时期地均生态系统服务价值,元/hm^2;C 为地均生态系统服务价值变化率(%);n 为土地利用类型数量.

2.3　耦合协调度模型

耦合协调度模型(CCD)表示两个或者两个以上系统之间相互影响程度[46].多维城市化系统与生态系统服务间是两个一定程度上相互独立相互作用的系统,故采用 CCD 模型来进行评价.采用极值法进行标准化处理,具体公式不再赘述.数学表达式:

$$C = \left\{(U_1 \times U_2)/\left[\frac{U_1 + U_2}{2}\right]^2\right\}^{1/2} \tag{6}$$

式中:C 代表耦合度水平;U_1 和 U_2 代表多维城市化与生态系统服务价值.其中,C 的取值为[0,1],越趋向 1,则其耦合水平越高.耦合协调度(CCD)来表示两系统的协调发展水平,数学表达式:

$$D=\sqrt{C+T} \tag{7}$$

$$T=aU_1+bU_2 \tag{8}$$

式中:D 代表耦合协调度;a 和 b 为待定系数,本研究取 a=b=0.5[21].其中 D 的取值在[0,1]之间,其值越趋向 1 则代表两系统的耦合协调程度越深.

2.4 XGBoost-SHAP 模型

XGBoost 模型相比传统算法具有性能和稳健性方面的优势.目标函数为:

$$L(\phi)=\sum_i l\left(y_i,\hat{y}_i\right)+\sum_k \Omega\left(f_k\right)g\left(z^{'}\right)=\phi_0+\sum_{j=1}^{M}\phi_j z_j^{'} \tag{9}$$

式中:i 为第 i 个样本;k 为第 k 个树;$\hat{y}_i$ 为第 i 个样本 X_i 的预测值,$\Omega(f_k)$为正则化项,$\Sigma_k\Omega(f_k)$为 k 棵树的复杂度.

SHAP 模型将输出值归因到每一个特征的 Shapely 值上,以此衡量各因子对最终输出值的影响.其公式为:

$$g\left(z^{'}\right)=\phi_0+\sum_{j=1}^{M}\phi_j z_j^{'} \tag{10}$$

式中:M 为驱动因子的数目;z_j'表示相应因子是否存在;ϕ_j 为每个驱动因子的归因值;ϕ_0 为常数.

3 结果分析

3.1 城乡梯度时空特征分析

城乡综合空间梯度. 2012~2022 年,成渝地区双城经济圈城乡综合空间梯度呈现“两核多点、西高东低”的空间特征,城市空间缓慢持续扩张(图 2). 2012~2022 年,乡村空间占比由 96.67%下降到 94.25%,变化较小;远郊空间占比由 2.61%上升到 4.64%,增长相对显著;近郊空间占比由 0.55%上升到 0.89%;城市空间占比由 0.15%上升到 0.21%,增长了 40%.城乡综合梯度空间上,区域城市化呈现出明显的空间“极化”缓扩趋势.以重庆、成都为核心的地区呈现出明显的空间“极化”,其周边城市化迅速降低,城乡综合空间梯度呈现较强的中心辐射效应,也表明区域的城市化整体水平相对不高.其中,重庆受地形限制城乡空间梯度呈带状变化,呈现典型的非均衡模式.

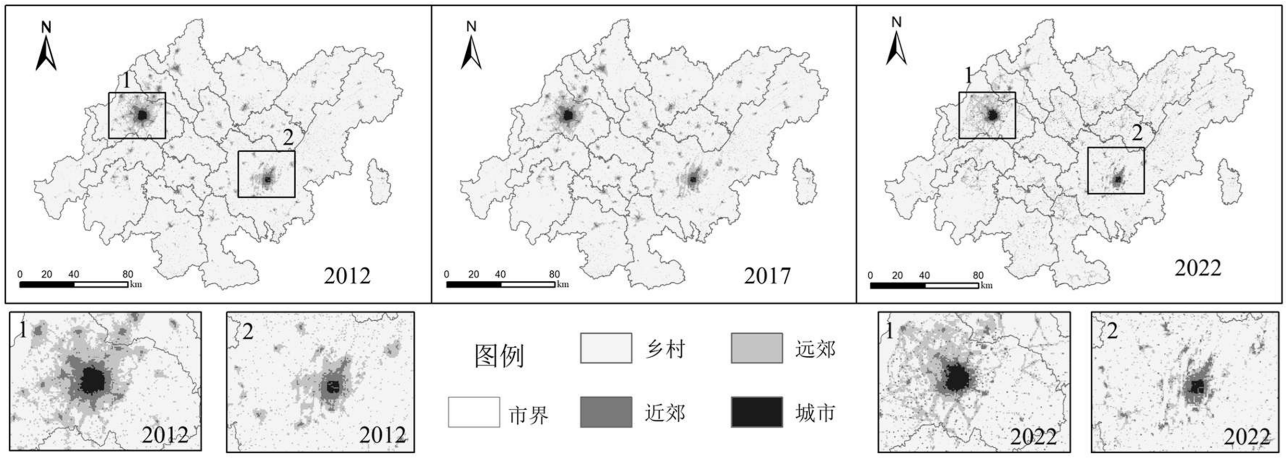


图 2 2012~2022 年成渝地区双城经济圈城乡综合空间梯度

Fig.2 2012~2022 the urban-rural gradient in Chengdu-Chongqing Economic Circle

城乡土地空间梯度. 2012~2022 年,成渝地区双城经济圈城乡土地梯度空间特征无明显变化,即以成都、重庆都市区为核心,呈现显著的空间极化效应,城市空间向外辐射递减,成都城市化土地空间占比略高于重庆(图 3).乡村空间占比基本稳定,变化幅度很小,仅由 99.1%下降到 98.7%,远郊空间占比从 0.58%上升到 0.79%,近郊空间占比从 0.14%上升到 0.24%.城市空间占比从 0.16%上升到 0.18%.表明区域整体城市化水平较低,以不透水面表征城市化土地空间主要集中在各级城市的核心区,且区域城市化空间“极化”效应显著,没有形成发展梯度合理的城市体系,如资阳、遂宁、重庆西部等区域向城市过渡趋势明显,但达州、雅安等距成渝核心都市区距离较远,城市化缓慢.

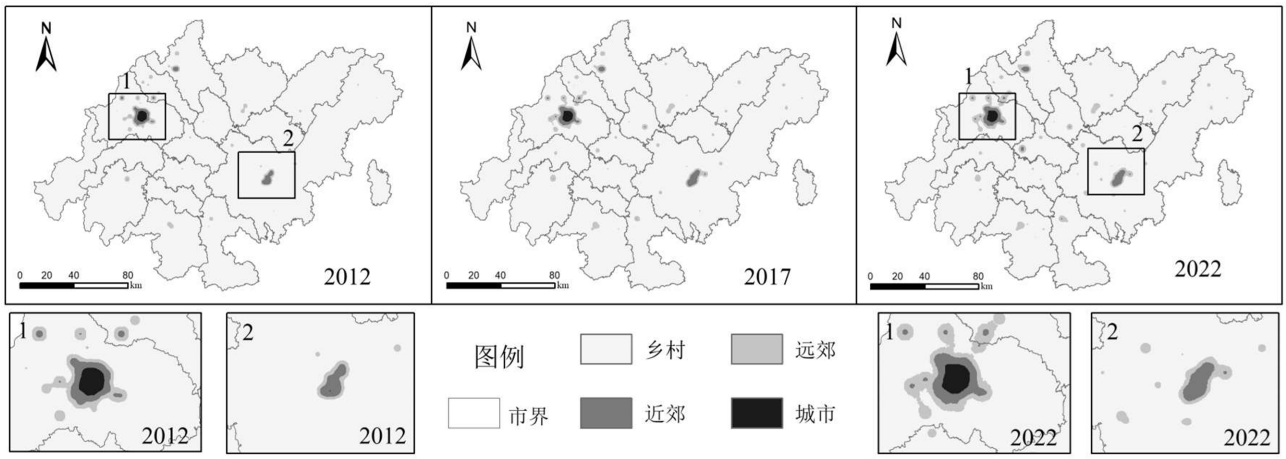


图 3　2012~2022 年成渝地区双城经济圈城乡土地梯度

Fig.3　2012~2022 the urban−rural gradient of the land in Chengdu−Chongqing Economic Circle

城乡人口空间梯度.2012~2022 年,成渝地区双城经济圈城市人口梯度高值区主要集中在成都、重庆主城都市区,近郊空间梯度、部分城市空间梯度分布在成都和重庆两城市外围以及各市县区核心城区,其余区域大部区域为远郊及乡村空间.城乡人口空间梯度呈现“一圆一带、高值分散”的空间特征(图 4).

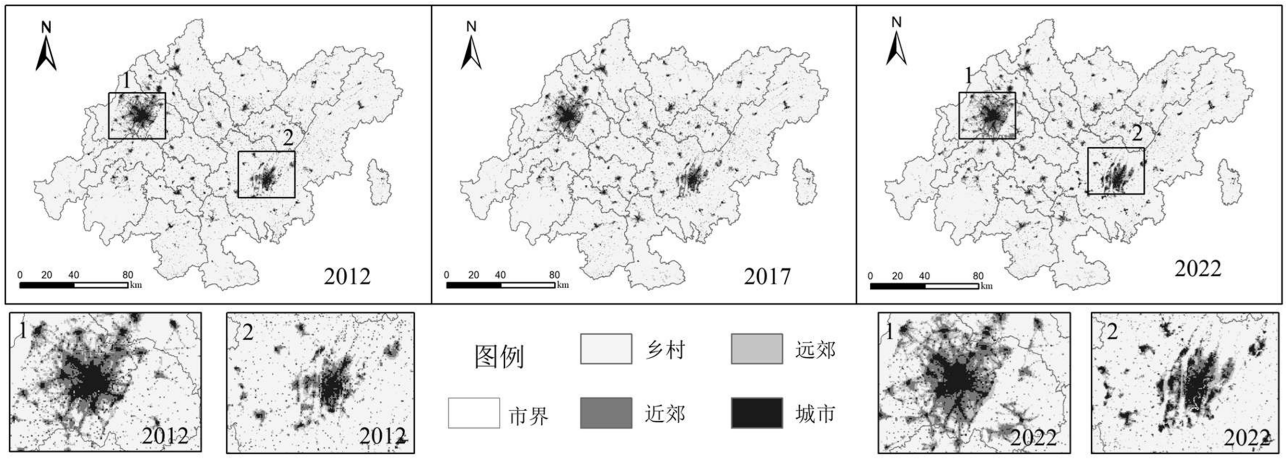


图 4　2012~2022 年成渝地区双城经济圈城乡人口梯度

Fig.4　2012~2022 the urban−rural gradient of the population in Chengdu−Chongqing Economic Circle

成都城市空间占比由城市核心区的高值向外围呈圆环状递减.重庆受城市平行岭谷地形影响,城乡人口梯度呈南北向带状分布,与地形空间基本一致.2012~2022 年,乡村空间占比由 96.3%下降到 93.55%,远郊空间占比分布由 1.86%上升到 3.31%,近郊空间占比由 1.04%上升到 1.73%,城市空间占比由 0.79%上升到 1.32%,整体变化较小.整体上,各市县区人口维度城市化水平均处于上升状态,同时呈现出明显的空间“极化”效应,受成都、重庆主城都市区两个“极化”核心影响显著,距离较近的城市发展速度相对迅速,如广安、泸州、德阳等.

城乡产业空间梯度.2012~2022 年,成渝地区双城经济圈城乡产业空间呈现“两核多点、沿核扩张”的空间特征,产业城市集中度极高(图 5).2012 年城市、近郊及远郊空间集中分布在成都、重庆主城区等城市化核心城区,其余地区为乡村空间;2017 年成都、重庆产业空间持续扩大的同时,泸州、铜梁、合川等地出现城乡产业远郊空间;2022 年成都、重庆产业空间辐射范围进一步扩大,产业空间远郊、近郊空间扩张至城市周边的绵阳、合川、潼南等市县区.

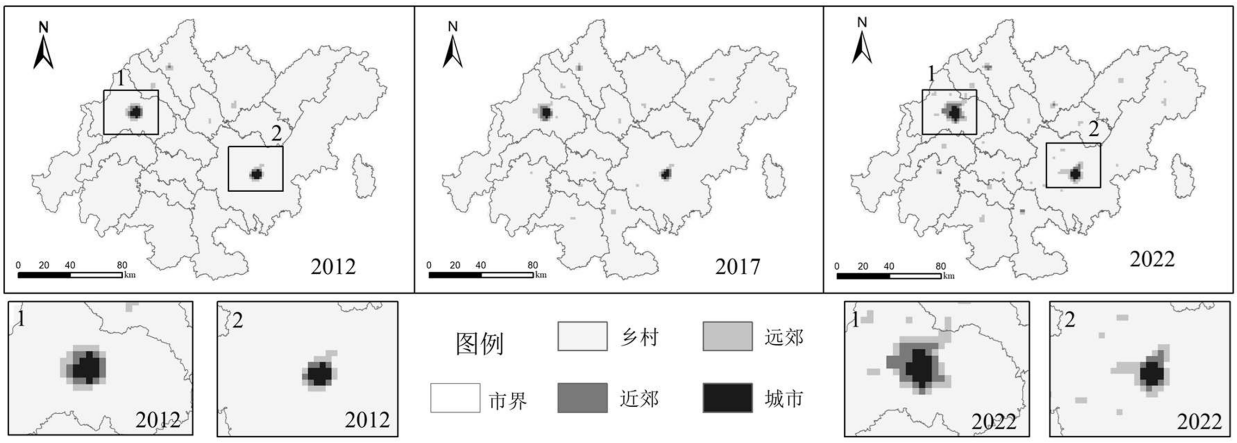


图 5 2012~2022 年成渝地区双城经济圈城乡产业梯度

Fig.5 2012~2022 the urban-rural gradient of the industry in Chengdu-Chongqing Economic Circle

2012~2022 年,成渝地区双城经济圈乡村空间占比稳定,变化很小,由 98.9%下降到 97.68%;远郊空间占比由 0.56%上升到 1.41%;近郊空间占比由 0.24%上升到 0.55%;城市空间占比由 0.3%上升到 0.36%.其中远郊空间占比涨幅达到 152%,增长速度最快,受交通条件改善及产业扩散影响,远郊空间在各市县区均有分布.

3.2 生态系统服务价值时空变化特征

2012~2022 年成渝地区双城经济圈的生态系统服务价值由 4248.2 亿元增至 4378 亿元,增幅较小,呈现“四周高、中间低、西高东低”的格局(图 6).

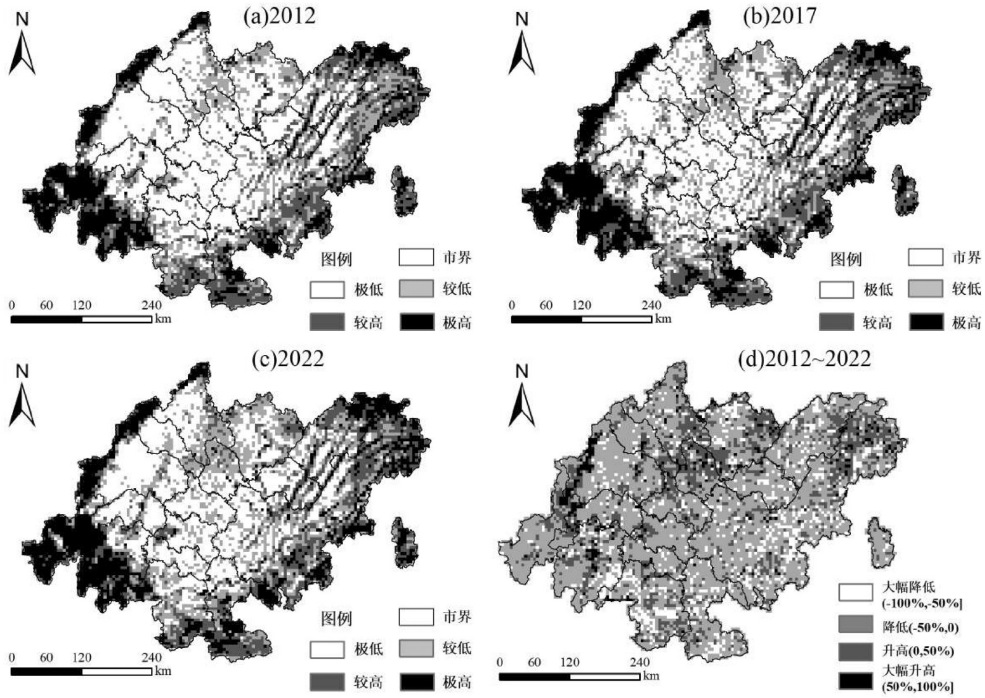


图 6 2012~2022 年成渝地区双城经济圈生态系统服务价值空间特征

Fig.6 2012~2022the ecosystem service value of Chengdu-Chongqing Economic Circle

结合现有生态系统服务价值分类依据与自然断点法[12],将区域 ESV 分为极低、较低、较高、极高四类区域,成渝地区四川盆地边缘和长江及支流沿岸 ESV 较高,ESV 高值区位于雅安市大渡河流域.为明确研究区 ESV 变化的空间分异特征,参考已有生态系统服务价值变化率分类标准[21],将 2012~

2022 年 ESV 的变化率(ESVC)划分为大幅降低(ESVC≤−50%)、降低(−50<ESVC<0)、升高(0<ESVC<50%)以及大幅升高(ESVC≥50%)四个等级(图 7).2012~2022 年 ESV 空间分异特征显著,61%的区域 ESV 呈降低和大幅降低态势,39%的区域 ESV 呈升高和大幅升高态势.ESV 增长高值区主要位于川西地区,增长率达 300%;低值区位于宜宾市,增长率为−54%.2012~2022 年网格尺度上 ESV 增长区主要分布在成都市区及周边地区、重庆渝东北,降低区主要集中在川南地区.

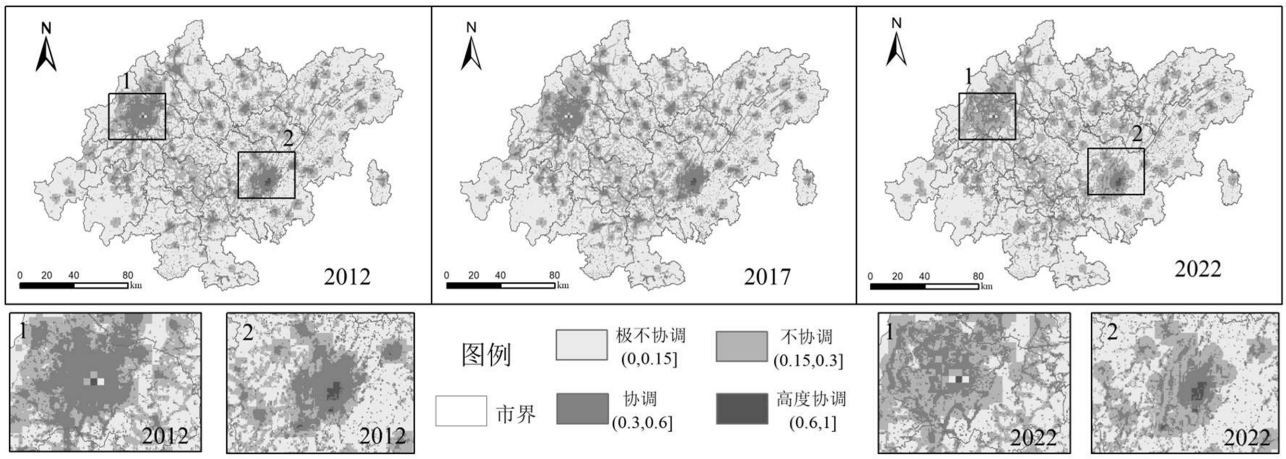


图 7　2012~2022 年成渝地区双城经济圈 CCD 时空格局特征

Fig.7　2012~2022 the spatial and temporal evolution of CCD in Chengdu−Chongqing Economic Circle

3.3　城乡梯度与生态系统服务价值耦合协调分析

结合已有城市、生态系统耦合研究[21,30,34]及研究区自然、社会经济发展现状,将城乡梯度与生态系统服务价值耦合协调度(CCD)划分为极不协调(≤0.15)、不协调(0.15~0.3)、协调(0.3~0.6)、高度协调(>0.6)4 个等级.2012~2022 年 CCD 呈“四周高、中间低、东高西低”的空间格局(图 8),耦合协调度均值从 0.165 下降到 0.149,呈缓降趋势.

空间上,2012~2022 年重庆 CCD 水平显著高于成都及其周边地区.CCD 高值均出现在重庆主城区,2012,2017,2022 年 CCD 分别为 0.759,0.737,0.76.成都主城区 CCD 稳定在较低水平,呈下降趋势,波动幅度小.分析认为,重庆主城位于川东平行岭谷,山地与城市相间分布,形成了“山城相嵌”的空间格局,使重庆主城区形成良好的协调状态.

3.4　不同城乡梯度下生态服务价值及耦合协调特征

2012~2022 年成渝地区双城经济圈不同城乡梯度下 ESV 形成了“近郊−远郊−乡村”层级递减的变化整体特征(图 9(a)).乡村地区 ESV 稳定在较高水平,波动幅度小,表明整体上成渝地区双城经济圈城市化发展尚未对乡村地区形成显著带动作用,即城乡综合空间尚未发挥出明显的空间溢出效应;近郊、远郊地区 ESV 下降,生态系统服务供给能力有所下降,表明其受城市化辐射带动作用较强;城市地区 ESV 稳定在较低水平,分析认为成渝地区双城经济圈尤其是以成都、重庆为核心的两大都市区城市化水平较高,已处于城市化成熟阶段,城市绿地空间受城市建成区空间严格显著,ESV 较低且稳定.成渝地区双城经济圈生态服务价值与耦合协调度空间分布具有空间异质性,其耦合协调度空间变化表现为“近郊>城市>远郊>乡村”(图 9(b)).近郊地区为城乡梯度与 ESV 耦合协调度的高值区,城市地区次之,表明城市地区对近郊地区具有显著的辐射带动作用,但并未显著挤压近郊地区生态空间或是说近郊地区类似“城乡”过渡区,故 CCD 稳定在较高水平;远郊地区 CCD 呈缓慢下降趋势,表明其承接了城市、近郊地区的辐射扩散作用.CCD 整体呈现“城市−近郊−远郊”逐级递减的变化趋势,但各层级的差距较小;乡村地区城乡梯度与 ESV 耦合协调度稳定在较低水平,分析认为成渝地区双城经济圈核心城市对远郊以外的乡村地区辐射非常有限,乡村人地关系地域系统处于相对独立的发展态势,即乡村发展并未对生态系统造成显著的胁迫扰动,且受乡村人口流出影响呈下降趋势.

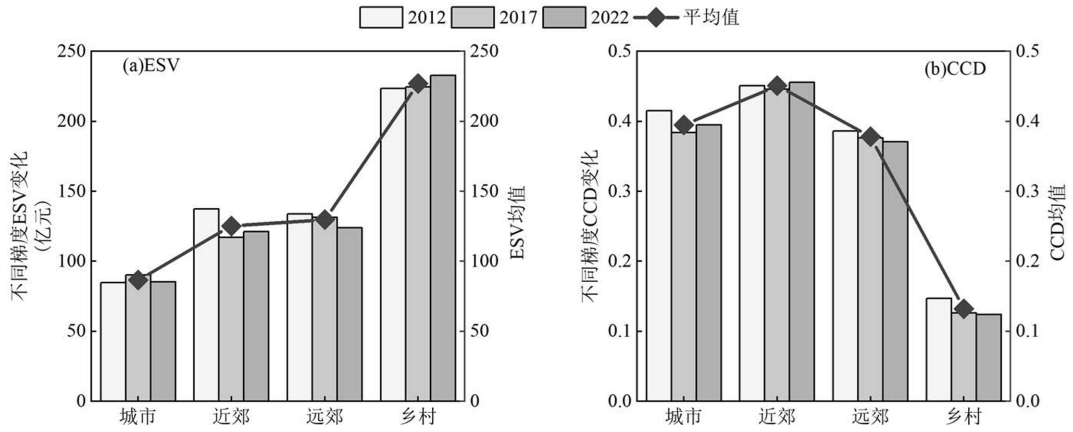


图 8 2012~2022 年成渝地区双城经济圈 ESV 及 CCD 梯度差异

Fig.8 2012~2022 the gradient difference of ESV and CCD in Chengdu-Chongqing Economic Circle

3.5 城乡梯度与生态服务价值耦合协调驱动因子

XGBoost 模型评估中,精确率与召回率分别为 92.62%、80.04%,F1 分数为 85.87%,表明该模型在本研究中具备良好的精度和查全能力.成渝地区双城经济圈城乡梯度与生态系统服务价值 2012 年、2022 年驱动因子训练集、测试集均值分别为 94.09%、92.86%,表明模型准确性较高,适用于本研究.

基于研究区自然及社会经济因素,参考城市化与生态系统服务价值驱动因素分析相关研究[35-36],自然因素选取高程(DEM)、年平均气温(TEM)、归一化植被指数(NDVI)、坡度(SLOP)、植被净初级生产力(NPP)和年平均降水(RAIN)以及社会经济因素选取土地利用变化(LUCC)、人口密度(POP)和 $PM_{2.5}$ 浓度($PM_{2.5}$)等 9 个因子对成渝地区双城经济圈进行分析.

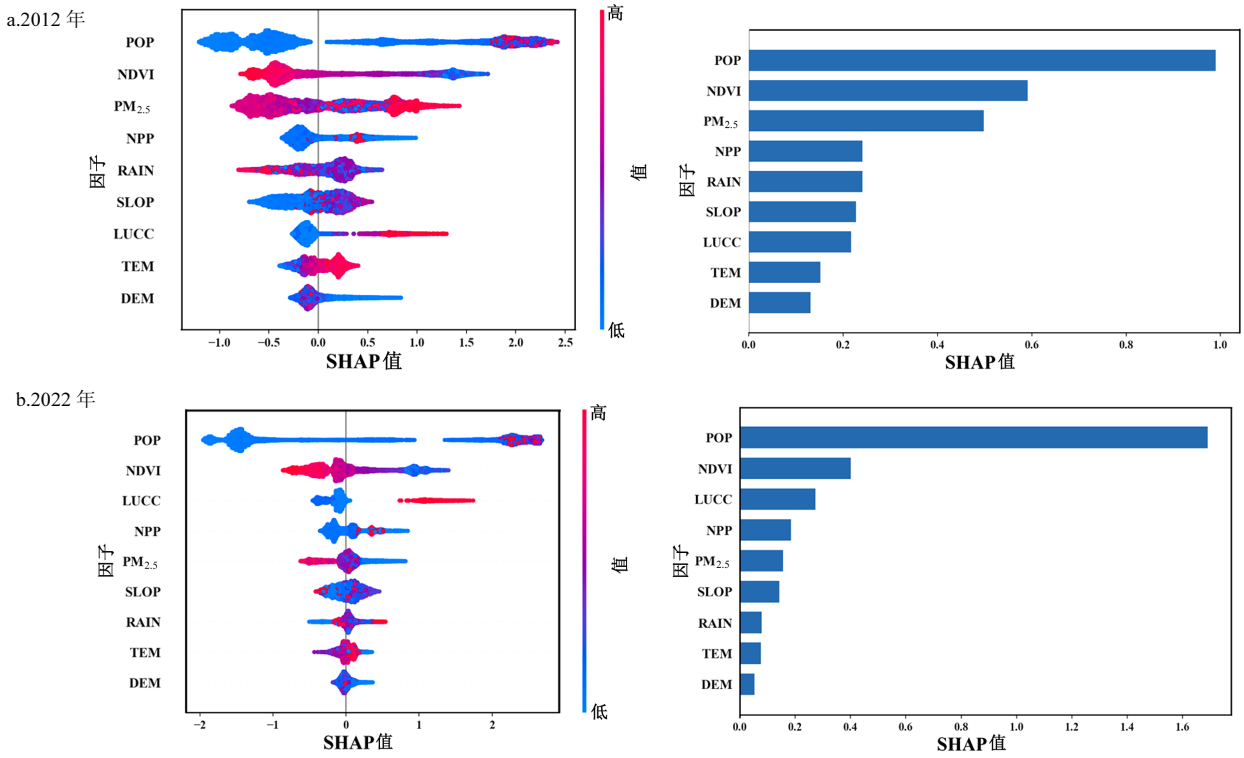


图 9 2012~2022 年成渝地区双城经济圈 CCD 的 SHAP 特征分析

Fig.9 2012~2022 analysis of SHAP characteristics of CCD in Chengdu-Chongqing Economic Circle

3.5.1 贡献度分析

2012~2022 年成渝地区双城经济圈城乡梯度与生态服务价值耦合协调驱动因子

贡献度排序前 3 位的因素分别是人口密度、植被归一化指数、$PM_{2.5}$ 浓度(2012 年)和土地利用(2022 年),其中人口密度贡献最高(图 9).

人口密度的 SHAP 值在−1~2.5,跨度最大,表明人口密度对城市化与生态服务价值耦合的影响最为剧烈且影响振幅宽,对两者的耦合以正向作用为主,人口密度越高城市化与生态服务价值的耦合作用越强.植被归一化指数 SHAP 值在−0.8~1.7,对城市化与生态服务价值的耦合的影响次之,以正向作用为主,NDVI 高意味着地表植被覆盖好,以森林、草地等高生态系统服务价值系统能有效支撑城市化的生态服务需求,强化两者耦合.$PM_{2.5}$ 浓度的 SHAP 值在−1~1.5 之间,也以正向作用为主,在城市化快速发展的初级阶段,$PM_{2.5}$ 排放强度能够有效表征工业化对城市化的推动作用.

3.5.2　关键驱动因子临界阈值分析　基于 SHAP 模型生成的单变量非线性关系能揭示驱动因子对成渝地区双城经济圈城乡梯度与生态服务价值耦合协调关系影响的临界阈值(图 10).重要性排序前三的因子分别是人口密度、植被归一化指数、$PM_{2.5}$ 浓度(2012 年)和土地利用状况(2022 年).

2012~2022 年人口密度的 SHAP 值均是恒定的,表明人口密度对城乡梯度与生态服务价值耦合协调度的影响以线性作用为主,是最重要的影响因子.人口密度越高,城乡梯度与生态系统服务价值的耦合协调度越高,反之则越低.分析认为人口密度越大,人类工农业生产活动对生态系统的扰动影响越大,生态系统的响应越剧烈,人类活动与生态系统服务变化的耦合就越强烈.在未超过生态系统承载阈值的前提下,高密度人口意味着高城市化水平,高经济发展水平,以及较优化的产业结构,较高的生态修复建设投入,随着人口密度的增加,城市空间与生态系统服务价值的耦合协调度越高.

植被归一化指数与城乡梯度与生态系统服务价值的耦合协调呈非线性负相关,且存在明显的阈值.当植被归一化指数<0.7 时,产生正向影响,城市空间与生态空间达到一个较好的平衡状态,推进了两者的耦合协调;植被归一化指数>0.7 时,产生负向影响,区域城市发展空间小,对区域生态系统的扰动影响小,耦合指数小,故城乡梯度与生态系统服务价值耦合协调度低,起抑制作用.

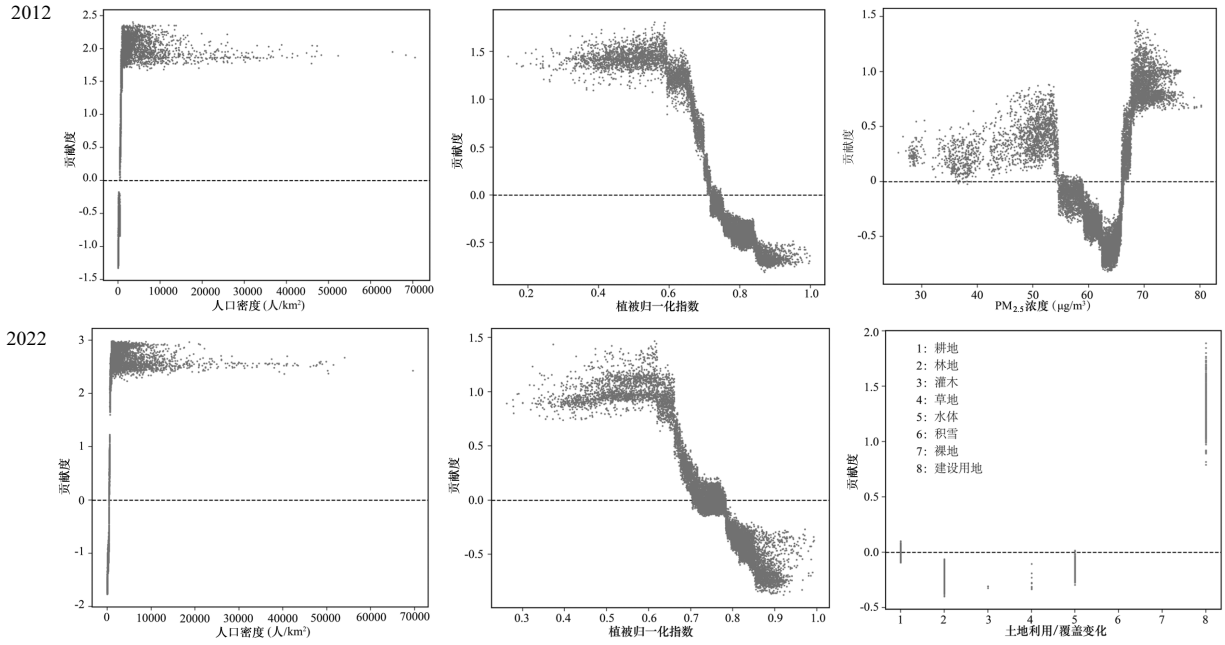


图 10　基于 SHAP 依赖图的成渝地区双城经济圈 CCD 影响因素

Fig.10　The influencing factors of CCD in Chengdu−Chongqing Economic Circle based on SHAP dependence graph

$PM_{2.5}$ 浓度变化与城乡梯度和生态系统服务价值的耦合协调度呈显著的“U”型非线性作用关系,存在 55 和 70 两个临界阈值.当 $PM_{2.5}$ 浓度处于 0~55 时,耦合协调度随 $PM_{2.5}$ 浓度的增加而上升;$PM_{2.5}$ 浓度处于 55~70 时,对耦合协调度起负向影响;当 $PM_{2.5}$ 浓度超过 70 后,其影响再次转为正向影响.分析认为在

$PM_{2.5}$ 浓度低于 55 时,一般城市化进程初级阶段对生态系统的扰动效应逐渐显现,但尚在生态系统韧性阈值内,未能显著影响生态系统服务功能,但此时城乡梯度与生态系统服务价值相互耦合作用增强,协调度相对稳定,$PM_{2.5}$ 浓度与二者耦合协调度提升呈同向发展趋势,或是说 $PM_{2.5}$ 浓度升高表征了城市化进程对生态系统的扰动及系统的响应调节.同理,当 $PM_{2.5}$ 浓度达到 55~70 时,城市化进入快速发展阶段,对生态系统的胁迫干扰强,但仍未超过生态系统的韧性阈值,生态服务功能仍维持基本稳定,但城乡发展与生态保护间的冲突加剧,协调度显著降低,表现为耦合协调度下降.当 $PM_{2.5}$ 浓度超过 70,城市化进程进入高水平缓慢发展阶段,同时,生态修复、产业结构升级以及环境治理要求的提升,显著改善了城乡发展与生态环境的协调度,两者耦合协调度进入协同上升通道.这一发现与 Wang 等[37]学者开展的 $PM_{2.5}$ 浓度与城市化发展关系的阈值效应研究结论相吻合,同时也验证了“U”型环境库兹涅茨曲线理论在城乡梯度与生态系统服务价值耦合协调关系中的适用性.

4 讨论

4.1 成渝地区双城经济圈城乡梯度与 ESV 空间特征

2012~2022 年成渝地区双城经济圈空间、人口、产业以及综合维度上的城乡梯度均呈现“两核多点、辐射扩散”的空间特征,这与已有成渝地区城市化“两极化”格局的研究结论基本一致[38-39].同时,也侧面印证了成都、重庆主城区两大核心城市在成渝地区双城经济圈的空间极化特征,及成渝地区双城经济圈整体城市化水平偏低的现状.具体空间来看,重庆主城区受平行岭谷地形空间限制,形成了组团式的城市空间结构,但也很好的提高了重庆主城区的森林等绿地面积.成都则呈现明显的环状扩张空间.人口层面,2015 年后成渝高铁、成渝环线高速等交通基础设施建设,区域内外交通便捷度迅速提升,促进了区域内外及城乡间人口、资金、技术的双向流动,加快了区域人口城市化水平;产业层面,同样受益于交通基础设施完善的交通通达性提高,以及国家推进成渝相向融合发展的战略(重庆向西、成都向东),如成渝地区双城经济圈建设,加快了以成都、重庆主城为核心,周边次中心城市为支撑的“二极多点”城市空间,加速了成渝相向融合发展,奠定了成渝地区双城经济圈产业城市化空间格局的基本骨架,促进区域均衡发展.

受工业化、城市化驱动的城镇建设用地持续扩展,区域生态空间呈持续缩小的趋势,但区域 ESV 有所增加,这表明已有生态系统的多数处于正向演替发展状况,系统生产力持续提升.分析认为,区域城市化进程主要导致了耕地占用,在占补平衡原则下,耕地总量不变,但成渝坡耕地占比高,25°以上退耕还林、土地石漠化及水土流失治理,水保林、长江及其支流防护林等建设,加之生态红线约束,生态修复建设的深入实施,尤其是林地呈增加趋势,从而实现了城市化与 ESV 协调提高[34,40].

4.2 不同城乡梯度的 ESV、CCD 空间响应

2012~2022 年成渝地区双城经济圈生态系统服务价值城乡空间梯度上“城→乡”空间方向呈递增趋势,ESV 受土地利用类型的空间限制,高值区集中在城市外围,形成了自乡村向城市递减的空间变化规律.但成渝地区双城经济圈城乡梯度与生态系统服务价值耦合协调度在“乡→城”空间向上呈递增趋势,与城市化的响应关系呈正相关,这与已有城市化空间与生态系统服务价值耦合研究结论不同[21,41].研究表明同一地区不同空间尺度上 ESV、CCD 的空间响应特征与地区整体响应不同[21].成渝地区双城经济圈大部分地区城乡梯度与生态系统服务价值的 CCD 处于非协调状态,且呈缓慢下降趋势,耦合协调度最高的空间类型为近郊空间,分析认为近郊空间为城市化快速发展地区,城市化进程对生态系统的胁迫扰动最强烈,但尚未超过系统的韧性阈值,两者耦合作用处于高值区,但协调度降低,故耦合协调度降低.同理,乡村人类的胁迫扰动小,两者耦合度变化不大,但协调度相对较高,耦合协调度较低,因此成渝地区双城经济圈整体城市化空间与生态系统服务价值均值较低,且呈缓慢下降趋势,这也从侧面直接反映了成渝地区双城经济圈多维城市化空间的“极化”效应显著,未能形成显著的空间外溢,整体城市化水平较低.

成渝地区双城经济圈整体山地占比高,尤其是重庆、雅安、万州等城市,城市空间地形起伏远高于东部城市.地形起伏虽限制了城市宏观空间格局,但也形成了山地与高密度建成区“山城相嵌”的城市化空间格局.“山城相嵌”影响了城市空间绿地的连

通性、阻隔了生态流,加剧了城市生境破碎,阻碍了城市空间与生态系统耦合协调提升[42].故成渝地区双城经济圈城市及近郊空间城乡梯度与生态系统服务价值的 CCD 要显著高于乡村及远郊地区,并明显区别于东部发达地区的平原城市[21].

4.3　成渝地区双城经济圈 CCD 驱动因素分析

一般人口密度越大,人类生产活动对生态系统的胁迫扰动越大.研究区 $PM_{2.5}$ 的影响作用与临界阈值表明,在人口密度相近的条件下,应关注产业结构对 $PM_{2.5}$ 的显著影响.$PM_{2.5}$ 相同水平下,不同的产业结构对生态系统的胁迫扰动差异显著[8].成渝地区双城经济圈 $PM_{2.5}$ 主要来源于工业生产,与产业结构联系紧密,近年来其产业结构已由传统高污染产业转变为电子信息、高端材料制造业等新型主导产业[43],区域 $PM_{2.5}$ 浓度上升,但区域产业对生态系统的胁迫扰动反而更弱.识别出 $PM_{2.5}$ 影响的临界阈值(55~70)已接近或超过《环境空气质量标准》(GB 3095−2012)的 $PM_{2.5}$ 二级浓度限值(24h 均值 75μg/m^3),表示该浓度已触及潜在的人体健康与生态风险阈值.这意味着成渝地区双城经济圈产业结构变化对生态系统胁迫扰动,虽未能明显影响区域生态系统的稳定,但对人类健康的潜在影响风险极高.

植被归一化指数的驱动分析结果表明,在维持一定面积生态用地的前提下,提升生态用地的初级生产力是增强生态系统服务供给能力的有效途径.如喀斯特地区单位面积森林生态系统的初级生产力仅为同纬度森林生态系统的二分之一,具有很大提升空间,但森林郁闭度上与同纬度森林生态系统并无明显差异.这表明生态系统初级生产力是生态系统服务供给能力的核心影响因素,不能仅考虑植被覆盖度.城市化进程及其环境效应受多种自然、社会经济因素的交互影响,需注意影响因子驱动作用具有非线性多临界阈值的特征.

5　结论

5.1　从空间、人口、产业维度及综合维度量化了成渝地区双城经济圈城乡发展空间梯度,成渝综合城乡梯度呈明显的空间“极化”效应,并沿交通线呈较强辐射作用,成都地区的城市化发展高于重庆地区.

5.2　成渝地区双城经济圈整体 ESV 有所上升,空间分布呈现出“四周高、中间低、西部高于东部”的基本格局.2012~2022 年 ESV 变化率呈现为生态空间下降、生态系统服务价值上升的负相关状态.

5.3　成渝地区双城经济圈城乡梯度与生态系统服务价值耦合协调水平整体较低,并呈缓慢下降状态,空间格局呈“东高西低”,CCD 高值出现在重庆主城区.成渝地区双城经济圈的 ESV 沿乡村−远郊−近郊−城市逐级衰减,递减率在乡村与远郊梯度之间最大;CCD 高值区位于近郊空间,低值区位于乡村空间,波动幅度较小.人口密度和植被归一化指数对成渝地区双城经济圈城乡梯度与生态系统服务价值的耦合协调具有重要影响,$PM_{2.5}$ 浓度对 CCD 的驱动重要性随城市化发展有所下降.

参考文献：

[1] Tu G Y, Lu Q, Zhang F Q, et al. The spatio−temporal interactions between rapid urbanization and multiple ecosystem services at the county scale in the Poyang Lake Basin [J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2025,16(1):2480252.

[2] 聂家龙,官冬杰,樊晓风,等.长江流域城市蔓延对生态系统服务损失量的影响分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2147−2158.
Nie J L, Guan D J, Fan X F, et al. Analysis of the impact of urban sprawl on the loss of ecosystem services in the Yangtze River Basin [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2147−2158.

[3] Wang C, Liu Y, Chen J, et al. Turning points of the relationship between human activity and environmental quality in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2025,119:106123.

[4] Gashaw T, Tulu T, Argaw M, et al. Estimating the impacts of land use/land cover changes on Ecosystem Service Values: The case of the Andassa watershed in the Upper Blue Nile basin of Ethiopia [J]. Ecosystem Services, 2018,31:219−228.

[5] Costanza R. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387:253−260.

[6] 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.

[7] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值 [J]. 资源科学, 2015,37(9):1740−1746.
Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, etc. The value of ecosystem services in China [J]. Resource Science, 2015,37(9): 1740−1746.

[8] 耿甜伟,陈　海,张　行,等.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 [J]. 自然资源学报, 2020,35(7): 1714−1727.
Geng T W, Chen H, Zhang X, et al. Spatial−temporal evolution characteristics and influencing factors of ecosystem service value in Shaanxi Province based on GWR [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(7):1714−1727.

[9] Chen S, Li G, Xu Z G, et al. Combined impact of socioeconomic forces and policy implications: Spatial−temporal dynamics of the ecosystem services value in Yangtze River Delta, China [J]. Sustainability,

2019,11(9):2622.

[10] 陈美景,王庆日,白中科,等.黄河流域资源型城市土地利用转型及其对生态系统服务价值的影响 [J]. 生态学报, 2023,43(22):9459-9470.
Chen M J, Wang Q R, Bai Z K, et al. Land use transition and its impact on ecosystem service value in resource-based cities in the Yellow River Basin [J]. Ecology, 2023,43(22):9459-9470.

[11] 宋心馨,张守志,王淑琪,等.基于 PLUS 模型的图们江流域生态系统服务价值情景模拟及驱动因素研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2025,56(3):186-201.
Song X X, Zhang S Z, Wang S Q, et al. Scenario simulation and driving factors of ecosystem service value in Tumen River Basin based on PLUS model [J]. Water conservancy and hydropower technology (Chinese and English), 2025,56(3):186-201.

[12] 李 月,刘静兰,白晓永,等.长江上游重要水源涵养区生态系统服务价值的多尺度空间分异:格局、过程与驱动力解析 [J]. 生态学报, 2025,(7):1-17.
Li Y, Liu J L, Bai X Y, et al. Multi-scale spatial differentiation of ecosystem service value in important water conservation areas in the upper reaches of the Yangtze River: pattern, process and driving force analysis [J]. Ecology, 2025,(7):1-17.

[13] 李 月,邱 林,刘静兰,等.贵州马尾河流域生态系统服务价值的时空演变:驱动因子的曲线特征识别及其影响效应评估 [J]. 环境科学, 2025,46(10):6393-6407.
Li Y, Qiu L, Liu J L, et al. Spatio-temporal evolution of ecosystem service value in Mawei River Basin, Guizhou: curve feature identification of driving factors and evaluation of their effects [J]. Environmental science , 2025,46(10):6393-6407.

[14] 杨晓芳,于少康,罗志军,等.多尺度视角下环鄱阳湖区景观生态风险与生态系统服务的相互关系及分区管控 [J]. 环境科学, 2025,46(12):7918-7934.
Yang X F, Yu S K, Luo Z J, et al. The relationship between landscape ecological risk and ecosystem services in the Poyang Lake area from a multi-scale perspective and zoning control [J]. Environmental science 2025,46(12):7918-7934.

[15] Veerkamp C J, Dunford R W, Harrison P A, et al. Future projections of biodiversity and ecosystem services in Europe with two integrated assessment models [J]. Regional Environmental Change, 2020,20(3): 103.

[16] 周雅萍,赵先超.长株潭城市群人类活动强度与生态系统服务价值空间关系 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2948-2960.
Zhou Y P, Zhao X C. Spatial relationship between human activity intensity and ecosystem service value in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. Environmental Sciences of China, 2024,44(5):2948-2960.

[17] 陈明星,陆大道,张 华.中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析 [J]. 地理学报, 2009,64(4):387-398.
Chen M X, Lu A, Zhang H. Comprehensive measurement of China 's urbanization level and its dynamic factor analysis [J]. Journal of Geography, 2009,64(4):387-398.

[18] 吴晓青,胡远满,贺红士,等.SLEUTH 城市扩展模型的应用与准确性评估 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008,(3):293-296.
Wu X Q, Hu Y M, He H S, et al. Application and accuracy evaluation of SLEUTH urban expansion model [J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2008,(3):293- 296.

[19] 方创琳,周成虎,顾朝林,等.特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径 [J]. 地理学报, 2016,71(4): 531-550.
Fang C L, Zhou C H, Gu C L, et al. Theoretical framework and technical path for the analysis of the interactive coupling effect between urbanization and ecological environment in megalopolises [J]. Geography, 2016,71(4):531-550.

[20] 龚志冬,黄健元.长三角城市群城镇化质量测度 [J]. 城市问题, 2019,(1):23-30.
Gong Z D, Huang J Y. Urbanization quality measurement of Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. City problem, 2019,(1): 23-30.

[21] Li R, Xu Q, Yu J, et al. Multiscale assessment of the spatiotemporal coupling relationship between urbanization and ecosystem service value along an urban–rural gradient:A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration, China [J]. Ecological Indicators, 2024,160: 111864.

[22] Van Vliet J, Birch-Thomsen T, Gallardo M, et al. Bridging the rural-urban dichotomy in land use science [J]. Journal of Land Use Science, 2020,15(5):585-591.

[23] Du Toit M J, Du Preez C, Cilliers S S. Plant diversity and conservation value of wetlands along a rural-urban gradient [J]. Bothalia, 2021,51 (1):45-62.

[24] 王 敏,余谦益,汪洁琼.融合景观特征识别和城乡梯度分析的滨水生境网络构建方法——以江苏省昆山市为例 [J]. 中国园林, 2025, 41(1):117-124.
Wang M, Yu Q Y, Wang J Q. A method for constructing a waterfront habitat network that integrates landscape feature recognition and urban-rural gradient analysis - A case study of Kunshan City, Jiangsu Province [J]. Chinese Landscape Architecture, 2025,41(1):117-124.

[25] 王 旭,付学成,徐文甜,等.2000~2020 年中国城乡热舒适梯度特征及其驱动因素 [J]. 地理学报, 2024,79(5):1318-1336.
Wang X, Fu X C, Xu W T, et al. Characteristics and driving factors of urban-rural thermal comfort gradient in China from 2000 to 2020 [J]. Acta Geographica Sinica, 2024,79(5):1318-1336.

[26] 高 星,宋昭颖,李晨曦,等.城乡梯度下的耕地多功能价值空间分异特征 [J]. 农业工程学报, 2021,37(16):251-259.
Gao X, Song Z Y, Li C X, et al. Spatial differentiation characteristics of multifunctional value of cultivated land under urban-rural gradient [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2021,37(16):251-259.

[27] 李佩君,左德鹏,徐宗学,等.基于地形梯度的雅鲁藏布江流域土地利用及景观格局分析 [J]. 山地学报, 2022,40(1):136-150.
Li P J, Zuo D P, Xu Z X, et al. Analysis of land use and landscape pattern in Yarlung Zangbo River Basin based on topographic gradient [J]. Mountain Journal, 2022,40(1):136-150.

[28] 蔡振饶,方朝阳,何清华,等.基于景观聚类的南昌市主城区城乡梯度识别及其生态系统服务响应 [J]. 环境科学研究, 2022,35(3):806-817.
Cai Zhenrao, Fang Chaoyang, He Qinghua, et al. Urban-rural gradient identification and ecosystem service response in the main urban area of Nanchang City based on landscape clustering [J]. Environmental Science, 2022,35(3):806-817.

[29] 刘　美,杜国明,于凤荣,等.哈尔滨城乡梯度建设用地结构变化及不透水面遥感监测分析 [J]. 遥感技术与应用, 2020,35(5):1206−1217.
Liu M, Du G M, Yu F R, et al. Remote sensing monitoring and analysis of urban−rural gradient construction land structure change and impervious surface in Harbin [J]. Remote sensing technology and application, 2020,35(5):1206−1217.

[30] 黄玲玲.长江经济带城镇化与生态环境耦合协调时空变化及影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2024,33(12):2675−2687.
Huang L L. Spatio−temporal changes and influencing factors of coupling and coordination between urbanization and ecological environment in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and environment in the Yangtze River Basin, 2024,33(12):2675−2687.

[31] 杨吉鑫,崔许锋,张光宏.长江中游城市群城乡融合与碳排放耦合协调时空演化及影响因素 [J]. 长江流域资源与环境, 2024,33(11): 2474−2487.
Yang J X, Cui X F, Zhang G H. Spatio−temporal evolution and influencing factors of coupling and coordination between urban−rural integration and carbon emissions in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2024,33(11): 2474−2487.

[32] 闫　语,秦耀伟,东嘉琪,等.京津冀生态系统健康与人类活动强度空间关系及驱动因素分析 [J]. 环境科学: 1−14.
Yan Y, Qin Y W, Dong J Q, et al. Analysis of spatial relationship and driving factors between ecosystem health and human activity intensity in Beijing−Tianjin−Hebei [J].Environmental science: 1−14.

[33] 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,(2):189−196.
Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. The valuation of ecological assets in the Qinghai−Tibet Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003,(2): 189−196.

[34] 武　燕,吴映梅,高彬嫔,等.成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系 [J]. 水土保持研究, 2023,30(1):173−182.
Wu Y, Wu Y M, Gao B Y, et al. Spatial relationship between ecosystem service value and human activity intensity in Chengdu− Chongqing urban agglomeration [J]. Soil and Water conservation research, 2023, 30(1):173−182.

[35] 谢贤健,苟千陶,黄　安.快速城市化背景下重庆市生态系统服务价值时空特征及驱动因子分析[J].水土保持研究,2025,32(6):348−360, 369.
Xie X J, Gou Q T, Huang A. Spatio-temporal characteristics and driving factors of ecosystem service value in Chongqing under the background of rapid urbanization [J]. Study on soil and water conservation, 2025,32(6):348−360,369.

[36] 赵兴赟,张　强,杨方社,等.基于 XGBoost-SHAP 方法的陕西省 $PM_{2.5}$ 影响因素分析 [J]. 环境科学研究, 2025,38(5):990−999.
Zhao X Y, Zhang Q, Yang F S, et al. Analysis of influencing factors of $PM_{2.5}$ in Shaanxi Province based on XGBoost-SHAP method [J]. Environmental Science Research, 2025,38(5):990−999.

[37] Wang Y P, Guan Z Y, Zhang Q. Exploring the magnitude threshold of urban $PM_{2.5}$ concentration: evidence from prefecture−level cities in China [J]. Environment Development and Sustainability, 2024,26(6): 14095−14112.

[38] 后　睿,李　丁,仝文露,等.成渝地区双城经济圈可持续城镇化状态评估 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024,60(5):676−683.
Hou R, Li D, Tong W L, et al. Evaluation of sustainable urbanization status of Chengdu−Chongqing Economic Circle [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2024,60(5): 676−683.

[39] 王　晗,胡自远,李付全,等.基于夜间灯光的 2000~2018 年成渝地区城市化过程研究 [J]. 遥感技术与应用, 2022,37(4):897−907.
Wang H, Hu Z Y, Li F Q, et al. Study on urbanization process in Chengdu−Chongqing area from 2000 to 2018 based on nighttime light [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022,37(4):897−907.

[40] Chen C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land−use management [J]. Nat Sustain, 2019,2:122−129.

[41] 李佳滢,杨冬冬,杨　菲,等.城市化背景下景观格局对天津市生态系统服务供需匹配的影响 [J]. 生态学报, 2024,44(12):4987−5002.
Li J Y, Yang D D, Yang F, et al. The impact of landscape pattern on the matching of supply and demand of ecosystem services in Tianjin under the background of urbanization [J]. Ecology, 2024, 44(12):4987−5002.

[42] 邱大鹅,张军以,杨晓雪.基于不同需求层次生态服务供需的四川盆地生态安全格局构建 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3343−58.
Qiu D, Zhang J Y, Yang X X. Construction of ecological security pattern in Sichuan Basin based on the supply and demand of ecological services at different demand levels [J]. Environmental Science of China, 2025,45(6):3343−3358.

[43] 尹寒梅,徐雪梅,冯小琼,等.成都市城区 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征及来源 [J]. 中国环境监测, 2025,41(2):114−122.
Yin H M, Xu X M, Feng X Q, et al. Pollution characteristics and sources of metal elements in $PM_{2.5}$ in urban areas of Chengdu [J]. Environmental monitoring in China, 2025,41(2): 114−122.

作者简介：裴星羽(2000−),男,河北承德人,硕士研究生,主要从事城乡可持续发展方面研究.pxy1139463879@163.com.