

山西省城镇化与生态系统服务时空相关性及空间效应分析

刘海龙^{1,2}, 丁娅楠¹, 王跃飞¹, 王炜桥¹, 郭晓佳^{1,2}

(1.山西师范大学地理科学学院,山西 临汾 041000; 2.山西省资源环境信息化管理院士工作站,山西 临汾 041000)

摘要:为深入探究城镇化对生态系统服务价值的驱动因素以及生态系统服务空间溢出效应,以山西省县域为研究单元,基于2000—2018年土地利用数据、社会经济数据构建生态系统服务价值和城镇化水平综合评价体系,通过双变量空间自相关分析县域城镇化与生态系统服务价值相关性的空间特征。结果表明:研究期间山西省生态系统服务价值整体呈下降趋势,城镇化综合水平虽有显著提高,但整体偏低。研究区城镇化和生态系统服务价值之间存在显著的负相关关系,呈“U”形发展趋势。空间计量模型结果表明,城镇化率、建成区面积与生态系统服务呈显著负相关,人均社会消费品零售总额、城镇化水平的平方项与生态系统服务呈显著正相关。生态系统服务价值对邻近县域产生正向的溢出效应,在控制其他解释变量不变的前提下,相邻县域生态价值每提高1%将对本县域产生0.243%的促进作用。研究区生态系统服务具有整体性和不稳定性,使各县政府丧失自身环境保护的积极性。

关键词: 城镇化; 生态系统服务; 双变量空间自相关; 空间计量模型; 山西省

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)01-0124-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.01.018

Analysis of Temporal-spatial Correlation and Spatial Effect Between Urbanization and Ecosystem Services in Shanxi Province

LIU Hailong^{1,2}, DING Yanan¹, WANG Yuefei¹, WANG Weiqiao¹, GUO Xiaojia^{1,2}

(1.College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen Shanxi 041000;

2.Academician Workstation of Resource and Environment Information Management, Linfen Shanxi 041000)

Abstract: In order to deeply explore the driving factors of urbanization on ecosystem service value and the spatial spillover effect of ecosystem service, taking the county of Shanxi Province as the research unit, based on the land use data and socio-economic data from 2000 to 2018, constructs a comprehensive evaluation system of ecosystem service value and urbanization level, and analyzes the spatial characteristics of the correlation between urbanization and ecosystem service value through bivariate spatial autocorrelation. In addition, the spatial econometric model is used to explore the driving factors of urbanization on ecosystem service value and the spatial spillover effect of ecosystem service. The results showed that: During the study period, the ecosystem service value of Shanxi Province showed a downward trend as a whole, and the comprehensive level of urbanization was significantly improved, but the overall level was low. There is a significant negative correlation between urbanization and ecosystem service value in the study area, showing a U-shaped development trend. The results of spatial econometric model show that the urbanization rate, built-up area and ecosystem services are significantly negatively correlated, while the per capita retail sales of social consumer goods and the square of urbanization level are significantly positively correlated with ecosystem services. Ecosystem service value has a positive spillover effect on neighboring counties. Under the premise of controlling other explanatory variables unchanged, every 1% increase in the ecological value of neighboring counties will have a 0.243% promotion effect on the county. Ecosystem services in the study area are integrated and unstable, which makes the county governments lose their enthusiasm for environmental protection.

收稿日期: 2021-07-03

资助项目: 山西省哲学社会科学规划项目(晋规办字[2017]2号); 教育部人文社会科学研究项目(20YJC630032)

第一作者: 刘海龙(1983—), 男, 甘肃正宁人, 博士, 副教授, 主要从事区域生态环境与可持续发展研究。E-mail: liuhailong5117@163.com

通信作者: 丁娅楠(1997—), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事为区域环境与可持续发展研究。E-mail: 451077867@qq.com

Keywords: urbanization; ecosystem services; bivariate spatial autocorrelation; spatial econometric model; Shanxi Province

城镇化水平是衡量一个地区社会经济发展的重要标志。生态系统服务是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[1],这些功能的持续供给是经济社会可持续发展的基础。城镇化发展格局的剧烈变化深刻改变着地表自然生态系统和人类社会系统结构^[2],1978—2018 年,中国城镇化率由 17.90% 增长至 59.58%,随着高速城镇化进程,一系列环境问题逐渐显现,如何在区域环境承载力的基础上促进城市高质量发展,已成为目前研究的热点话题。党的十九大报告中明确提出,要着力解决突出环境问题,加快建设绿色城市,不断推动人与自然和谐共生。因此,城镇化发展与生态建设相辅相成,研究二者的相关性是人地关系的主要内容之一,对促进区域城市经济和生态可持续发展具有重要现实意义。

对城镇化与生态系统服务关系的研究以及探寻二者协调发展模式已经引起关注。国外学者^[3]提出城市经济水平与生态环境库兹涅茨曲线的假设,从城市绿地^[4]和水文^[5]等方面分别探究不同用地类型在城市生态系统服务中发挥的重要作用,从城市生物多样性与生态系统服务相适应的视角出发对城市基础设施进行合理规划^[6]。目前,国内主要探讨全国及各省市城镇化与生态系统服务的耦合协调关系^[7],快速城镇化背景下生态系统服务的演变特征、预测与权衡^[8],利用 SPSS 相关性^[9]及双变量空间自相关^[10]研究城镇化水平与生态系统服务的相互关系。以往在探讨城镇化与生态系统服务关系时,大多仅侧重于分析二者的耦合协调、时空演变及空间集聚特征,缺少对生态系统服务空间溢出效应的深入探究。分析城镇化对生态系统服务的驱动因素及其空间溢出效应,是从计量经济学的角度来分析二者之间的关系,可以打破行政边界限制,为促进区域经济与生态平衡提供新的路径。

山西省地处黄土高原生态过渡带,自然条件复杂,水土流失严重。高原内部起伏不平,山区面积占总面积的 80%。受特殊地理区位的影响,省内自然条件差异大,各区域提供生态系统服务能力具有显著的异质性。此外,省内经济发展极不平衡,山区交通闭塞,经济社会发展相对滞后,形成吕梁山和太行山区集中连片特困区。盆地地区交通便利,人口密集,城镇化水平较高。2016 年 12 月《山西省“十三五”环境保护规划》^[11]明确提出,以改善环境质量为核心,加快推进生态环境治理体系和能力现代化建设,体现

省域生态环境保护的重要性,研究山西省城镇化与生态系统服务的相关性是促进生态脆弱区人地关系和谐发展的关键所在。鉴于此,本文以山西省为研究区,基于 2000—2018 年土地利用数据、社会经济数据构建生态系统服务价值和城镇化水平综合评价体系,运用双变量空间自相关和空间计量模型揭示城镇化与生态系统服务之间的时空交互关系及空间效应,为研究区生态环境保护和区域经济社会可持续发展相关政策的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省简称“晋”,包括 11 个地级市、119 个县(市、区),位于太行山以西,黄土高原东部。全省总面积约 $15.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,地势东北高西南低,起伏不平,河谷纵横,生态环境脆弱。2018 年山西省 GDP 为 16 818.11 亿元,增速为 8.31%;常住人口为 $3\,718.34 \times 10^4$ 人,城镇人口占山西总人口的 58.41%;城镇居民人均可支配收入 3.10×10^4 元,增长 6.5%;完成造林面积 34.01 hm^2 ,与 2017 年相比增长 9%,森林覆盖率 22.79%,略低于全国 22.96% 的平均水平;人均耕地面积 0.15 hm^2 ,略高于全国 0.10 hm^2 的平均水平;人均水资源占有量 327.90 m^3 ,仅为全国同期的 16.59%;全省主要城市空气质量达标天数比例为 56.71%,低于全国同期主要城市 79.3% 的平均水平。

1.2 数据来源

本文所需的山西省 2000 年、2005 年、2010 年、2018 年分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的土地利用数据,来自中科院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)^[12],按土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 大类;行政区边界数据来源于 1:400 万国家地理信息系统数据库(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>),审图号为 GS(2016)2556 号,底图无修改;社会经济数据主要来源于《山西统计年鉴》^[13]以及各市、县统计年鉴,部分来源于相应年份的《中国县域统计年鉴》^[14]和《中国城市统计年鉴》^[15],粮食价格来源于相应年份的《中国农产品价格调查年鉴》^[16]。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值计算方法 根据谢高地等^[17]在 2015 年修订的生态系统服务价值当量,依据山西省区域特征及实际情况,用研究区农作物粮食产量和粮食价格进行修正,2000—2018 年研究区平均单位面积粮食产量为 $2\,355.87 \text{ kg/hm}^2$,平均粮食价

格(小麦、玉米和大豆)为 2.71 元/kg。自然生态系统提供的经济价值为现有单位面积农田提供的粮食价值的 1/7^[18],据此得出,研究区粮食生产经济价值为 1 076.64 元/hm²,求得研究区单位面积生态系统服务价值表(表 1)。公式为:

$$ESV=\sum_{i=1}^n(LUC_i\times VC_i)$$
 (1)

$$AESV=\frac{\sum_{i=1}^n(LUC_i\times VC_i)}{\sum_{i=1}^nLUC_i}$$
 (2)

表 1 山西省各地类生态系统单位面积服务价值系数

单位:元/(hm²·a)

生态系统服务功能分类		土地利用类型					
一级	二级	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
供给服务	食物生产	915.14	251.22	251.22	705.20	0	10.77
	原料生产	430.66	577.80	369.65	392.97	0	32.30
	水资源供给	21.53	297.87	204.56	5856.92	0	21.53
调节服务	气体调节	721.35	1894.89	1299.15	1437.31	0	118.43
	气候调节	387.59	5670.30	3434.48	3170.70	0	107.66
	净化环境	107.66	1686.74	1134.06	4925.63	0	333.76
	水文调节	290.69	4102.00	2515.75	68081.33	0	226.09
支持服务	土壤保持	1108.94	2307.60	1582.66	1744.16	0	139.96
	维持养分循环	129.20	175.85	122.02	134.58	0	10.77
	生物多样性	139.96	2103.04	1439.11	5609.29	0	129.20
文化服务	美学景观	64.60	922.32	635.22	3563.68	0	53.83
总计	—	4317.33	19989.62	12987.87	95621.78	0	1184.30

1.3.2 城镇化综合评价 (1)城镇化指标体系构建。城镇化主要包括人口增长、经济发展、生活提高和空间扩张 4 个方面。参考前人^[19]研究成果,结合本文

$$C=\frac{AESV_{t_2}-AESV_{t_1}}{AESV_{t_1}}\times 100\%$$
 (3)

式中:ESV 为生态系统服务价值(元);AESV 为地均生态系统服务价值(元/hm²),AESV_{t₁}和 AESV_{t₂}为 t₁和 t₂时地均生态系统服务价值(元/hm²);LUC_i为土地利用类型 i 的面积(hm²);VC_i为土地利用类型 i 的生态系统服务价值系数(元/(hm²·a));C 为地均生态系统服务价值变化率(%);n 为区域土地利用类型数量。

的研究内容,选取人口城镇化、经济城镇化、社会城镇化、空间城镇化 4 个 1 级指标,10 个 2 级指标,最终构成山西省城镇化综合水平评价体系(表 2)。

表 2 城镇化综合水平评价体系

一级指标	代码	二级指标	单位	表征意义	属性	权重
人口城镇化	X ₁	城镇人口占比	%	城镇化发展水平	+	0.047
	X ₂	人口密度	人/m ²	人口空间分布的疏密程度	+	0.003
	X ₃	人均 GDP	元	经济发展状况	+	0.158
经济城镇化	X ₄	二、三产业产值比重	%	产业结构	+	0.012
	X ₅	人均规模以上工业总产值	万元	工业生产规模	+	0.137
	X ₆	人均社会消费品零售总额	万元	居民生活水平状况	+	0.120
社会城镇化	X ₇	万人拥有医疗床位数	张	医疗保障设施水平	+	0.231
	X ₈	万人在校大学生数	人	教育事业发展规划	+	0.076
空间城镇化	X ₉	建成区面积	km ²	城镇化区域的规模	+	0.096
	X ₁₀	建设用地占总用地面积的比例	%	土地开发程度	+	0.122

注:十表示指标的正向属性。

(2)城镇化综合水平测度。本文利用熵值法确定评价指标的权重^[20]。

①数据标准化处理。采用正向标准化方法计算指标的标准化值。

$$x'_{\lambda ij}=\frac{X_{ij}-\min X_i}{\max X_i-\min X_i}$$
 (4)

式中:x'λij为标准化后的指标值;maxX_i和 minX_i分别为第 j 个指标中所有评价样本的最大值和最小值。

②计算评价指标的权重。对有 m 个指标、n 个

样本的数据集,第 i 个指标的权重为:

$$W_i=\frac{1+\frac{1}{\ln n}\sum_{j=1}^n(\frac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^nZ_{ij}}\ln\frac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^nZ_{ij}})}{m+\sum_{i=1}^m(\frac{1}{\ln n}\sum_{j=1}^n(\frac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^nZ_{ij}}\ln\frac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^nZ_{ij}})}$$
 (5)

③城镇化综合水平测度 T_n:

$$T_n=\sum_{i=1}^mW_i\times Z_{ij}$$
 (6)

1.3.3 双变量空间相关性模型 双变量空间自相关模型与单变量空间自相关模型相比,能够更好地揭示给定空间单元不同要素之间的关联性,可以有效分析城镇化与生态系统服务的空间相关特征。该模型包括全局空间自相关和局部空间自相关^[10],公式为:

$$I_{eu} = \frac{N \sum_i \sum_{j \neq i} W_{ij} z_i^e z_j^e}{(N-1) \sum_i \sum_{j \neq i} W_{ij}}$$
 (7)

$$I'_{eu} = z^e \sum_{j=1}^N W_{ij} z_j^e$$
 (8)

式中: I_{eu} 和 I'_{eu} 分别为双变量全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数; z_i^e 为第 i 个单元生态系统服务价值; z_j^e 为与 j 邻近区域中城镇化综合水平综合测度; W_{ij} 为空间权重矩阵; N 为研究区评价单元个数;本文采用的是邻接标准,即区域 i 和区域 j 具有公共边界,空间权重为 1,否则取 0。Moran's I 指数的取值范围在 $-1 \sim 1$, I_{eu} 为正时表明区域间存在正相关; I_{eu} 为负时表明区域间存在负相关;Moran's I 指数等于 0,表示不存在空间关联性。

1.3.4 空间计量模型 经典线性回归最小二乘法(OLS)模型是用来解释因变量(y_i)与自变量(x_i)之间关系的多元线性函数^[21],计算公式为:

$$y_i = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \epsilon_i$$
 (9)

式中: β_0 为常数项; β_i 为回归系数; ϵ_i 为随机误差项。

由于经典的线性回归模型无法考虑空间依赖性,而生态环境相关决定因素的外部性可能超越行政区划边界,导致邻近地区城镇化的生态环境效应相互影响^[22]。为了能够更好地体现城镇化对生态系统服务的驱动因素及空间溢出效应,在 OLS 的基础上建立空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)^[23],其公式分别为:

$$Y_{it} = \rho \sum W_{ij} Y_{it} + \beta \sum X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it}$$
$$Y_{it} = \beta \sum X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varphi_{it}, \varphi = \delta \sum W_{ij} \varphi_{jt} + \epsilon_{it}$$
$$Y_{it} = \rho \sum W_{ij} Y_{it} + \beta \sum X_{it} + \gamma \sum W_{ij} X_{jt} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it}$$
 (10)

表 3 2000—2018 年山西省生态系统服务价值及其变化

土地利用 类型	生态系统服务价值/亿元				生态系统服务价值变化/%			
	2000 年	2005 年	2010 年	2018 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2018 年	2000—2018 年
耕地	264.11	261.64	259.49	248.73	−0.93	−0.82	−4.15	−5.82
林地	875.32	875.55	880.06	887.00	0.03	0.52	0.79	1.33
草地	592.22	595.25	595.58	574.99	0.51	0.06	−3.46	−2.91
水域	154.69	154.91	155.63	141.11	0.14	0.46	−9.33	−8.78
未利用土地	0.18	0.18	0.18	0.17	−0.18	0.06	−7.73	−7.85
总计	1886.52	1887.53	1890.94	1851.99	0.05	0.18	−2.06	−1.83

由图 1 可知,山西省地均生态系统服务价值空间分布较为稳定,高值区主要分布于研究区东北部的恒山和五台山、西部的吕梁山、中部的太岳山及东部的

太行山,2018 年上述县域城镇化率在 40%左右,低于全省 49.90%的平均水平,公路密度远低于全省 91.26 km/100 km²的水平,良好的生态资源、较低的城镇化

2 结果与分析

2.1 山西省生态系统服务价值时空演变特征

本研究表明,2000—2018 年山西省生态系统服务价值整体呈下降趋势,由 2000 年的 1 886.51 亿元降低到 2018 年的 1 851.99 亿元,降低率为 1.83%,其中,2000—2010 年增加了 0.23%,2010—2018 年降低了 2.06%(表 3)。从不同土地利用类型来看,林地提供的生态系统服务价值不断增加,研究期间增加了 11.68 亿元,增长率达 1.33%,这是由于《山西省林业生态建设总体规划纲要(2011—2020 年)》^[24]的出台,加快造林绿化和退耕还林,2018 年省内森林覆盖率达到 22.79%,比 2000 年提高 9.62%;耕地提供的生态系统服务价值呈持续降低趋势,约降低了 15.38 亿元,由于区域经济快速发展,人口大量涌入城市,建设用地大幅度增加,不断占用更多的耕地资源,导致研究期间耕地面积减少 3 562 km²,减少率为 5.82%;草地和水域的生态价值先上升后下降;未利用土地在 2010—2018 年大幅度下降,为 −7.73%。从单项生态系统服务价值(表 4)来看,气候调节和人文调节功能占比较高,研究期间两者占总价值的 45%以上,维持养分循环和水资源供给功能占比较小,分别占 1.13%和 1.17%。2000—2018 年食物生产、原材料生产、气体调节和维持养分循环功能持续降低,提供水资源供给、气候调节、净化环境、水文调节、维持生物多样性、美学景观功能的价值在研究期间先增加后减少,其变化规律与研究区草地和水域价值变化保持一致,表明草地和水域土地利用类型对以上单项生态子系统的价值具有显著影响。

由图 1 可知,山西省地均生态系统服务价值空间分布较为稳定,高值区主要分布于研究区东北部的恒山和五台山、西部的吕梁山、中部的太岳山及东部的

水平以及落后的交通,对生态系统扰动相对较弱是上述地区生态系统服务价值较高的主要原因。低值区主要分布于太原盆地、长治盆地、临汾盆地和运城盆地,2018 年上述地区人口密度约为 900 人/km²,远高于山西省 301 人/km²的平均水平,4 个地区 GDP 总量占全省的 50.59%,人均 GDP 约为 5.07×10⁴元,位居全省前列,由于人口集聚和频繁的经济活动带来城市建筑用地的扩张,周围的生态系统在一定程度上受到人为干扰,成为生态系统服务价值较低的地区。从地均生态系统服务演变(图 2)来看,2000—2005 年山西省地均生态系统服务价值较为稳定,显著增加的地区为研究区南部的垣曲县和东南部的长治市市辖区,

大同盆地南端应县下降明显,为-7.90%;2005—2010 年地均生态价值增长幅度较大的县域集中分布于研究区北部和南部,次高值北部分布最广,显著降低的县域只有南部的河津市和中东部的阳泉市市辖区,分别为-1.61%和-1.05%;2010—2018 年地均生态价值降低较快,北部降低幅度(-3.41%)明显高于南部(-1.90%),增长较高的县域集中于东北部(广灵县)、中部(榆社县)、东南部(长治市、黎城县、平顺县)和南部(浮山县、临猗县、万荣县),次高值分布于南部,此外的大部分县域增长为负。整体而言,2000—2018 年山西省各县域地均生态系统服务价值下降明显,且山西北部下降速度快于南部。

表 4 2000—2018 年山西省生态系统服务价值结构变化

一级类型	二级类型	生态系统服务价值/亿元				生态系统服务价值变化/%			
		2000 年	2005 年	2010 年	2018 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2018 年	2000—2018 年
供给服务	食物生产	79.58	79.12	78.73	76.03	-0.58	-0.49	-3.43	-4.46
	原料生产	69.14	68.99	68.92	67.40	-0.22	-0.10	-2.20	-2.52
	水资源供给	33.17	33.22	33.32	32.16	0.16	0.32	-3.49	-3.03
调节服务	气体调节	188.68	79.12	78.73	76.03	-58.07	-0.49	-3.43	-59.70
	气候调节	433.76	434.41	435.61	430.68	0.15	0.28	-1.13	-0.71
	净化环境	140.18	140.41	140.80	138.57	0.17	0.28	-1.59	-1.15
	水文调节	422.29	422.91	424.27	410.64	0.15	0.32	-3.21	-2.76
支持服务	土壤保持	243.89	243.66	243.68	238.94	-0.10	0.01	-1.94	-2.03
	维持养分循环	21.39	21.34	21.32	20.85	-0.20	-0.10	-2.23	-2.52
	生物多样性	175.37	175.66	176.14	173.39	0.17	0.28	-1.56	-1.13
文化服务	美学景观	79.08	79.21	79.43	78.04	0.16	0.28	-1.75	-1.32
总计	—	1886.52	1887.53	1890.94	1851.99	0.05	0.18	-2.06	-1.83

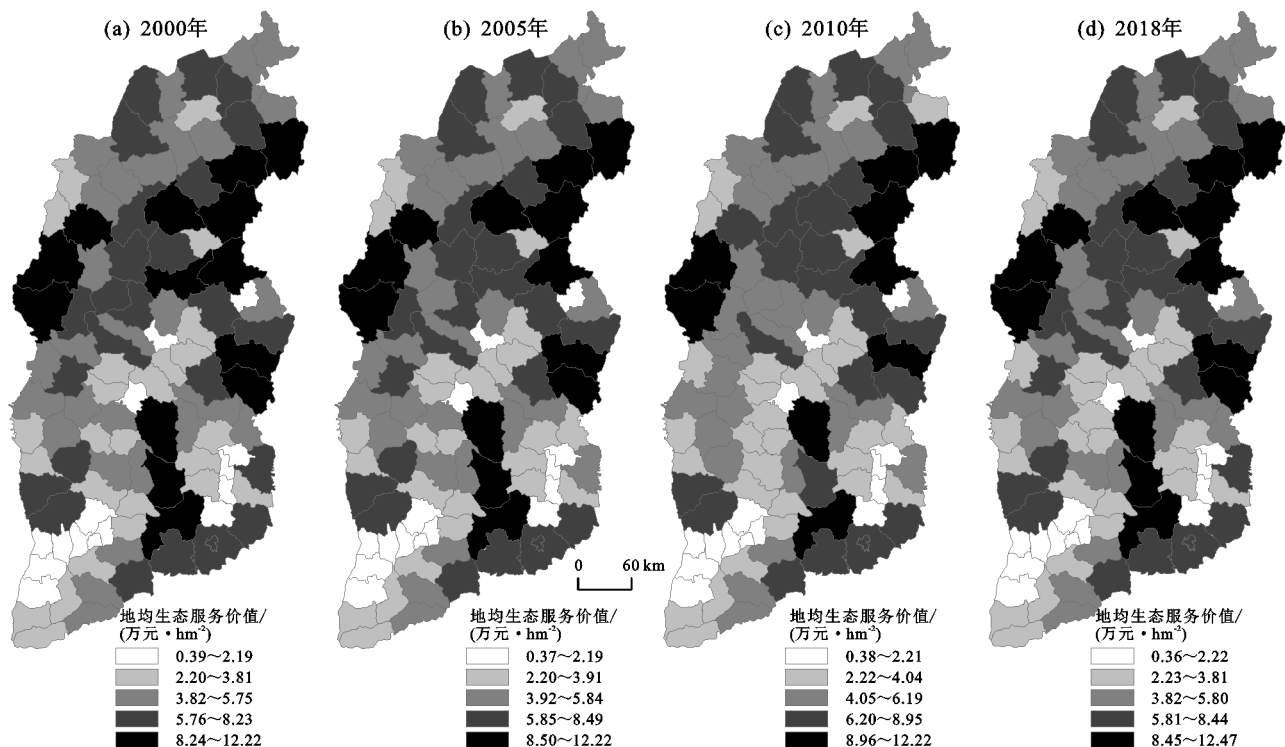


图 1 2000—2018 年山西省地均生态系统服务价值空间分布

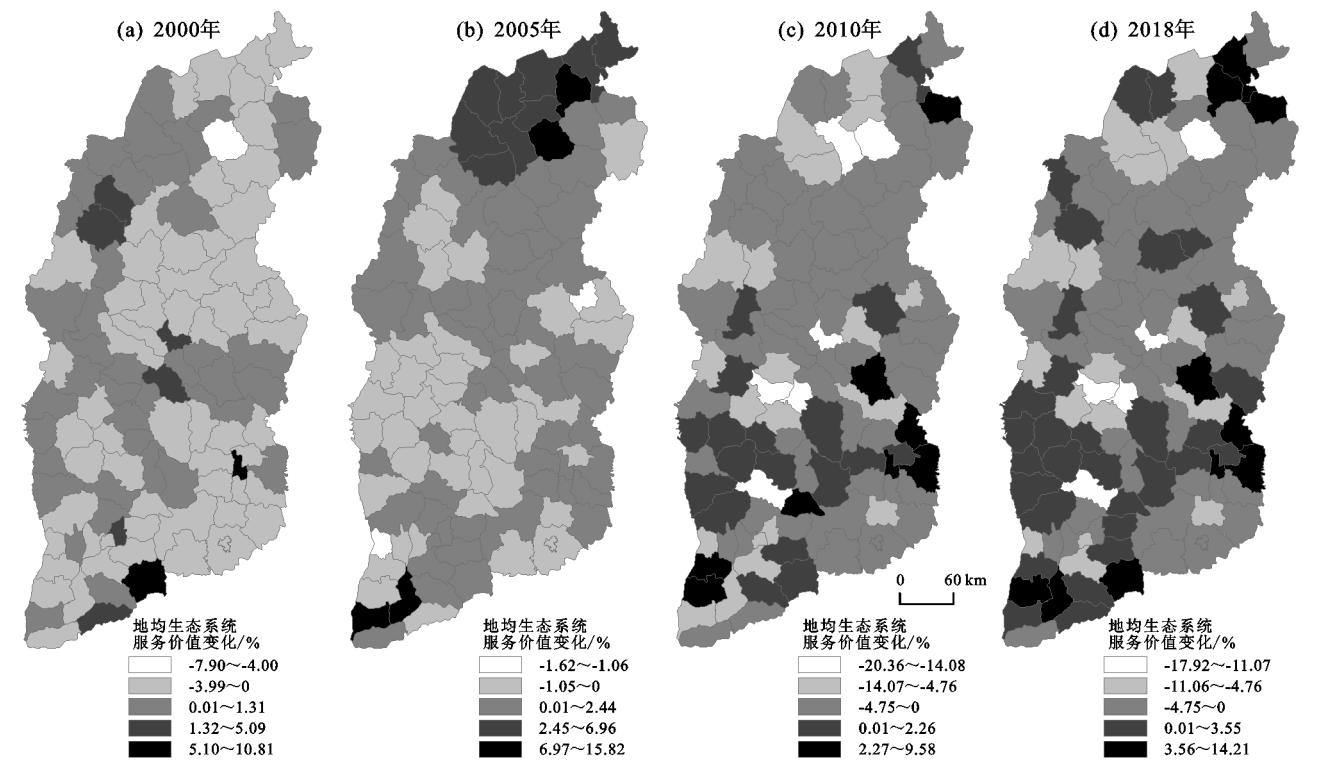


图 2 2000—2018 年山西省地均生态系统服务价值变化

2.2 山西省城镇化综合水平时空演变特征

总体来看,2000—2018 年山西省城镇化水平有了显著提高,城镇化综合指数平均值由 2000 年的 0.05 提高到 2018 年的 0.17。借助 ArcGIS 10.2,利用自然断点分级法将山西省 2000 年、2005 年、2010 年、2018 年各县城镇化水平分别定义为高水平区、较高水平区、中水平

区、较低水平区、低水平区^[25],并依据 5 个等级的平均值及县域个数绘制成表格。由表 5 可知,2000—2018 年低水平和较低水平的县域数量分别占总数量的 66.4%, 65.4%,57.9%和 51.4%,高水平县域仅为太原市市辖区,表明山西省城镇化仍以中低水平为主,高水平县域极化明显,城镇化综合水平整体偏低。

表 5 2000—2018 年山西省城镇化综合水平各等级均值及数量

等级	2000 年		2005 年		2010 年		2018 年	
	平均值	数量	平均值	数量	平均值	数量	平均值	数量
高水平区	0.32	1	0.43	1	0.59	1	0.87	1
较高水平区	0.14	8	0.18	10	0.22	16	0.33	14
中水平区	0.07	27	0.10	26	0.14	28	0.18	37
较低水平区	0.04	25	0.06	39	0.09	31	0.13	32
低水平区	0.03	46	0.04	31	0.06	31	0.08	23
全部区域	0.05	107	0.08	107	0.12	107	0.17	107

由图 3 可知,山西省城镇化水平区域差异明显,主要以研究区中部(太原市、晋中市、阳泉市)、南部(临汾市、运城市)和东南部(长治市、晋城市)各市辖区为中心形成高值集聚区(0.30 以上),呈片状分布,表明研究区城镇化发展具有等级性,行政等级越高的区域城镇化综合水平也越高。中水平县域集中分布在中心城市的周围,因为中心城市在经济区域中拥有较强的集聚与扩散效应,低水平和较低水平的县域主要分布于研究区西部的吕梁山区和东部的太行山区,受地形的影响,生产条件的制约,形成 2 个集中连片特困区和 35 个国家级扶贫开发重点区,贫困县域占研究区总面积的 38.6%,截至 2018 年,上述县域生产总值约为 1 599.31 亿元,仅占研究区生产总值的 10.06%,社会经济发展严重滞后。

从空间演变(图 4)来看,2000—2005 年山西省内所有县域城镇化综合水平变化值为正,表明城镇化水平均有所上升,吕梁山、太岳山及太行山西部各县域上升明显;2005—2010 年大部分县域变化值为正且变化明显,显著增长区多集中在太岳山、五台山附近的县域,山西中部(原平市和平遥县)、中东部(阳泉市市辖区)、南部(夏县)变化值为负,分别为-24.92%, -1.71%, -2.65%和-8.91%;2010—2018 年城镇化增长幅度较大的县域主要分布在吕梁山北部和太行山西部各县区,晋南(古县、交县)和晋中(榆社县)显著下降,分别降低 27.23%,0.37%和 3.75%。整体而言,2000—2018 年研究区城镇化水平显著上升,山区上升幅度(314.01%)明显大于盆地地区(262.28%)。

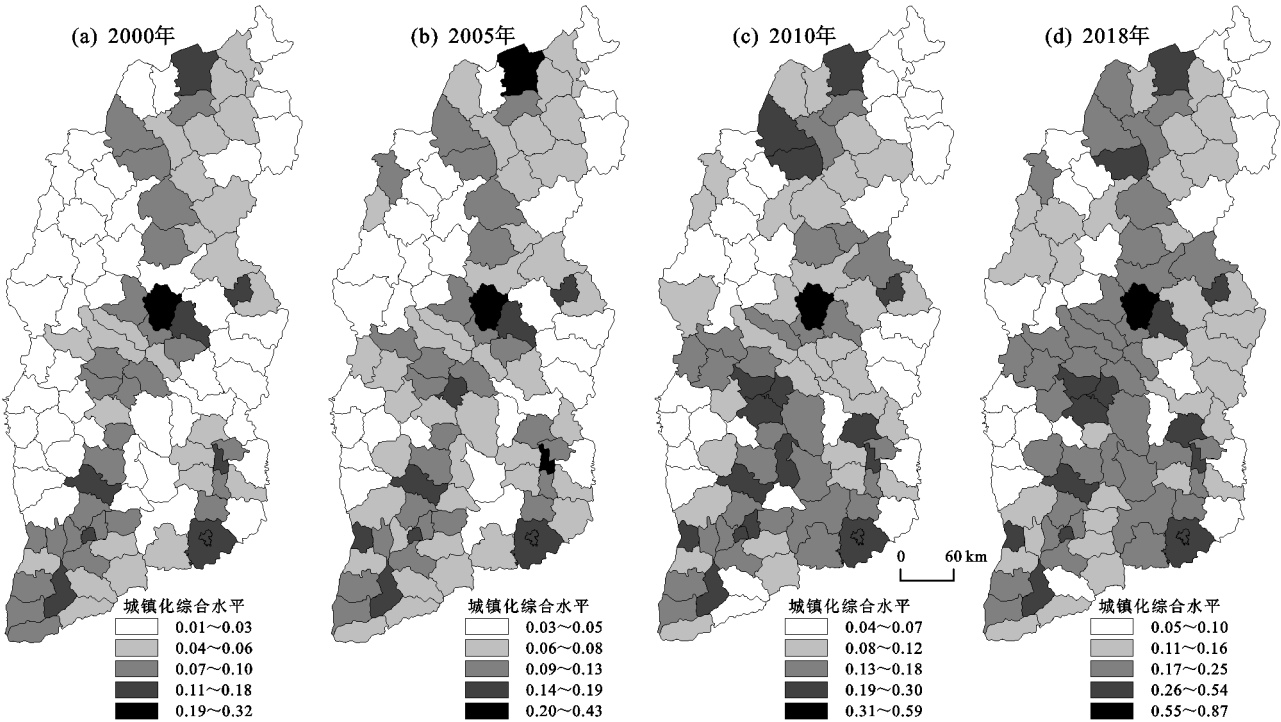


图 3 2000—2018 年山西省城镇化综合水平空间分布

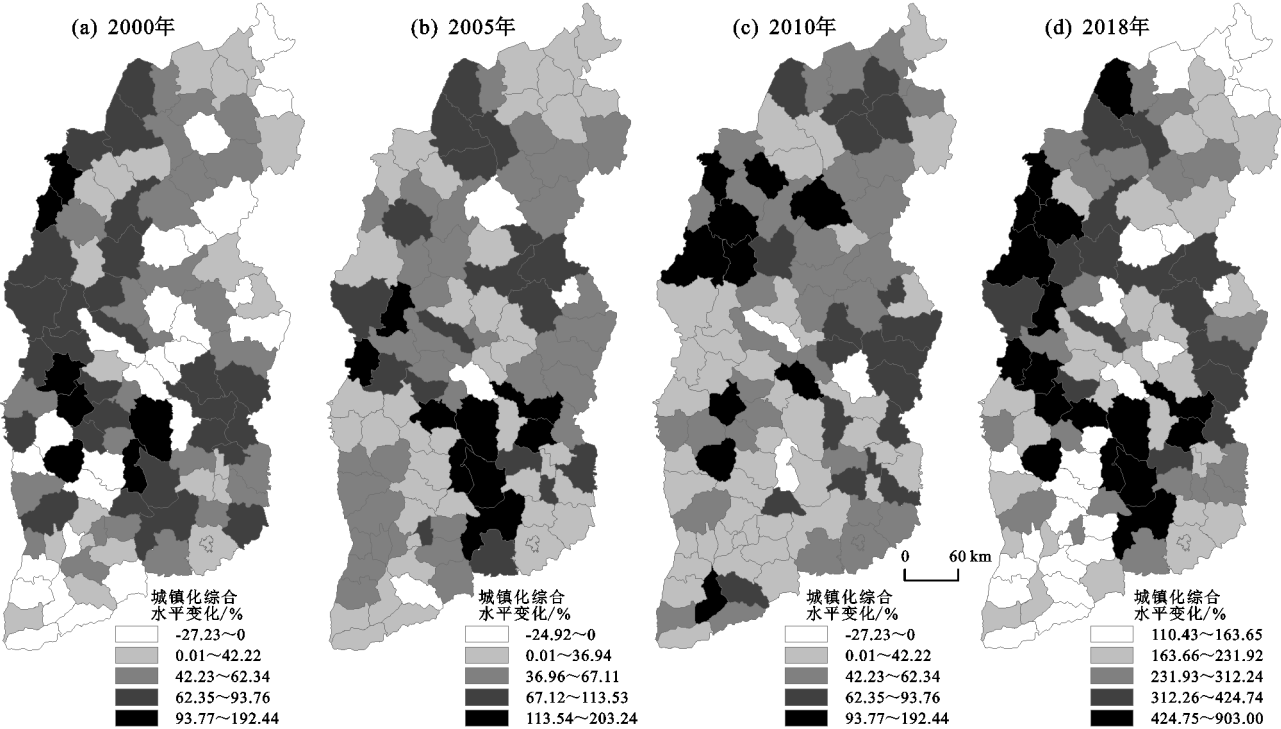


图 4 2000—2018 年山西省城镇化综合水平演变

2.3 山西省城镇化与生态系统服务价值时空相关性分析

基于 Geoda 1.14.0 空间分析工具,建立空间邻近权重矩阵,计算山西省城镇化与生态系统服务价值的双变量空间自相关,获得 Moran's I 散点图。2000—2018 年双变量 Moran's I 指数分别为 -0.119 , -0.129 , -0.122 , -0.098 , 且 $p < 0.05$, $|z| > 1.96$, 通过显著性检验(表 6),表明二者存在显著的空间负相关,城镇化的推进会

导致周围地区生态环境的恶化。由表 6 可知, Moran's I 指数先下降后上升,呈“U”形发展趋势,表明这种集聚的负相关性先增强后减弱,随着区域社会经济发展生态环境先恶化而后改善,且改善的效果较为明显。

根据双变量局部空间自相关分析,得到 2000 年、2005 年、2010 年、2018 年山西省城镇化与生态系统服务价值双变量 LISA 聚集图(图 5),表征城镇化水平与生态系统服务价值关系的局部空间异质性。高高集聚区位于 2010 年阳城县,2006 年以来阳城县把

绿化工程放在突出位置,大力推动林业生态县建设。此外,该县于 2010 年进行产业结构的调整,2018 年城镇化综合水平为 0.18,与初始年份相比提高 350%,城镇化和生态系统的良性互动促使该地区在 2010 年由低高集聚转变为高高集聚。低低集聚区位于研究区南部(乡宁县、万荣县)和东南部(平顺县),乡宁县和万荣县第一产业增加值大约占 35%,生产活动以农业为主,缺少支柱型产业,平顺县是典型的干石山区,地形崎岖,干旱缺水,生态脆弱,2014 年以来该县域有 241 个贫困村,贫困发生率 40%,社会经济整体落后。截止 2018 年,晋南部分县域由高低集聚转为低低集聚,随着研究区产业结构的调整,晋南地区丧失了以农业和重工业为主的经济优势,城镇化增长速度落后于其他地区,导致了晋南地区(临猗县、稷山县、新绛县、闻喜县)出现低低集聚。低高集聚区

集中分布于吕梁山的中北部和五台山附近的县域,由于山地地形蕴含丰富的森林资源,如五台山、白龙山、北武当山等国家级风景名胜区,但受地形的限制城市建设面积约占总面积的 5%,使得上述区域 2018 年城镇化综合指数低于全省 0.17 的平均水平。高低集聚区主要分布在山西省南部和东南部中心城区附近,这些地区主要以盆地为主,城镇化率在 50%以上,城市建设用地的需求量大,导致城镇化和生态环境矛盾突出,生态系统服务价值因此显著降低。

表 6 2000—2018 年山西省城镇化与生态系统服务价值的
全局 Moran's I 指数

指标	2000 年	2005 年	2010 年	2018 年
Moran's I	−0.119	−0.129	−0.122	−0.089
Z 统计量	−2.679	−2.911	−2.781	−2.087
P 值	0.003	0.002	0.003	0.016

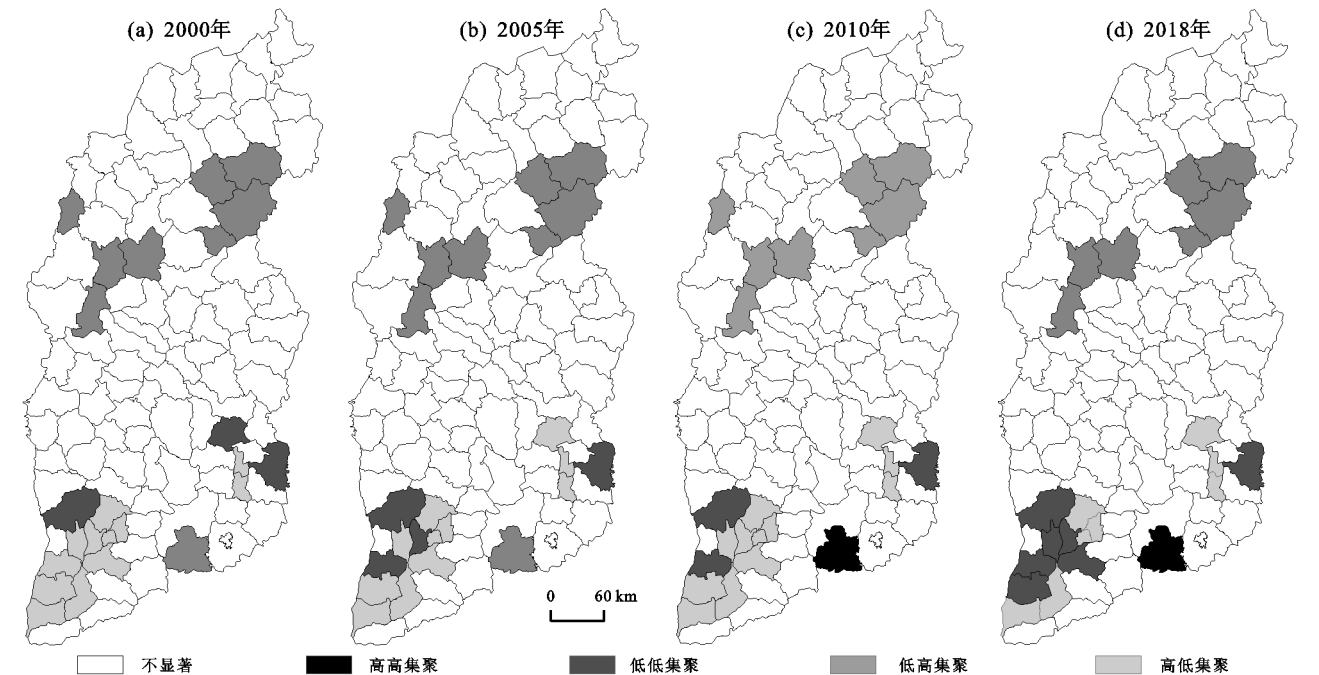


图 5 2000—2018 年山西省城镇化与生态系统服务价值双变量 LISA 聚集图

2.4 空间计量实证检验与结果分析

空间效应强调溢出在地理空间中的作用,通过空间依赖性和空间集聚机制改变空间格局,在城市化进程的干扰下,生态系统服务价值具有很强的空间溢出效应,从而对邻近地区的生态价值产生不同程度的影响^[26]。依据双变量全局 Moran's I 指数计算结果,山西省城镇化与生态系统服务具有明显的空间依赖性,可以建立空间计量模型,为选取更优空间面板模型,采用 Matlab 软件进行模型检验。由于库兹涅兹曲线认为经济发展水平与环境污染之间存在倒“U”形曲线,所以在此基础上加入城镇化水平的平方项^[27](X_{11})进一步探讨二者之间的关系。在空间计量模型中,被解释变量设置为生态系统服务价值,解

释变量设置为城镇化指标体系($X_1 \sim X_{10}$)和城镇化水平的平方项(X_{11})。首先,利用 Wald 统计量以及 LR 统计量检验 SDM 模型能否简化为 SLM 模型或 SEM 模型,结果 $p > 0.05$ 无法拒绝原假设,所以选择 SLM 或 SEM 模型。其次,对模型进行普通最小二乘法(OLS)回归,利用 LM 检验判断选择 SLM 或 SEM 模型,结果表明,LM-lag、R-LMlag 和 LM-error、R-LMerror均通过了 1%或 5%水平下的显著性检验(表 7),但 SLM 模型检验统计值明显高于 SEM 模型,所以选择更优的 SLM 模型。最后进行 Hausman 检验,结果显示, P 均为 0, $< 5\%$ 的显著性水平检验临界值。综合来看,应选择更合适的空间时间双固定 SLM 模型。

表 7 空间面板模型识别检验结果

检验方法	统计值	P 值	检验方法	统计值	P 值
Wald-lag test	9.045	0.617	LMlag test	32.731	0
LR-lag test	11.641	0.391	R-LMlag test	24.255	0
Wald-error test	8.280	0.688	LMEError test	12.856	0
LR-error test	11.614	0.393	R-LMEError test	4.380	0.036

根据模型回归结果(表 8),空间时间双固定 SLM 与 SEM 模型的结果基本一致且 R^2 明显高于 OLS 回归模型,这是由于 OLS 模型不考虑变量的空间依赖性,所以无法完整解释二者之间的相互关系,导致拟合效果较差。从双固定 SLM 检验结果看,城镇化率、建成区面积与生态系统服务显著负相关,人均社会消费品零售总额、城镇化水平的平方项与生态系统服务显著正相关,其余因素对生态系统服务价值的影响并不显著。城镇化率每增加 1%,生态系统服务价值将下降 0.015%,表明城镇化进程加快,大量人口不断向城市聚集,较强的人类活动一方面降低了土地利用的生态价值;另一方面,对生物的生存环境造成一定影响,给生态系统带来极大的负面压力,使得生态系统服务价值降低。建成区面积每增加 1%,生态系统服务价值将下降 0.098%,2018 年山西省建设用地面积扩张为初始年份的 105%,一定时间内城市商业用地、工业园区、住宅区占用了大量的耕地、草地和水域面积,不合理的城市规划使得生态系统服务

价值显著降低,此外,交通、管道、能源等城市基础设施的持续建设,加深了对生态系统的负面影响。人均社会消费品零售总额每提高 1%,生态价值将上升 0.018%,随着研究区人民物质生活水平的提高,居民对美好生活环境的需求不断加强,开始重视生态保护,推动社会资本更多的向生态环保项目投资,例如,建设城市湿地公园及森林公园,进而提升生态系统服务价值,使二者之间呈正相关关系。城镇化水平的平方项每上升 1%,生态系统服务价值将相应提升 0.011%,表明二者之间存在“U”形曲线关系,即在城镇化发展初期,生态系统服务价值会随着城镇化的提高而下降,当城镇化水平到达 1 个拐点时,又会随着城镇化水平的上升而提高。由于城镇化快速发展带来的环境问题日益突出,跨过拐点的县域在城市扩张的同时,开始重视区域生态环境的改善与修复,实现生态与经济协调发展,生态环境将会得到明显改善,从而生态价值逐步升高,这与陈万旭等^[28]对长江中游城市群研究中发现二者之间存在“U”形曲线关系的结论一致,且与王迪等^[29]提出钱塘江流域生态系统服务的库兹涅兹效应研究结果相吻合,证实了库兹涅兹曲线在研究区城镇化与生态系统服务研究中的合理性。综合分析,建成区面积的扩张对研究区生态系统服务价值的影响最为显著。

表 8 空间面板模型回归结果

变量	OLS 回归	时空双固定 SLM 模型	时空双固定 SEM 模型	变量	OLS 回归	时空双固定 SLM 模型	时空双固定 SEM 模型
CONSTANT	-0.156	—	—	X_9	0.233	-0.098***	-0.098***
X_1	-0.057	-0.015**	-0.014**	X_{10}	-0.976***	0.032*	0.032*
X_2	0.596***	0.007	-0.008	X_{11}	-0.359	0.011**	0.001**
X_3	0.241	0.009	0.006	W * dep.var.	—	0.243***	—
X_4	0.257*	-0.007	-0.006	spat.aut.	—	—	0.261***
X_5	-0.079	-0.002	-0.001	R^2	0.384	0.999	0.999
X_6	0.243**	0.018**	0.019**	Log-L	142.069	1456.226	1456.220
X_7	0.988**	0.025	0.028	Hausman	—	2.576***	12.576***
X_8	0.221	-0.008	-0.012				

注:W * dep.var 为空间滞后项系数;spat.aut 为空间误差项系数;***、**、* 分别表示通过 1%、5%和 10%水平下的显著性检验。下同。

3 讨论

由空间计量结果(表 8)可知,双固定 SLM 模型中滞后项的回归系数为 0.243,通过了 1%的显著性检验,表明生态系统服务价值对周围地区有显著的正向空间溢出效应,在控制其他解释变量不变的前提下,相邻县域生态价值每提高 1%将会对本县域产生 0.243%的促进作用。这种空间效应表明,山西省生态系统服务具有整体性,各县的生态价值不仅会受到自身环境的影响,还会受到邻近乃至更远地区的影

响,使研究区各县域形成共同进退的局面,对生态环境的保护应打破行政边界的限制,如果只单纯改善某一县域是不能显著提高整体的生态质量;研究区生态系统服务具有不稳定性,即 1 个县域的生态价值容易受到周围县域的干扰,由于陕西省与山西省共同属于黄土高原地区,杨屹等^[30]对陕西省生态足迹和生态承载力变化研究发现,该地区生态系统整体也处于不稳定状态,所以,在治理过程中应提高各县域生态系统的抵抗能力和恢复能力,如增加地区物种的数量,

保护生物多样性等,进而增强抵御邻近县域负向溢出的可能性;在生态系统服务正向溢出效应的影响下可能会导致各县域政府只会依赖周围地区而丧失自身环境保护的积极性,对整个研究区的生态系统产生极大的负面影响,这与李国平等^[27]在国家重点生态功能区生态环境质量研究中提出,各县生态环境保护行为存在“搭便车”的结论保持一致。此外,空间时间双固定 SEM 模型的空间误差项在 1%水平上显著,表明生态系统服务价值不仅会受到城镇化各因素的影响,还会受到地形、气候、交通等误差项的影响^[28]。

本文基于单位面积价值当量因子法评估山西省生态系统服务价值,此方法具有相对简单、全面的评估体系,特别适用于区域生态系统服务价值评估。已有对汾河流域生态系统服务价值研究^[31]表明,整体呈下降趋势,这与山西省生态价值变化一致,证明研究结果的可靠性。考虑到数据的可得性,计算当量因子时未能采用各县域粮食产量和价格,从而弱化了研究区县域的空间异质性,对估算结果可能会产生影响。在城镇化指标选择方面,由于县域数据较难获取,导致一些相关指标并未列入评价体系,今后研究应选择更合理的评估方法或收集更详细的数据,进一步提升研究结果的精度。

为促进研究区环境保护和区域经济可持续发展,提出 3 点建议:(1)针对山西省城镇化与生态系统服务之间局部空间异质性,分区域制定二者协调发展路径。高高集聚的县区,运用低碳循环理念对城市进行合理规划,促进经济发展的同时,继续保持经济与生态的平衡关系,提高居民的环保意识,发展新兴产业,走绿色城镇化之路;低低集聚的县区应建立生态保护区,提高环境承载力,在保证区域生态安全的情况下因地制宜,发展生态农业及特色旅游业,形成生态与经济的良性互动;低高集聚的县区应依靠良好的生态环境发展特色农业,如果业、养殖业、中药材业,打造特色品牌,扶持乡村经济,促进农村生态循环经济的发展;高低集聚的县区应加快经济转型,建立健全环境保护制度,严把环境标准,淘汰落后产能,合理规划城市用地,大力实施绿化工程,把保护生态及生物多样性上升到战略高度。(2)合理把控城市建设用地与生态环境之间的平衡关系。研究区建成区面积的快速扩张是生态系统服务下降的重要原因,因此,在经济发展的同时应合理控制城市人口,分散人口压力,严格限制城市的过度扩张,合理规划城市建设,为地区生态系统服务提供更多可用空间,进而提高生态承载力。(3)建立区域生态环境协同治理机

制。研究区各县域应该清楚地意识到生态环境合作保护的重要性以及建立联防联控体系的必要性,在土地利用规划中,应充分考虑自身以及周围县域的土地利用情况,进行跨区域的协同治理,提高每个县域环境保护的积极性以及发挥生态系统服务的正向溢出效应,在生态保护中形成合作共赢的友好局面。

4 结论

(1)研究期间山西省生态系统服务价值整体呈下降趋势,减少 34.52 亿元。山地地区地均生态系统服务价值高,盆地地区生态价值低,2010—2018 年山西省北部(−3.41%)下降速度明显快于南部(−1.90%)。

(2)研究区城镇化综合水平有了显著提高,但仍以中低水平为主,城镇化水平整体偏低。城市化空间分布具有等级性,行政等级越高的地区城市化水平也越高,山地地区城镇化水平增长速度(314.01%)明显高于盆地地区(262.28%)。

(3)研究区城镇化与生态系统服务之间存在显著的空间负相关,呈“U”形发展趋势。高高集聚区位于 2010 年阳城县,低低集聚区位于乡宁县、万荣县和平顺县,低高集聚区集中分布于吕梁山的中北部和五台山附近的县域,高低集聚区主要分布在研究区南部和东南部中心城区附近。

(4)空间计量模型表明城镇化率、建成区面积与生态系统服务显著负相关,人均社会消费品零售总额、城镇化水平的平方项与生态系统服务显著正相关。生态系统服务价值对周围地区有显著的正向空间溢出效应,相邻县域生态价值每提高 1%将会对本县域产生 0.243%的促进作用,空间溢出效应表明,研究区生态系统服务具有整体性和不稳定性,使各县域政府丧失自身环境保护的积极性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 宋永永,薛东前,马蓓蓓,等.黄土高原城镇化过程及其生态环境响应格局[J].经济地理,2020,40(6):174-184.
- [3] Grossman G, Krueger A. Economic growth and the environment[M]. Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2):353-377.
- [4] Halecki W, Stachura T. Evaluation of soil hydrophysical parameters along a semiurban small river: Soil ecosystem services for enhancing water retention in urban and suburban green areas[J].Catena,2021,3:e196.
- [5] Merga L B, Mengistie A A, Faber J H, et al.Trends in chemical pollution and ecological status of Lake Ziway, Ethiopia: A review focussing on nutrients[J]. Metals

- and Pesticides, 2020, 45(4): 386-400.
- [6] Christine W, Lisa N, Beery T H, et al. Operationalizing ecosystem-based adaptation: harnessing ecosystem services to buffer communities against climate change [J]. *Ecology and Society*, 2016, 21(1): 31-35.
- [7] 张佳田, 焦文献, 韩宝龙. 城镇化与生态系统服务的协调演化特征及空间耦合关系[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3271-3282.
- [8] 聂名萱, 黄思华, 濮励杰, 等. 快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析: 以苏锡常地区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1088-1099.
- [9] 黄敏, 杨飞, 郑士伟. 中国城镇化进程对生态系统服务价值的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 352-359.
- [10] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市化与生态系统服务的空间交互关系研究: 以长株潭城市群为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7502-7513.
- [11] 山西省人民政府. 山西省“十三五”生态环境保护规划. 晋政办发[2016]66号[EB/OL]. (2016-12-21)[2021-4-22]. http://www.shanxi.gov.cn/sxszfxxgk/sxsrmzfzcbm/sxszfbgt/flfg_7203/bgtgfwj_7206/201011/t20101108_161036.shtml.
- [12] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[Z]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2019. <http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIId=54>.
- [13] 国家统计局山西省调查总队. 山西省统计年鉴[EB/OL]. (2019-12-16)[2021-04-22]. <http://tjj.shanxi.gov.cn/tjsj/>.
- [14] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴[EB/OL]. (2019-12-31)[2021-04-22]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjcbw/201907/t20190708_1674727.html.
- [15] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[EB/OL]. (2019-12-31)[2021-04-22]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjcbw/202008/t20200824_1785460.html.
- [16] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农产品价格调查年鉴[EB/OL]. (2020-12-16)[2021-04-22]. <https://data.cnki.net/trade/yearbook/single/n2017030068?z=z009>.
- [17] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [18] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 325-337.
- [19] 赵秀清, 白永平. 内蒙古城镇化综合水平空间格局演变及驱动因子分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 14-23.
- [20] 杨振山, 杨定. 城市发展指数指引下的我国收缩区域初步评判[J]. *人文地理*, 2019, 34(4): 63-72.
- [21] 邱孟龙, 曹小曙, 周建, 等. 基于 GWR 模型的渭北黄土旱塬粮食单产空间分异及其影响因子分析: 以陕西彬县为例[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(2): 273-284.
- [22] 肖攀, 苏静. 城镇化对生态环境质量影响的实证研究: 以环洞庭湖区为例[J]. *财经理论与实践*, 2019, 40(1): 150-155.
- [23] 于冠一, 修春亮. 辽宁省城市化进程对雾霾污染的影响和溢出效应[J]. *经济地理*, 2018, 38(4): 100-108, 122.
- [24] 山西省人民政府. 山西省林业生态建设总体规划纲要(2011—2020年). 晋政办发[2010]87号[EB/OL]. (2010-11-08)[2021-04-22]. http://www.shanxi.gov.cn/sxszfxxgk/sxsrmzfzcbm/sxszfbgt/flfg_7203/bgtgfwj_7206/201011/t20101108_161036.shtml.
- [25] 刘新智, 任钦义. 重庆市城镇化质量空间演变及动力研究[J]. *西南大学学报(社会科学版)*, 2019, 45(4): 80-90, 198.
- [26] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial aspect of ecosystem services balance and its determinants[J]. *Land Use Policy*, 2020, 90: e104263.
- [27] 李国平, 杨雷, 刘生胜. 国家重点生态功能区县域生态环境质量空间溢出效应研究[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2016, 16(1): 10-19.
- [28] 陈万旭, 刘志玲, 李江风, 等. 长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5137-5150.
- [29] 王迪, 谢慧明. 流域范围内县域生态系统服务价值库兹涅茨效应研究: 以钱塘江流域为例[J]. *生态经济*, 2021, 37(6): 147-152, 164.
- [30] 杨屹, 加涛. 21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化[J]. *生态学报*, 2015, 35(24): 7987-7997.
- [31] 伍博炜, 杨胜天, 邵南方, 等. 黄土高原生态脆弱区土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以汾河流域为例[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 340-345.