北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于GTWR模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应

冯一凡 李翅 冯君明

Spatiotemporal response of ecosystem service value in Jinan metropolitan area to urban expansion based on GTWR model

Feng Yifan, Li Chi, Feng Junming

引用本文:
冯一凡, 李翅, 冯君明. 基于GTWR模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1):104–118. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220489
Feng Yifan, Li Chi, Feng Junming. Spatiotemporal response of ecosystem service value in Jinan metropolitan area to urban expansion based on GTWR model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1):104–118. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220489

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220489

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于LUCC追踪分析的生态系统服务价值时空变化研究
Spatio–temporal variation of ecosystem service value based on LUCC trajectories: a case study of Bosten Lake Watershed
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 88–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210017

基于GWR模型的成渝城市群生态系统服务时空演变及驱动因素研究
Spatio–temporal evolution and driving factors of ecosystem services in Chengdu–Chongqing urban agglomeration of southwestern China based on GWR model
北京林业大学学报, 2020, 42(11): 118–129. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200217

基于生态系统服务功能提升的暖温带半湿润地区城市森林营建研究
Urban forest construction based on ecosystem service function improvement in warm temperate semi–humid areas
北京林业大学学报, 2020, 42(1): 127–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20180433

基于LUCC的承德市域生态系统服务价值演变分析与优化研究
Evolution analysis and optimization research of ecosystem service value in Chengde City, Hebei Province of northern China based on land use/land cover change (LUCC)
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 106–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190480

基于生态系统服务功能模拟演算的绿色空间规划框架
Construction of green space planning framework based on ecosystem service function simulation: a case study of shallow mountain area in Beijing
北京林业大学学报, 2019, 41(11): 125–136. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190149

黑龙江丰林国家级自然保护区生态系统服务价值评估与分析
Evaluation and analysis on ecosystem service value of Fenglin National Nature Reserve in Heilongjiang Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 100–110. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210041

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220489

基于 GTWR 模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应

冯一凡　李　翅　冯君明
（北京林业大学园林学院，北京 100083）

摘要:【目的】随着我国城镇化发展进入到以中心城市引领都市圈、城市群的发展阶段，如何促进都市圈城镇化与生态环境协调发展成为高质量城镇发展的重要议题。生态系统服务价值对城市扩张的时空响应研究有助于把脉城市发展与生态系统服务的时空演进特征，推动城市与生态系统的协同发展，助力可持续规划以及建设策略的拟定与实施。**【方法】**本文以济南都市圈为研究对象，基于城镇扩展指数的计算，定量描述各城市扩张的时空特征。采用生态系统服务当量因子法，从多个角度刻画研究区生态系统服务的时空分异特征，并分析生态系统权衡与协同效应。在此基础上，运用时空地理加权回归（GTWR）模型，探究城市扩张对生态系统服务功能变化的驱动方向与驱动强度。**【结果】**（1）1980—2020 年间济南都市圈内城市扩张显著，具有时序阶段性与区域分异性两方面特征，城市空间扩展速率与强度由高到低依次为小城市、大城市、特大城市、中等城市。（2）都市圈内整体生态服务价值量呈逐年下降趋势，黄河干流、东平湖及周边区域与鲁中山区等地区是重要的生态系统服务价值高值聚集区，都市圈内协同关系占比略低于权衡关系，其中特大城市协同关系占比最高。（3）济南都市圈内城市扩张对生态系统服务价值整体具有负面影响，随着时间的推进，影响强度有所下降。城市扩张对各亚类生态系统服务功能的影响作用具有显著差异，对供给服务与支持服务价值量变化具有负面影响，其中对供给服务变化的驱动强度不断增强，对调节服务价值量变化具有正向作用且影响力整体变化不大，对文化服务价值量变化的影响具有两面性，在不同地区的驱动方向与强度差异性较大。**【结论】**本研究明确了研究期限内济南都市圈中不同等级城市空间扩展的时空分异规律以及生态系统服务逐渐劣化的发展状态，所构建的 GTWR 模型在空间层面上量化了城市扩张对生态系统服务总量及各亚类变化量的不同驱动特征与驱动强度，研究成果可为都市圈高质量可持续发展提供决策依据。

关键词：城市扩张；生态系统服务价值；权衡协同；时空地理加权回归（GTWR）；济南都市圈
中图分类号：TU984　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)01−0104−15
引文格式：冯一凡，李翅，冯君明. 基于 GTWR 模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应［J］. 北京林业大学学报，2024，46(1)：104−118. Feng Yifan, Li Chi, Feng Junming. Spatiotemporal response of ecosystem service value in Jinan metropolitan area to urban expansion based on GTWR model［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 104−118.

Spatiotemporal response of ecosystem service value in Jinan metropolitan area to urban expansion based on GTWR model

Feng Yifan　Li Chi　Feng Junming
(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］As China’s urbanization enters a stage where central cities lead the development of metropolitan areas and urban agglomerations, how to promote the coordinated development of urbanization and ecological environment in metropolitan areas has become an important issue for high-quality urban

收稿日期: 2022−12−03　**修回日期:** 2023−06−13
基金项目: 国家自然科学基金面上项目（51978050），国家住房与城乡建设部科学技术计划项目（2020-k-194），城乡人居生态环境学（北京高校高精尖学科建设项目）。
第一作者: 冯一凡，博士生。主要研究方向：风景园林规划与设计。Email: 373031022@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。
责任作者: 李翅，教授，博士生导师。主要研究方向：韧性城市与区域发展、风景园林规划与设计。Email: lichi@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

development. Research about the spatiostemporal response of ecosystem services to urban expansion helps to characterize the spatial and temporal evolution of urban development and ecosystem services, promote the synergistic development of cities and ecosystems, and help formulate and implement sustainable planning strategies. [**Method**] Taking Jinan metropolitan area as the target area, we studied the spatial and temporal characteristics of each city's expansion based on the urban expansion index calculation, evaluated the ecosystem service value based on per unit area, and analyzed the temporal and spatial differentiation characteristics of ecosystem services. Furthermore, we studied the spatiotemporal response of ecosystem services to urban expansion of the Jinan metropolitan based on GTWR. [**Result**] (1) From 1980 to 2020, urban expansion of the Jinan metropolitan area was characterized by time series and regional differentiation. The urban spatial expansion rate and intensity were sorted from high to low as small cities, large cities, megacities and medium-sized cities. (2) The overall ecological service value within the urban area was showing a decreasing trend year by year. The mainstream of the Yellow River, Dongping Lake and its surrounding areas, and mountainous area in central Shandong Province of eastern China were important areas with high value of ecosystem services. The proportion of synergistic relationship in metropolitan areas was slightly lower than that of trade-off relationship, with megacities accounting for the highest proportion. (3) Urban expansion in the Jinan metropolitan area had a negative impact on ecosystem services, while the intensity of negative effects decreased year by year. The impact of urban expansion on the functions of ecosystem services of different subcategories was significantly different. Specifically, urban expansion has a negative impact on supply services and support services, while the intensity of impact on supply services is increasing. Urban expansion has a positive impact on regulation services. The impact of urban expansion on cultural services has two sides and differs significantly in different areas. [**Conclusion**] We clarify the distribution pattern of spatiotemporal variation of urban expansion of different cities in the Jinan metropolitan area, and further analyze the development state of gradual deterioration of ecosystem services during the study period. Based on the GTWR model, we quantify the different driving characteristics of urban expansion on ecosystem services at the spatial level. The results can provide a decision-making basis for the high-quality sustainable development of metropolitan areas.

Key words: urban expansion; ecosystem service value; tradeoff and synergy; spatiotemporal geographically weighted regression (GTWR); Jinan metropolitan area

都市圈是以一个或多个中心城市为核心，依托社会、经济、交通等联系通道，吸引和辐射邻接地区所共同构成的圈层式结构[1−3]。随着我国城镇化发展进入到以中心城市引领都市圈、城市群的发展阶段，都市圈成为推进高质量城镇发展的重要环节[4]。2019 年发布的《关于培育发展现代化都市圈的指导意见》进一步明确了“要培育发展一批现代化都市圈”，对现代化都市圈建设提出了更高的目标与要求。环境和谐宜居是现代化都市圈的主要目标之一，然而，目前城镇扩张与生态环境之间的冲突与矛盾仍然存在。如何促进城镇化与生态环境协调发展，以实现区域整体可持续发展，是都市圈高质量发展的重要议题。

生态系统服务量化是城镇化与生态环境协调发展的基础。学者们通过引入生态系统服务价值当量因子[5−6]、基于多源数据构建生态系统服务功能评价指标体系[7−11]等方法实现生态系统服务的定量测度。在此基础上，众多学者对生态系统服务权衡与协同关系进行深入分析，从增强协同角度提出生态空间布局与优化策略[12−15]。国内外现有涉及城市圈、都市圈城镇扩张对生态系统服务的影响研究主要从演进特征分析[16−17]、驱动关系研究[18−19]、未来模拟预测[20−21] 3 个方面展开。为了实现城镇扩张对生态系统服务影响的定量化研究，学者们引入了皮尔逊相关系数[22]、Logistic 多元回归模型[23]、随机森林 RF 回归模型[18]、地理加权回归模型[4]等指标与模型进行测算和分析，深入刻画城镇化对生态服务功能的影响强度和驱动机理。随着研究的不断深入，城市扩张对生态系统的影响研究不仅局限于关系判定层面，更多学者尝试从空间层面对二者关联与响应程度进行精细化解读[24−25]，以更好地为规划制定与政策调控提供科学参考。

济南都市圈以省会城市济南为核心，涉及德州、聊城、泰安、淄博、邹平 5 个邻接城市，是推进山东半岛城市群一体化发展、推动黄河流域生态保护和高质量发展的引领区和示范区。现有关于济南都市

圈的研究主要集中在城市功能结构时空演变[26−27]、区域经济发展[28−29]以及区域协调优化[30]等方面。随着生态文明建设的不断推进，学界对于济南都市圈生态环境与生态系统服务的关注度不断增加，Li 等[31]定量测度了都市圈内生态系统服务供需匹配关系，并基于区域一体化发展提出优化策略。现阶段，济南都市圈城市空间层面研究已较为成熟，生态层面研究也日渐增多，但耦合城市空间与生态系统的综合性研究较为缺乏。

本研究以济南都市圈为研究对象，基于城镇扩展指数的测算描述各等级城市扩张过程与空间特征，定量测度生态系统服务价值并分析生态系统服务间的权衡与协同关系，运用时空地理加权回归模型量化分析不同等级城市生态系统服务对城市扩张的响应，并结合不同主体功能以及各等级城市特征提出分区指导、分级施策的优化建议，以期提升相关规划发展政策的靶向性，为推动济南都市圈可持续发展提供政策依据与科学参考。

1 研究区概况

济南都市圈位于 35°35′ ~ 38°00′N、115°16′ ~ 118°31′E，跨黄河流域下游地区。研究区内地貌类型丰富，地势南高北低，最高海拔 1 532.7 m（泰山玉皇顶），最低海拔位于滨州市小清河下游附近仅 3.0 m，相对高差超过 1 500 m。济南都市圈面积约为 5.3 万 km^2，总人口约 3 100 万，是山东省五大都市圈中规模最大的一个。《山东半岛城市群发展规划（2016—2035 年）》中明确提出济南都市圈是以省会城市济南为发展核心、紧密联系周边城市的重要经济圈。《济南市国土空间总体规划（2021—2035 年）》中也提出济南都市圈核心圈层包括淄博、泰安、聊城、德州、滨州市的部分区域，应强化济南省会引领功能，构建 1 小时通勤圈，充分带动周边区域。本文结合《山东半岛城市群发展规划（2016—2035）》与《济南市国土空间总体规划（2021—2035 年）》中济南都市圈范围的相关内容，将研究范围确定为济南、德州、聊城、泰安、淄博、邹平 6 个城市（图 1）。

济南都市圈内城市规模与发展水平差异化较大（表 1），依据 2014 年国务院印发《关于调整城市规模划分标准的通知》中城市等级的划分标准，济南都市圈包含特大城市（济南市）、大城市（聊城市、泰安市、淄博市）、中等城市（德州市）以及小城市（邹平市）4 个等级的城市。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究数据与预处理

研究数据主要包括济南都市圈行政区划数据与土地利用遥感监测数据均来源于中国科学院资源环

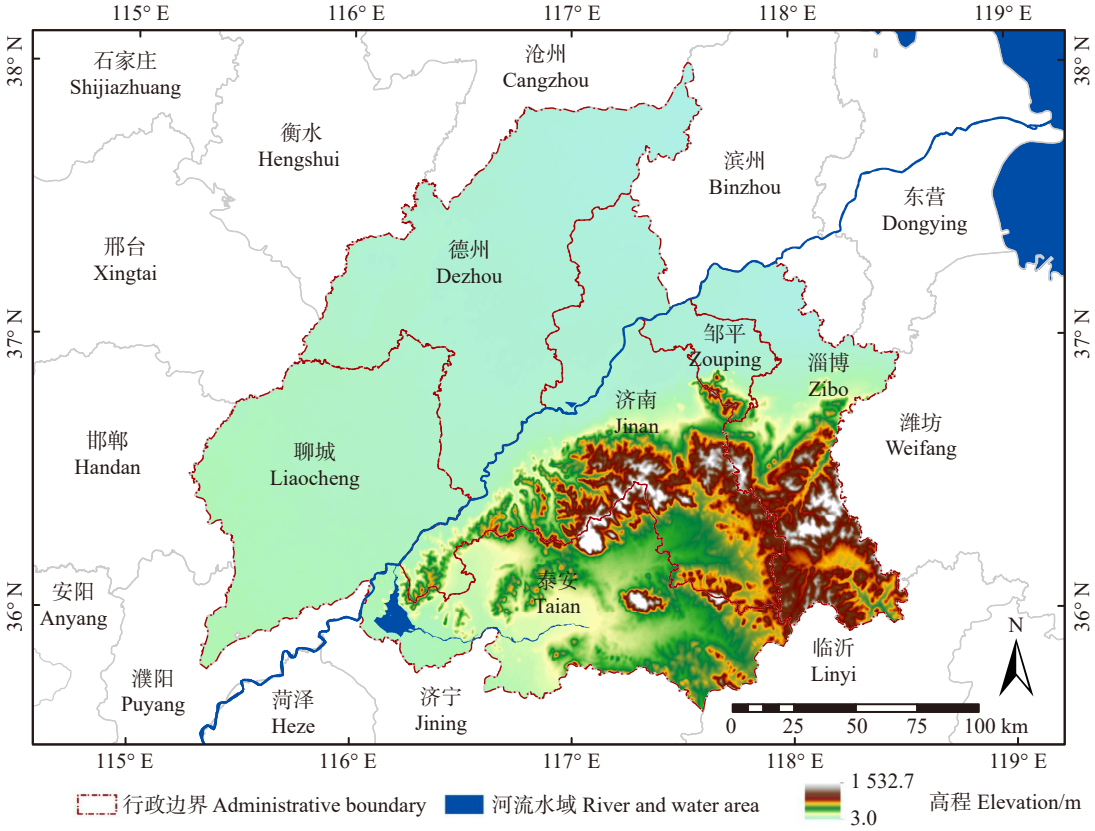


图 1 济南都市圈区位

Fig. 1 Location of the Jinan metropolitan area

表 1　济南都市圈城市基本情况

Tab. 1　Basic situation of Jinan metropolitan area cities

城市 City	常住人口 Permanent population	2020年国民生产总值/亿元 GDP in 2020/10^8 CNY	行政区面积 Administrative area/km^2
济南 Jinan	920.2×10^4	10 140.91	10 220
聊城 Liaocheng	650.0×10^4	2 316.84	8 628
泰安 Taian	547.8×10^4	2 766.50	7 762
淄博 Zibo	470.4×10^4	3 673.50	5 965
德州 Dezhou	560.0×10^4	3 078.99	10 356
邹平 Zouping	77.4×10^4	558.80	1 252

境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)。其中，土地利用数据包括研究范围内 6 个城市 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 5 期用地类型数据，涵盖耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用土地 6 个一级分类和 25 个二级分类，分辨率为 30 m × 30 m，数据库 Kappa 系数为 0.889，达到研究所需数据精度要求。借鉴谢高地等[32−33]建立的中国生态系统单位面积生态服务价值当量框架及其应用研究[34]，将 25 个二级用地分类进行重分类，得到用于计算的 11 个二级土地利用类型。

2.2　研究方法

2.2.1　城镇扩展指数

城镇扩展强度指数(urban expansion intensity index，UEII)指单位时期内某区域范围内城镇用地的扩展面积占其土地总面积的百分比[35]。该指数对研究区内各分析单元内城镇用地的增长速度进行标准化处理，表征研究期内各分析单元城镇扩展的强度和快慢[36]，可用于各分析单元特征值的纵向(时序)分析。计算公式为

$$I_i = \frac{S_i^{t_2} - S_i^{t_1}}{A_i \Delta t} \times 100\% \tag{1}$$

式中：I_i 为分析单元 i 的城镇扩展强度指数，$S_i^{t_2}$、$S_i^{t_1}$ 为 t_2、t_1 时期该单元内城镇用地面积，A_i 为分析单元 i 总面积，Δt 为研究时段跨度。

城镇用地扩展差异指数(urban expansion differentiation index，UEDI)是指某空间单元内城镇扩展变化率与研究区内城镇扩展变化率的比值[37]。区别于城镇扩展强度指数，城镇用地扩展差异指数受各空间单元土地总面积差异的影响较小，有助于对不同空间单元之间城镇用地扩展强度与速率进行横向比较[35]。计算公式为

$$E_i = \frac{\left|S_i^{t_2} - S_i^{t_1}\right| U^{t_1}}{|U^{t_2} - U^{t_1}| S_i^{t_1}} \tag{2}$$

式中：E_i 为空间单元 i 的城镇扩展差异指数，U^{t_2}、U^{t_1} 为研究区域在 t_2、t_1 时期总城镇用地面积，$S_i^{t_2}$、$S_i^{t_1}$ 为 t_2、t_1 时期空间单元 i 内的城镇用地面积。

本研究基于 5 期土地利用数据，提取二级分类中涵盖大、中、小城市及县镇以上建成区用地的城镇用地，分别计算 1980—1990 年、1990—2000 年、2000—2010 年、2010—2020 年 4 个时段的 UEII 指数与 UEDI 指数。通过对计算结果进行横、纵向对比分析，解读都市圈内各等级城市扩张的时空特征。

2.2.2　生态系统服务价值计算

生态系统服务当量因子研究法是估算区域及城市群生态系统服务价值的重要方法[38]。本研究采用生态系统服务当量因子法估算济南都市圈内生态系统服务价值，核心为当量因子的计算与修正。谢高地等[33]在 Contanza 等[39]研究基础上，构建并修正了中国生态系统单位面积生态服务价值当量表，提出 1 个标准单位生态系统服务价值当量指单位面积农田生态系统粮食生产的净利润，农田生态生态系统的粮食产量价值主要依据稻谷、小麦和玉米三大粮食主产物计算，其计算公式为

$$D = S_r F_r + S_w F_w + S_c F_c \tag{3}$$

式中：D 表示 1 个标准当量因子的生态系统服务价值；S_r、S_w 和 S_c 分别表示当年研究区域稻谷、小麦和玉米的播种面积占 3 种作物播种总面积的半分比；F_r、F_w 和 F_c 分别表示当年研究区域内稻谷、小麦和玉米的单位面积平均净利润。

本研究分别从《中国统计年鉴》与《中国农产品成本收益资料汇编》中获取山东省 3 种粮食主产物播种面积与单位面积平均净利润面板数据，分别计算得出 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年间山东省生态系统服务价值当量因子。为消除通货膨胀的影响并增加横向对比可靠性，本研究选择 CPI 指数对多年当量因子进行修正[34]，计算得出山东省生态系统服务价值当量因子为 1 167.18 元/hm^2，拟定济南都市圈生态系统服务价值当量因子表(表 2)。

本研究以济南都市圈 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 5 期土地利用数据为基础，基于生态系统服务价值当量因子表计算出研究区域内

表 2 济南都市圈生态系统服务价值当量因子表 元/（hm^2·a）

Tab. 2 Equivalent factor table of ecosystem service value of Jinan metropolitan area CNY/(ha·year)

土地利用类型 Land use type		供给服务 Supply service			调节服务 Regulation service				支持服务 Support service		文化服务 Cultural service	
一级分类 Primary classification	二级分类 Secondary classification	FP	RMP	WRS	GR	CR	EP	HR	SC	NCM	MB	ALS
农田 Farmland	旱地 Dry farmland	992.10	466.87	23.32	782.01	420.18	116.72	315.14	1 202.19	140.06	151.73	70.03
	水田 Paddy farmland	1 587.36	105.05	−3 069.67	1 295.56	665.29	198.42	3 174.71	11.67	221.76	245.11	105.05
林地 Forestland	有林地、疏林地、其他林地 Forest land, sparse forest land, and other forest land	319.03	735.32	381.27	2 419.94	7 236.49	2 104.81	4 509.18	2 945.17	225.65	2 680.61	1 174.96
	灌木林 Shrubbery	221.76	501.88	256.78	1 645.71	4 937.15	1 493.98	3 910.04	2 007.54	151.73	1 832.46	805.35
草地 Grassland	高覆盖度草地 High coverage grassland	256.78	385.17	210.09	1 330.58	3 524.87	1 167.18	2 579.46	1 622.37	128.39	1 482.31	653.61
	中、低覆盖度草地 Middle and low coverage grassland	116.72	163.40	93.37	595.26	1 564.01	513.55	1 143.83	723.65	58.36	653.61	291.79
水域 Water area	河渠、湖泊、水库坑塘 River, lake, reservoir and pond	933.74	268.45	9 675.88	898.73	2 672.83	6 477.82	119 331.94	1 085.47	81.70	2 976.29	2 205.96
	滩地、滩涂 Beach, mudflat	595.26	583.58	3 022.98	2 217.63	4 201.83	4 201.83	28 280.65	2 696.17	210.09	9 185.66	5 520.73
未利用地 Unused area	沙地、戈壁、盐碱地、其他用地 Sandy land, gobi, alkali soil, other land use	11.67	35.02	23.34	128.39	116.72	361.82	245.11	151.73	11.67	140.06	58.36
	沼泽地 Swampy land	595.26	583.58	3 022.98	231.90	4 201.83	4 201.83	28 280.65	2 696.17	210.09	9 185.66	2 205.96
	裸土地、裸岩石质地 Bare land, bare rocky land	0.00	0.00	0.00	23.34	0.00	116.72	35.02	23.34	0.00	23.34	11.67

注：FP.食物生产；RMP.原材料生产；WPS.水资源供给；GR.气体调节；CR.气候调节；EP.净化环境；HR.水文调节；SC.土壤保持；NCM.维持养分循环；MB.维持生物多样性；ALS.美学景观。Notes: FP, food production; RMP, raw material production; WRS, water resource supply; GR, gas regulation; CR , climate regulation; EP, environment purification; HR, hydrological regulation; SC, soil conservation; NCM, nutrient cycle maintenance; MB, maintaining biodiversity; ALS, aesthetic landscape supply.

各城市生态系统服务价值（ecosystem service values，ESV）及变化率，变化率计算公式为

$$P_i = \frac{V_i^{t_2} - V_i^{t_1}}{V_i^{t_1}} \times 100\% \tag{4}$$

式中：P_i为分析单元 i 生态系统服务价值变化率，$V_i^{t_2}$、$V_i^{t_1}$分别为 t_2、t_1 时期单元 i 生态系统服务价值。

2.2.3 生态系统服务权衡协同度

生态系统服务权衡协同度（ecosystem services trade-off degree，ESTD）以数据线性拟合为基础，反映各个生态系统服务间相互作用的方向与程度[40]，在分析复杂生态系统服务权衡与协同效应研究中应用广泛[41−43]。计算公式为

$$T_{ij} = \frac{C_i^{t_2} - C_i^{t_1}}{C_j^{t_2} - C_j^{t_1}} \tag{5}$$

式中：T_{ij}为第 i 种生态系统服务和第 j 种生态系统服务权衡协同度，$C_i^{t_2}$、$C_i^{t_1}$分别表示在 t_2、t_1 时刻第 i 种生态系统服务自身变化量，$C_j^{t_2}$、$C_j^{t_1}$分别表示在 t_2、t_1 时刻第 j 种生态系统服务自身变化量。T_{ij}计算结果为负值时，第 i 与 j 种生态系统服务为此消彼长的权衡关系；为正值时，两者为同增同减的协同关系。绝对值表示第 i 种生态系统服务变化相较于第 j 种变化的程度。

2.2.4 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归模型（geographically and temporally weighed regression，GTWR）在传统地理加权回归模型（geographically weighted regression，GWR）基础上拓展时间维度，在分析中加入空间坐标以及时间坐标来计算时空权重矩阵[44]，突破了 GWR 模型解释稳定性受截面数据样本数量的限制[45]，

能有效处理时空非平稳性并估计因子参数[24,46]。计算公式为

$$Y_i = \beta_0(x_i, y_i, t_i) + \sum_{k=1}\beta_k(x_i, y_i, t_i)X_{ik} + \varepsilon_i \qquad (6)$$

式中: Y_i 为观测值, $\beta_0(x_i, y_i, t_i)$为 i 单元的回归常数, 即 GTWR 模型中的常数项, $\beta_k(x_i, y_i, t_i)$为城镇单元 i 的第 k 个回归参数, 为模型函数在时空坐标(x_i, y_i, t_i)处的权重; x_{ik} 为独立变量 x_k 在单元 i 处的值, 即 GWTR 模型指标体系中量化指标的值; ε_i 为模型残差。本研究对于 GTWR 模型的计算主要基于 ArcGIS10.5 软件, 采用 Huang 等[47]开发的 GTWR 插件, 带宽采用 AICc 优化设置, 时空距离参数比值设置为 1。

3　结果与分析

3.1　济南都市圈城镇扩张时序特征

1980—2020 年间, 济南都市圈各城市扩张显著(图 2), 城镇用地由 1980 年的 642.2 km^2 增加至 2020 年的 2 961.6 km^2, 年均增长 57.99 km^2。城镇用地整体呈现出圈层式扩展格局, 在 2000—2010 年间, 城镇空间骨架迅速拉开, 济南市、泰安市等地呈现出明显的沿河蔓延趋势。同时, 都市圈中各城市城镇空间连续性显著提升, 区域一体化发展趋势日渐增强。城镇用地的扩张是土地利用模式转换与生态环境变化的多维过程, 各时期济南都市圈城镇用地扩张区域内用地构成以耕地为主, 研究初期扩张的建设用地范围中, 耕地占比高达 97.18%(图 3)。随着时间的不断推进, 耕地占比有所下降, 水域占比上涨明显。2000—2010 年间, 大幅度的城镇扩张对林地与草地的干扰加剧。2010—2020 年间, 随着城镇扩张趋于稳定, 扩张部分的城镇用地对水域、林地、草地等重要生态空间的挤压得到明显缓解, 该时期城镇扩张区域内耕地占比再次回升。

综合城镇扩展强度指数与扩展差异指数计算结果(表 3)可知, 济南都市圈城市扩张呈现出阶段性与异质性两方面特征。研究区域内各城市城镇扩张阶段性特征明显, 4 个时段各城市 UEII 指数先增加后减少, 表现出一定的波动性。2000—2010 年各城市及整个都市圈的 UEII 均达到最大值, 表征该时期为都市圈城镇空间快速扩张阶段。4 个时段各城市 UEDI 指数对应的标准差系数整体呈上升趋势, 反映出都市圈内城市扩展具有区域分异性特征。小城市邹平市 UEDI 指数一直维持在较高水平, 2000—2010 年间约为其他城市的 3 ~ 7 倍。中等城市德州

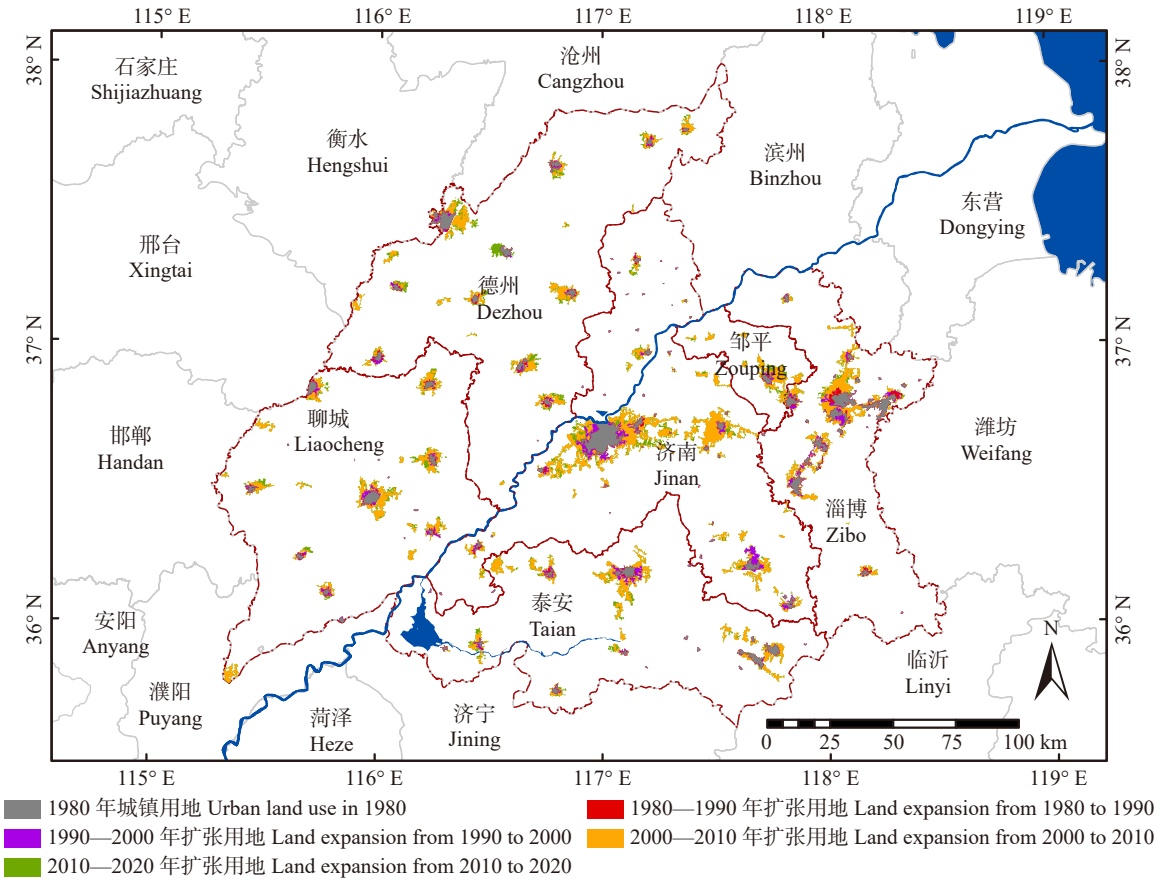
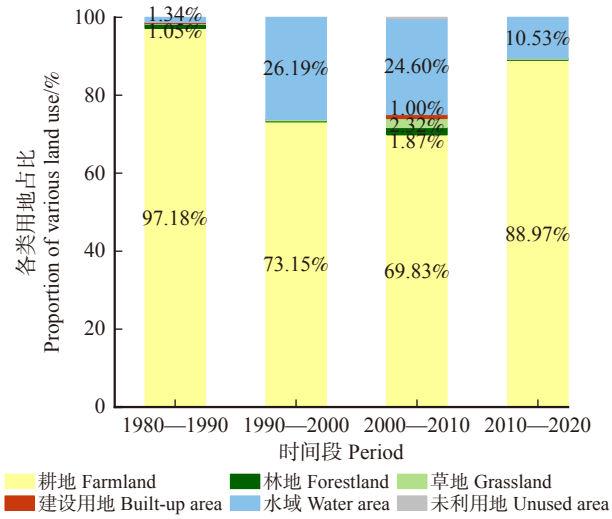


图 2　1980—2020 年济南都市圈城镇用地扩张过程

Fig. 2　Urban expansion process of Jinan metropolitan area during 1980−2020



图中数据标签仅标注占比大于 1% 的用地类型。The data labels in the figure only indicate land types with a proportion greater than 1%.

图 3 济南都市圈城镇用地扩张区域流转用地构成

Fig. 3 Composition of transferred land in urban expansion area of Jinan metropolitan area

市 UEDI 指数在 2010—2020 年间明显高于其他城市。大城市、特大城市在研究早期扩张较快，2000 年后中等城市与小城市扩张速率明显加快。整体来看，城镇空间扩展速率与强度由高到低依次为小城市、大城市、特大城市、中等城市。

3.2 生态系统服务价值时空变化分析

(1)生态系统服务价值时空分布及演变过程。1980—2020 年间，济南都市圈内生态系统服务价值具有显著的时空异质性(图 4)。整体来看，ESV 高值多分布在黄河干流沿岸与东平湖一带等水域、湿地、滩地分布集中区域。此外，鲁中山区依托起伏的地形与优渥的自然条件形成连片分布的生态系统服务价值较高区域。由此可知，水域、林地、草地占比较大的区域生态系统服务价值较高，是重要的生态空间，对区域生态系统服务能力具有重要影响。时间维度上，1980—1990 年间，都市圈内生态系统服务价值呈现大范围上升趋势，鲁中山区一带生态系统

表 3 济南都市圈城市单元城镇扩展强度指数（UEII）与扩展差异指数（UEDI）

Tab. 3 Urban expansion intensity index (UEII) and expansion difference index (UEDI) of Jinan metropolitan area urban units

行政单元 Administrative unit	UEII				UEDI				
	1980—1990	1990—2000	2000—2010	2010—2020	1980—1990	1990—2000	2000—2010	2010—2020	1980—2020
济南 Jinan	0.007	0.099	0.523	0.097	0.422	1.360	1.061	0.799	1.071
聊城 Liaocheng	0.008	0.044	0.306	0.069	0.941	1.268	1.325	1.054	1.375
泰安 Taian	0.006	0.048	0.322	0.065	0.618	1.127	1.183	0.907	1.130
淄博 Zibo	0.046	0.085	0.426	0.041	1.603	0.645	0.583	0.323	0.541
德州 Dezhou	0.012	0.029	0.222	0.124	1.340	0.709	0.947	2.312	1.091
邹平 Zouping	0.008	0.039	0.679	0.162	1.298	1.336	3.504	1.377	3.572
济南都市圈 Jinan metropolitan area	0.014	0.059	0.366	0.086	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
标准差系数 Standard deviation coefficient	0.964	0.444	0.369	0.434	0.402	0.271	0.665	0.546	0.667

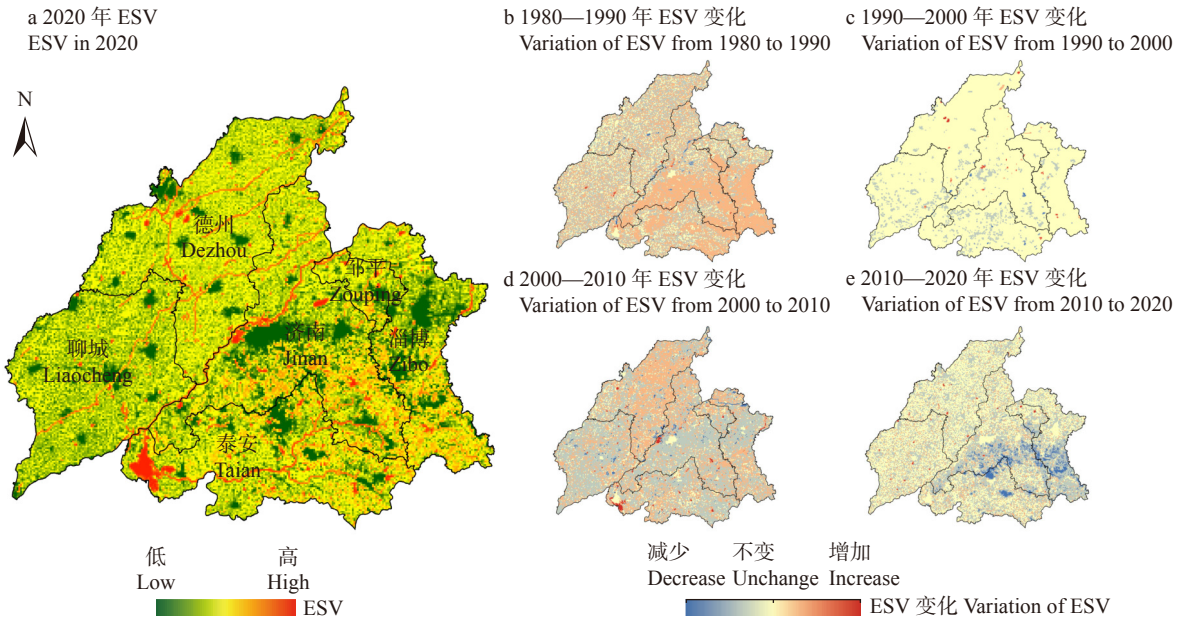


图 4 1980—2020 年济南都市圈生态系统价值(ESV)分布及变化

Fig. 4 Distribution and variation of ecosystem service value (ESV) of Jinan metropolitan area from 1980 to 2020

服务能力提升显著。1990—2000 年间，济南市鹊山水库、卧虎山水库、淄博市萌山水库以及德州市丁东水库、仙人湖等水域集中分布地区 ESV 明显增加，其他地区生态系统服务价值维持稳定水平。2000—2010 年间，济南市黄河南岸地区 ESV 显著提升，东平湖南部地区也出现 ESV 明显增加区域，此外，淄博市淄河沿岸以及济南市雪野湖周边地区 ESV 也大幅度提升。该变化反映出研究区内水环境治理成效显著，重要水域周边地区生态系统得到明显改善。2010 年后，鲁中山区生态系统服务整体下降，边缘区域下降尤为明显。

研究基于 5 期土地利用数据与生态系统服务价值当量，深入刻画都市圈整体及各城市的 ESV 总量与各亚类的价值量变化(图 5)。1980—2020 年间，济南都市圈 ESV 总量整体呈下降趋势，4 类生态系统服务功能价值中，调节服务价值量占有绝对优势，供给服务与支持服务价值量接近，文化服务价值量最低。济南市、聊城市的 ESV 总量逐年下降，1980—1990 年间济南市 ESV总量明显降低，2000 年后聊城市 ESV 总量持续大幅度下降。泰安市、邹平市 ESV 总量在波动中小幅度上升，2000 年后泰安市 ESV 总量开始增长，邹平市则在 2010 年后开始显著提升。淄博市、德州市 ESV 总量整体呈现波动状态，研究末期相较研究初期变化不大。与都市圈整体的生态系统服务功能价值构成一致，调节服务在各城市各时段生态系统服务价值中均占极大比重，其增加与减少对 ESV 总量的变化具有决定性作用。各城市供给服务价值量与文化服务价值量较为平稳，聊城市、淄博市支持服务价值量有小幅度下降。

(2)生态系统服务价值变化率时空分布规律。本研究对 ESV 变化率计算结果进行自然断裂点分级，将变化率负值区间划分为快速下降、中速下降以及低速下降 3 级，将正值区间划分为低速增长、中速增长、高速增长 3 级。结果显示，都市圈内各城市的生态系统服务价值变化率具有显著的时空分异特征(图 6)。1980—1990 年间，都市圈内各城市生态系统服务价值不同程度下降，济南市下降速率较大。1990—2000 年间，淄博市、德州市、邹平市 ESV 进入中速增长阶段，济南市、聊城市、泰安市仍保持低速下降。2000—2010 年间，泰安市 ESV 变化率由负转正，进入 ESV 高速增长阶段，其余城市仍持续下降。2010 年后，邹平市进入 ESV 高速增长阶段，生态环境显著改善；济南市、德州市也分别进入低速增长、中速增长阶段，区域内生态系统逐步恢复与

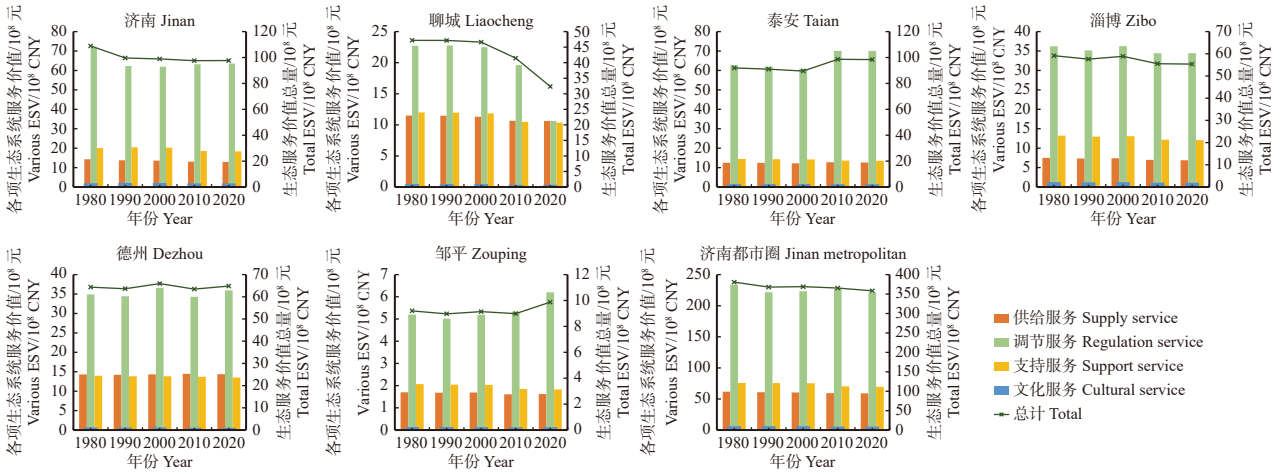


图 5　济南都市圈及其各城市生态系统服务价值变化过程

Fig. 5　ESV change process of 6 cities and Jinan metropolitan area

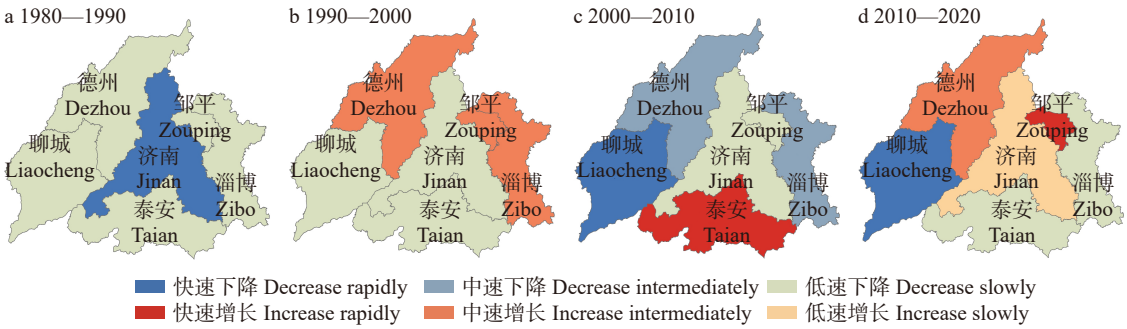


图 6　济南都市圈生态系统服务价值变化率

Fig. 6　Change rate of ecosystem service values in Jinan metropolitan area

提升。

3.3 都市圈生态系统权衡与协同效应

基于生态系统权衡协同度的计算，测度济南都市圈中各等级城市的生态系统服务权衡与协同关系。4 个等级城市的 55 组权衡协同度计算结果如图 7 所示。其中，特大城市权衡协同度计算结果中 28 组为负值，协同关系占 49.1%，权衡关系占 50.9%；大城市、中等城市、小城市权衡协同度计算结果中各有 30 组为负值，协同关系占 45.5%，权衡关系占 54.5%。济南都市圈整体生态系统服务的协同关系占比略低于权衡关系，反映出权衡效应大于协同效应。

特大城市协同关系主要体现在水资源供给与气候调节以及维持养分循环与食品生产、原材料生产、气体调节、土壤保持之间，其余各生态系统服务功能协同度差异不大。大城市、中等城市与小城市协同关系所占比重一致，水文调节与生物多样性以及美学景观之间均表现为较高的协同水平，且在中等城市与小城市生态系统中表现尤为明显。此外，大城市生态系统中气候调节与食物生产、原材料生产、气体调节之间呈现出高协同度。中等城市以及小城市生态系统中维持养分循环与食物生产、原材料生产、气体调节以及土壤保持之间也呈现较高的协同程度。

各等级城市生态系统中水文调节与维持养分循环之间均表现出显著的权衡关系，其中特大城市权衡度最大，主要原因该区域水资源较为短缺，城市发展导致用水量骤增而引发地下水超采，随着节水保水相关措施的实施，水文调节能力增强，地下水得到回补，但因鲁中地区分布有可溶性灰岩与厚层石灰岩，地下水难以下渗而会以泉水形式出露地表，因而不利于维持养分循环。

3.4 城镇扩张对生态系统服务的影响

本研究采用 GTWR 模型从空间层面上量化分析济南都市圈各城市城镇扩张对生态系统服务价值变化的影响。以城镇扩张强度指数为解释变量，4 个

a 特大城市 Megalopolis

FP	1.817 7	−0.231 7	1.104 2	−1.405 7	−0.441 3	−0.016 7	0.653 6	5.967 4	0.469 3	0.913 0
1.817 7	RMP	−0.127 4	0.607 5	−0.773 3	−0.242 8	−0.009 2	0.359 6	3.282 9	0.502 3	0.502 3
−0.231 7	−0.127 4	WRS	−4.766 4	6.067 8	1.905 0	0.071 9	−2.821 4	−25.758 6	−2.025 7	−3.941 1
1.104 2	0.607 5	−4.766 4	GR	−1.273 0	−0.399 7	−0.015 1	0.591 9	5.404 2	0.425 0	0.826 8
−1.405 7	−0.773 3	6.067 8	−1.273 0	CR	0.313 9	0.011 8	−0.465 0	−4.245 1	−0.333 8	−0.649 5
−0.441 3	−0.242 8	1.905 0	−0.399 7	0.313 9	EP	0.037 7	−1.481 1	−13.521 8	−1.063 4	−2.068 8
−0.016 7	−0.009 2	0.071 9	−0.015 1	0.011 8	0.037 7	HR	−39.250 1	−358.340 2	−28.180 6	−54.825 9
0.653 6	0.359 6	−2.821 4	0.591 9	−0.465 0	−1.481 1	−39.250 1	SC	9.129 7	0.718 0	1.396 8
5.967 4	3.282 9	−25.758 6	5.404 2	−4.245 1	−13.521 8	−358.340 2	9.129 7	NCM	0.078 6	0.153 0
0.469 3	0.258 2	−2.025 7	0.425 0	−0.333 8	−1.063 4	−28.180 6	0.718 0	0.078 6	MB	1.945 5
0.913 0	0.502 3	−3.941 1	0.826 8	−0.649 5	−2.068 8	−54.825 9	1.396 8	0.153 0	1.945 5	ALS

b 大城市 Metropolis

FP	2.030 8	−0.536 8	1.178 0	69.345 4	−0.755 6	−0.047 2	0.921 7	7.057 6	−0.593 7	−1.257 8
2.030 8	RMP	−0.264 3	0.580 0	34.146 0	−0.372 1	−0.023 3	0.453 8	3.475 2	−0.619 3	−0.619 3
−0.536 8	−0.264 3	WRS	−2.194 5	−129.186 2	1.407 7	0.088 0	−1.717 0	−13.147 8	1.106 1	2.343 2
1.178 0	0.580 0	−2.194 5	GR	58.867 9	−0.641 5	−0.040 1	0.782 4	5.991 2	−0.504 0	−1.067 7
69.345 4	34.146 0	−129.186 2	58.867 9	CR	−0.010 9	−0.000 7	0.013 3	0.101 8	−0.008 6	−0.018 1
−0.755 6	−0.372 1	1.407 7	−0.641 5	−0.010 9	EP	0.062 5	−1.219 7	−9.339 8	0.785 7	1.664 5
−0.047 2	−0.023 3	0.088 0	−0.040 1	−0.000 7	0.062 5	HR	−19.507 4	−149.377 3	12.566 8	26.621 9
0.921 7	0.453 8	−1.717 0	0.782 4	0.013 3	−1.219 7	−19.507 4	SC	7.657 5	−0.644 2	−1.364 7
7.057 6	3.475 2	−13.147 8	5.991 2	0.101 8	−9.339 8	−149.377 3	7.657 5	NCM	−0.084 1	−0.178 2
−0.593 7	−0.292 4	1.106 1	−0.504 0	−0.008 6	0.785 7	12.566 8	−0.644 2	−0.084 1	MB	2.118 4
−1.257 8	−0.619 3	2.343 2	−1.067 7	−0.018 1	1.664 5	26.621 9	−1.364 7	−0.178 2	2.118 4	ALS

c 中等城市 Medium-sized city

FP	2.233 1	−0.694 0	1.564 3	−4.432 1	−1.077 7	−0.061 4	0.980 8	7.273 6	−1.642 9	−2.318 3
2.233 1	RMP	−0.310 8	0.700 5	−1.984 8	−0.482 6	−0.027 5	0.439 2	3.257 2	−1.038 2	−1.038 2
−0.694 0	−0.310 8	WRS	−2.254 0	6.386 4	1.552 9	0.088 4	−1.413 3	−10.480 8	2.367 4	3.340 5
1.564 3	0.700 5	−2.254 0	GR	−2.833 3	−0.688 9	−0.039 2	0.627 0	4.649 8	−1.050 3	−1.482 0
−4.432 1	−1.984 8	6.386 4	−2.833 3	CR	0.243 2	0.013 8	−0.221 3	−1.641 1	0.370 7	0.523 1
−1.077 7	−0.482 6	1.552 9	−0.688 9	0.243 2	EP	0.056 9	−0.910 1	−6.749 2	1.524 5	2.151 2
−0.061 4	−0.027 5	0.088 4	−0.039 2	0.013 8	0.056 9	HR	−15.981 5	−118.519 8	26.770 8	37.775 7
0.980 8	0.439 2	−1.413 3	0.627 0	−0.221 3	−0.910 1	−15.981 5	SC	7.416 1	−1.675 1	−2.363 7
7.273 6	3.257 2	−10.480 8	4.649 8	−1.641 1	−6.749 2	−118.519 8	7.416 1	NCM	−0.225 9	−0.318 7
−1.642 9	−0.735 7	2.367 4	−1.050 3	0.370 7	1.524 5	26.770 8	−1.675 1	−0.225 9	MB	1.411 1
−2.318 3	−1.038 2	3.340 5	−1.482 0	0.523 1	2.151 2	37.775 7	−2.363 7	−0.318 7	1.411 1	ALS

d 小城市 Small city

FP	2.368 9	−0.411 0	2.552 4	−0.799 4	−0.546 3	−0.0335	1.2418	8.074 4	−0.866 1	−1.326 1
2.368 9	RMP	−0.173 5	1.077 5	−0.337 5	−0.230 6	−0.0142	0.5242	3.408 5	−0.559 8	−0.559 8
−0.411 0	−0.173 5	WRS	−6.210 9	1.945 3	1.329 5	0.081 6	−3.021 8	−19.647 9	2.107 5	3.226 9
2.552 4	1.077 5	−6.210 9	GR	−0.313 2	−0.214 1	−0.013 1	0.486 5	3.163 5	−0.339 3	−0.519 6
−0.799 4	−0.337 5	1.945 3	−0.313 2	CR	0.683 4	0.041 9	−1.553 4	−10.100 1	1.083 4	1.658 8
−0.546 3	−0.230 6	1.329 5	−0.214 1	0.683 4	EP	0.061 4	−2.272 9	−14.778 8	1.585 3	2.427 2
−0.033 5	−0.014 2	0.081 6	−0.013 1	0.041 9	0.061 4	HR	−37.029 1	−240.765 7	25.826 0	39.542 2
1.241 8	0.524 2	−3.021 8	0.486 5	−1.553 4	−2.272 9	−37.029 1	SC	6.502 1	−0.697 5	−1.067 9
8.074 4	3.408 5	−19.647 9	3.163 5	−10.100 1	−14.778 8	−240.765 7	6.502 1	NCM	−0.107 3	−0.164 2
−0.866 1	−0.365 6	2.107 5	−0.339 3	1.083 4	1.585 3	25.826 0	−0.697 5	−0.107 3	MB	1.531 1
−1.326 1	−0.559 8	3.226 9	−0.519 6	1.658 8	2.427 2	39.542 2	−1.067 9	−0.164 2	1.531 1	ALS

协同关系 Synergy　　权衡关系 Tradeoff

图 7　不同等级城市生态系统服务权衡与协同关系

Fig. 7　Tradeoffs and synergies of ecosystem services of multiple level cities

时段的生态系统价值总量变化率、供给服务变化率、调节服务变化率、支持服务变化率、文化服务变化率为被解释变量，进行 OLS 回归、GWR 回归、GTWR 回归，对比 3 种模型的拟合结果(表 4)。经统计，相较于 OLS、GWR 模型，GTWR 模型检验的拟合度更大，残差平方和更小，能更加有效地解释济南都市圈城镇扩张对生态系统服务价值变化的影响与时空异质性特征。

对 GTWR 回归系数进行可视化，将整个研究期限内供给服务、调节服务、支持服务、文化服务、生态系统服务总量变化率的回归系数依据自然断裂点法分级，负向驱动作用依据驱动强度由强至弱依次划分为负向强影响、负向较强影响、负向中等影响、负向较弱影响以及负向弱影响；正向驱动作用依据驱动力由强至弱依次划分为正向强影响、正向较强影响、正向中等影响、正向较弱影响以及正向弱影响，结果如图 8 所示。

济南都市圈城镇扩张指数与生态系统服务总量变化率的回归系数全部为负数，表明随着城市扩张强度增大，都市圈内各城市的生态系统总服务价值变化率减小，城市扩张对生态系统服务价值具有负面影响。随着时间的推进，回归系数绝对值逐渐降低，说明城市扩张的负面影响有所下降。

城市扩张对不同类型生态系统服务价值的驱动

表 4　OLS、GWR、GTWR 模型拟合结果对比

Tab. 4　Model fitting result comparison of OLS, GWR and GTWR

类别 Type	R^2			残差平方和 Residual sum of squares (RSS)		
	OLS	GWR	GTWR	OLS	GWR	GTWR
供给服务 Supply service	0.204	0.247	0.951	0.596	0.588	0.038
调节服务 Regulation service	0.018	0.062	0.873	0.735	0.733	0.099
支持服务 Support service	0.721	0.869	0.987	0.209	0.103	0.010
文化服务 Cultural service	0.331	0.547	0.947	0.501	0.354	0.041
ESV总量 Total ESV	0.001	0.159	0.807	0.861	0.749	0.172

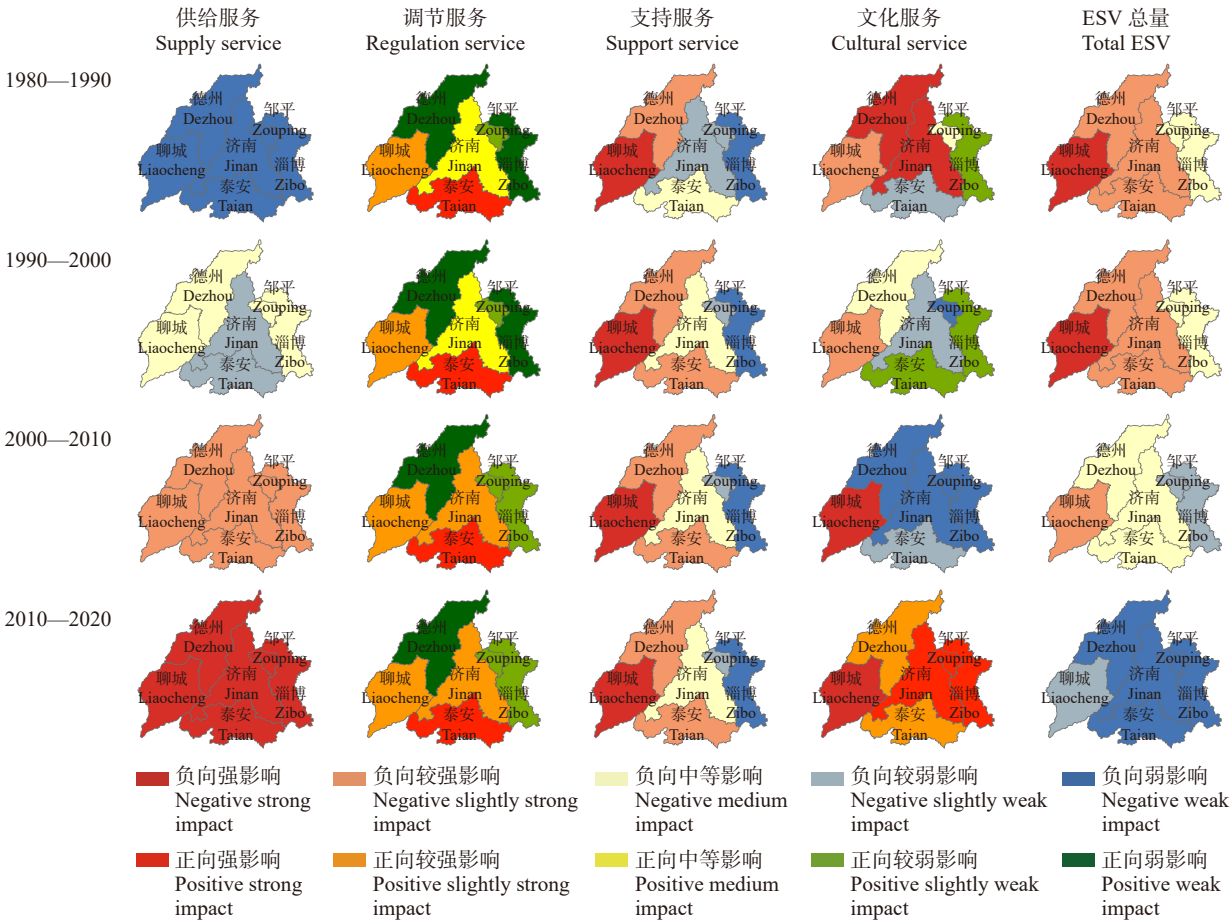


图 8　济南都市圈城镇扩张强度对生态系统服务价值时空响应

Fig. 8　Spatiotemporal response of urban expansion intensity to ESV in Jinan metropolitan area

影响具有明显差异。具体来看，城市扩张对供给服务价值量具有显著的负面影响且驱动强度不断增强，2010 年后对整个都市圈的供给服务变化均呈现出负向强驱动作用。研究区域内各城市供给服务价值量整体呈下降态势，变化率为负值，供给服务价值量变化率随城镇扩张强度指数的增加而下降反映出供给服务受城市扩张的负面影响不断增大，主要原因是城市扩张侵占了耕地、林地、草地等提供供给服务的重要用地，加速了供给服务价值量的下降。城市扩张对各城市调节服务具有正向驱动作用，时间维度上整体驱动强度变化不大，泰安市、济南市部分地区位于鲁中山区，地形起伏较大，生态系统敏感性较高，调节服务价值量对城镇扩张的响应度较高。各城市 UEII 指数对支持服务变化率的回归系数为负，说明城市扩张对各城市支持服务的变化起负向驱动作用，其中济南市 1990 年前后城市扩张对支持服务的负向驱动强度明显增加，原因是 1990 之前，济南市支持服务价值量有所增加，变化率为正，1990 年后，济南市支持服务价值量持续下降，变化率转为负值，下降速率的增加导致变化率数值的减小与城镇扩张强度指数的增加形成负相关关系。20 世纪 90 年代末期，济南市开始推行一系列“节水保泉”行动缓解地下水超采与水资源短缺的危机，有效恢复与保护了泉水系统，但泉水的喷涌会带走部分土壤养分，不利于维持养分循环价值量的提升，因此 1990 年后支持服务变化率由正转负，价值量有所下降。城镇扩张对各城市文化服务变化具有两极化驱动效应。2000—2010 年间都市圈内各城市进入高速发展期，城市与自然之间的冲突与矛盾加剧，城市扩展强度对文化服务变化起到抑制作用；2010 年后，随着生态文明建设的不断推进，生态空间得到恢复与改善，济南市、邹平市、淄博市等地文化服务下降速度明显降低，城市扩张对文化服务变化率转为正向强驱动。

4 讨论与结论

4.1 讨 论

4.1.1 与相关研究成果的比较

本研究基于城镇扩展指数与生态系统服务价值计算，分析了济南都市圈城市扩张对生态系统服务的影响。2000 年后济南都市圈生态系统服务总量下降，与谷瑞丽等[48]对山东半岛城市群生态系统服务分析结果一致。各亚类生态系统服务功能占比由高到低依次为调节服务、支持服务、供给服务、文化服务，其中调节服务对 ESV 价值贡献率明显高于其他，与张凯莉等[49]对黄河流域各亚类生态系统服务价值的分析一致。在已有关于城镇扩张对生态系统服务研究中，周晓艳等[25]对长江经济带生态系统服务价值对城镇扩张时空响应研究表明城镇扩张对生态系统的供给服务、调节服务、支持服务和总服务的价值量均产生负面影响。本文分析结果则表明，城市扩张对都市圈整体生态系统服务具有负面影响，但各城市城镇空间的扩张对不同亚类生态系统价值量变化的驱动力呈现显著的时空分异特征，应基于该时空分异特征分级施策。此外，通过对 GTWR 回归系数对比分析发现，泰安市以及济南市部分地区位于鲁中山区，生态系统较为敏感，对城市扩张的响应度较高，应加强对该区域生态空间的保护与提升，该结论与吕彦莹等[50]研究结果一致。

4.1.2 对于政策制定以及国土空间规划管控的启示

济南都市圈地貌类型丰富，分布有滩、河、林、草等多种自然资源，应结合自然条件针对不同主体功能区进行分区指导。城市建成区多分布在地势平坦区域，随着城市用地的不断扩张，边缘地区生态系统服务价值下降明显。应加强建成区内土地利用的集约化，优化用地结构，整合与提升边缘区破碎化程度较高、质量较差的生态斑块，从而减弱城市扩张对整体生态系统服务功能的影响。黄河干流、东平湖及周边地区是河渠、湖泊以及滩地、湿地、沼泽等水域生态空间集中分布区域，是提升生态系统服务的关键区域，在城市发展过程中应注重对水域、湿地等生态空间的保护，加大对黄河沿岸及水库周边地区环境整治力度，完善缓冲区与防护林带，构建水生态格局。鲁中山区是林地、草地集中分布地区，是都市圈生态系统的重要构成，应关注该地区生态本底的修复与生态安全格局的构建，提升区域生态韧性。此外，应加强自然保护地和生态保护红线监督管理，并建立生态保护补偿机制，坚守自然生态安全边界。

都市圈内不同等级城市生态系统服务对城市扩张的响应程度不同，应结合城市的发展规律分级施策。特大城市济南市域内广泛分布有泉水系统，水文调节能力与维持养分循环能力两项生态系统服务功能之间的矛盾较为突出，应适当增加植被覆盖度，加强土壤对养分的吸收与利用。随着北部新旧动能转换起步区的获批与建设，济南市沿黄河地区以及黄河北部地区迎来新的发展机遇，在拥河发展新格局下，应加大沿黄河地区湿地恢复与水系网络的构建，结合沿河防护林带与城市绿廊营建体系化、整体化的绿色空间网络，实现生态系统服务功能的内部协调与整体提升。大城市中水文调节与气候调节与多项亚类服务功能之间具有协同关系，应加强雨洪管理、完善绿地系统结构，充分发挥绿色空间在水文

调节、气候调节方面的作用，缓解并改善生态系统服务功能的劣化态势。中等城市中城市扩张对生态系统服务的影响与大城市具有一致性，但 2010 年后其城市扩张强度显著增加，应加强对城市边缘地区生态空间的管控。此外，应充分发挥中等城市在供给服务方面的优势，优化生产空间的布局与结构。近 20 年间，小城市邹平发展迅速，城市扩张强度指数持续较高，应关注建成区空间结构的优化，减少对耕地、林地、草地等生态空间的破坏与侵占，丰富物种多样性、提升水源涵养能力，关注维持养分循环、水文调节等于其他项亚类具有较高协同度生态系统服务功能的提升。

济南是山东省国土空间“一群两心三圈”区域发展总体布局的“两心”之一，以济南为核心的都市圈的构建能够发挥龙头城市的辐射带动作用并推动区域整体发展，其城镇空间与生态空间的科学布局与优化对区域高质量发展具有重要影响。都市圈生态系统服务价值的测度与权衡协同分析可以为区域内国土空间规划“双评价”提供参考。济南及周边地区依托山水环境形成了“一屏一带、多廊多点”的生态空间格局，应结合生态系统服务价值时空分布特征进一步优化廊道与重要生态节点的空间分布，提升生态空间的连贯性与完整性。不同等级城市生态系统服务对城镇扩张的响应程度具有显著时空差异性，在三生空间的布局优化与分类管控过程中应结合主体功能区与各等级城市发展规律进行分区施策、分类发展，提高空间规划的靶向性与落地性。

4.1.3　局限性与不足

本研究仅基于城市尺度对城市扩张、生态系统服务变化以及二者之间的驱动关系变化进行分析。不同空间尺度、时间尺度会影响城市扩张与生态服务变化的时空演进特征分析，进而影响二者之间驱动关系的研判。未来研究中可尝试更加精细化的研究方法，选择多粒度的数据进一步探究城市扩张对生态系统服务价值的影响。此外，本研究中对城市生态系统服务功能评价方法为当量因子法，直接输出结果为货币价值，只能简化估算生态系统服务总量及各亚类服务量，缺乏对生态系统过程的关注，后续研究中可考虑采用 InVEST 等物质量评价模型进行更加精准的计算与分析。

4.2　结　论

本文基于 1980、1990、2000、2010、2020 年 5 期土地利用数据，定量测度与分析济南都市圈城市扩张与生态功能服务功能时空演进过程，通过计算城镇扩展指数描述各城市扩张的速度与强度，采用生态系统服务当量因子法多角度刻画研究区生态系统服务的时空分异特征，运用 GTWR 模型探究城市扩张对生态系统服务功能总量及各亚类价值量变化的驱动特征与驱动强度，得到以下主要结论。

（1）1980—2020 年间，济南都市圈内城市圈层式扩张显著，表现出时序阶段性与区域分异性两方面特征。都市圈内各城市在 2000—2010 年间大幅度扩张，各城市单元城镇扩展强度指数均达到最大值，城镇空间骨架迅速拉开，部分地区呈现出沿河或沿重要交通线路轴向扩展趋势，区域一体化趋势不断增强。40 年间，城镇空间扩展速率与强度由高到低依次为小城市、大城市、特大城市、中等城市。其中，大城市与特大城市在研究初期扩张较快；2000 年后，中等城市与小城市扩张速率明显加快，扩张速度与强度不断赶超其他等级城市。快速增长区域由特大城市、大城市向中等城市、小城市转移的同时，其他城市与中心城市济南之间的过渡地区城镇空间明显增加，该变化过程反映出都市圈内城镇空间扩张具有空间溢出特性，特大城市与大城市能够带动与辐射周边地区，实现区域整体发展。城镇扩张区域中增加的建设用地主要来自于耕地。40 年间，耕地在流转用地中占比先降后升，水域占比在 1990—2010 年间明显增加，但 2010 年后逐渐回落，在城镇空间格局优化应加强对重要生产空间的保护。

（2）都市圈内生态系统服务价值与变化率时空分异显著，黄河干流、东平湖一带以及鲁中山区是 ESV 价值量较高的区域。都市圈整体生态服务价值量呈逐年下降趋势，各亚类服务价值中，调节服务价值量占绝对优势，其变化对整体价值量变化趋势与变化率起决定作用。

都市圈中特大型城市 ESV 价值总量在研究初期下降显著，1990 年后趋于稳定。除泰安市外，济南都市圈内大城市 ESV 价值总量在研究期限内呈现不同程度的劣化态势，2000 年后下降幅度增大。泰安市自 2013 年起提出“生态立市”战略后，区域生态环境明显改善，生态系统服务能力稳步提升。中等城市德州地势平坦，是重要的粮食生产基地，其生态系统供给服务占比高于其他等级城市，ESV 价值总量在波动变化中小幅度提升。小城市邹平 ESV 提升幅度最大，随着环境监管与生态修复力度的加大，2010 年后生态系统服务能力显著提升。都市圈内生态系统协同关系占略低于权衡关系，特大城市协同关系占比高于大城市、中等城市以及小城市。水文调节、气候调节、维持养分循环与其他亚类服务功能之间多具有协同关系，权衡关系主要出现在水文调节与维持养分循环之间，应多关注水文调节在权衡协同关系中的多样性。

（3）1980—2020 年间，济南都市圈内城市扩张对生态系统服务价值整体具有负面影响。随着一系列环境治理与生态保护政策的推行，区域生态系统得到恢复和改善，对城市扩张干扰的抵抗力有所增强，生态系统服务价值对城市扩张的负面响应强度呈现出下降趋势。在供给服务方面，城市扩张不断侵占耕地、林地、草地等重要生态空间，对各城市供给服务价值量变化具有显著的负面影响且驱动强度不断增强。在调节服务方面，城市扩张具有正向作用且影响力整体变化不大。在支持服务方面，城市扩张对支持服务价值量变化具有负向驱动作用，受自然条件与节水政策的影响，济南市 1990 年前后支持服务对城市扩张负向响应强度明显增加。在文化服务方面，城市扩张对文化服务价值量变化的影响呈两极化，2010 年后，随着生态文明建设的不断推进，济南市、邹平市、淄博市等地生态空间得到修复与改善，城市扩张对文化服务变化率的影响逐渐由负向驱动转为正向强驱动。

参 考 文 献

[1] 张伟. 都市圈的概念、特征及其规划探讨[J]. 城市规划, 2003(6): 47−50.
Zhang W. The basic concept, characteristics and planning of metropolitan regions in Jiangsu[J]. City Planning Review, 2003(6): 47−50.

[2] 张从果, 杨永春. 都市圈概念辨析[J]. 城市规划, 2007(4): 31−36, 47.
Zhang C G, Yang Y C. Concept analysis of metropolitan coordinating region[J]. City Planning Review, 2007(4): 31−36, 47.

[3] 杨永春, 赵懋源, 贾卓, 等. 高原型西宁都市圈绿色发展规划研究[J]. 地域研究与开发, 2022, 41(5): 56−62.
Yang Y C, Zhao M Y, Jia Z, et al. Study on green development planning of plateau Xining metropolitan area[J]. Areal Research and Development, 2022, 41(5): 56−62.

[4] 王振坡, 宋嘉卓, 王丽艳, 等. 新型城乡关系下中国都市圈发展的驱动机制[J]. 城市发展研究, 2022, 29(3): 53−62.
Wang Z P, Song J Z, Wang L Y, et al. A study on driving mechanisms of China's metropolitan area development under new urban-rural relationships[J]. Urban Development Studies, 2022, 29(3): 53−62.

[5] 邵明, 董宇翔, 林辰松. 基于 GWR 模型的成渝城市群生态系统服务时空演变及驱动因素研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 118−129.
Shao M, Dong Y X, Lin C S. Spatio-temporal evolution and driving factors of ecosystem services in Chengdu-Chongqing urban agglomeration of southwestern China based on GWR model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 118−129.

[6] 廖凌云, 傅田琪, 吴涌平, 等. 基于生态系统服务评估的市域自然保护地体系优化: 以福州市为例[J]. 风景园林, 2022, 29(7): 80−85.
Liao L Y, Fu T Q, Wu Y P, et al. Optimization of municipal protected area system based on ecosystem services assessment: a case study of Fuzhou City[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(7): 80−85.

[7] 李方正, 刘阳, 施瑶, 等. 基于生态系统服务功能模拟演算的绿色空间规划框架: 以北京市浅山区为例[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 125−136.
Li F Z, Liu Y, Shi Y, et al. Construction of green space planning framework based on ecosystem service function simulation: a case study of shallow mountain area in Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11): 125−136.

[8] Graca M, Alves P, Goncalves J, et al. Assessing how green space types affect ecosystem services delivery in Porto, Portugal[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 170: 195−208.

[9] 施瑶, 李嘉艺, 高娜, 等. 气候变化背景下北京浅山区社会−生态系统脆弱性评估[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(4): 132−141.
Shi Y, Li J Y, Gao N, et al. Assessment on socio-ecosystem vulnerability in shallow mountain area of Beijing under climate change background[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(4): 132−141.

[10] 姜芊孜, 梁雪原. 北方城市河流生态系统服务供需评价与优化: 以济南市兴济河为例[J]. 南方建筑, 2022(8): 73−83.
Jiang Q Z, Liang X Y. Evaluation and optimization of urban river ecosystem service supply and demands in northern China: a case study based on the Xingji River in Jinan[J]. South Architecture, 2022(8): 73−83.

[11] 吴隽宇, 江伟康, 黄钰婷. 粤港澳大湾区生态系统服务价值时空演变研究[J]. 南方建筑, 2022(6): 52−61.
Wu J Y, Jiang W K, Huang Y T. Spatial-temporal changes of ecosystem service value in the Guangdong-Hongkong-Macao greater bay area[J]. South Architecture, 2022(6): 52−61.

[12] 艾昕, 兰亦阳, 郑曦. 基于生态系统服务协同增益的城市生态空间区划研究: 以北京市生态涵养区为例[J]. 风景园林, 2020, 27(11): 82−89.
Ai X, Lan Y Y, Zheng X. Urban ecological space zoning planning based on ecosystem services synergy gains: a case study of ecological conservation area of Beijing[J]. Landscape Architecture, 2020, 27(11): 82−89.

[13] 岳邦瑞, 钱芝弘. 生态系统服务权衡与协同机制及其在景观规划中的应用[J]. 风景园林, 2022, 29(10): 20−25.
Yue B R, Qian Z H. Formation mechanism of trade-offs and synergies between ecosystem services and application in landscape planning[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(10): 20−25.

[14] Chen H, Yan W T, Li Z H, et al. Spatial patterns of associations among ecosystem services across different spatial scales in metropolitan areas: a case study of Shanghai, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108682.

[15] 刘颂, 董宇翔, 蒋理, 等. 基于生态系统服务协同优化的生态空间划定及弹性分级策略: 以山东省栖霞市为例[J]. 风景园林, 2022, 29(8): 86−92.
Liu S, Dong Y X, Jiang L, et al. Strategy for demarcation and elastic grading of ecological space based on synergistic optimization of ecosystem services: a case study of Qixia City in

Shandong Province[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(8): 86−92.

[16] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, et al. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 662: 824−833.

[17] 李嘉译, 匡鸿海, 谭超, 等. 长江经济带城市扩张的时空特征与生态响应[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2153−2161.
Li J Y, Kuang H H, Tan C, et al. Spatio-temporal characteristics and ecological response of urban expansion in the Yangtze River Economic Zone[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10): 2153−2161.

[18] Liu S, Yang M, Mou Y, et al. Effect of urbanization on ecosystem service values in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration of China from 2000 to 2014[J]. Sustainability, 2020, 12(24): 10233.

[19] 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.
Chen W X, Liu Z L, Li J F, et al. Mapping the spatial relationship between ecosystem services and urbanization in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomerations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5137−5150.

[20] Sun X, Crittenden J C, Li F, et al. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta metropolitan area, USA[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622−623: 974.

[21] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以长株潭城市群为例[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 93−102.
Ouyang X, He Q Y, Zhu X. Simulation of impacts of urban agglomeration land use change on ecosystem services value under multi-scenarios: case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2020, 40(1): 93−102.

[22] 乔旭宁, 石漪澜, 郭静, 等. 郑州都市圈不同等级城镇扩张对生态系统服务的影响研究[J]. 地理研究, 2022, 41(7): 1913−1931.
Qiao X N, Shi Y L, Guo J, et al. Impacts of urban expansion on ecosystem services in different size cities of Zhengzhou metropolitan area[J]. Geographical Research, 2022, 41(7): 1913−1931.

[23] 朱晓南, 刘艳中, 汪樱, 等. 武汉市生态系统服务功能对城市用地扩张的响应机理[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1515−1524.
Zhu X N, Liu Y Z, Wang Y, et al. Response mechanism of ecosystem service function to urban land expansion process in Wuhan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(7): 1515−1524.

[24] Liu Y M, Xu N Y, Li Z J, et al. Differential impact of constructed land expansion on ecosystem health: a case study in the coastal region of the East China Sea[J]. Ecological Engineering, 2022, 180: 106665.

[25] 周晓艳, 王诗琪. 基于 GTWR 模型的长江经济带生态系统服务价值对城镇扩张的时空响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 300−307.
Zhou X Y, Wang S Q. Spatiotemporal response of ecosystem service values to urban expansion in the Yangtze River Economic Belt based on the GTWR model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 300−307.

[26] 邢宗海. 都市圈空间结构演化特征及调控机制: 以济南都市圈为例[J]. 城市发展研究, 2013, 20(5): 25−28.
Xing Z H. Evolution and regulation mechanism of the metropolitan spatial construction: a case study of Jinan Metropolitan Area[J]. Urban Development Studies, 2013, 20(5): 25−28.

[27] 倪艳亭, 崔雁冰. 基于改进 TOPSIS 法的济南都市圈城市创新能力空间分异研究[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(6): 63−67.
Ni Y T, Cui Y B. Spatial differentiation of urban innovation capability in jinan metropolitan circle based on improved TOPSIS method[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(6): 63−67.

[28] 刘瑞波, 张茜. 金融集聚、空间溢出与区域经济增长: 基于山东省“两圈四区”的经验数据[J]. 经济与管理评论, 2020, 36(4): 147−160.
Liu R B, Zhang X. Financial agglomeration, space spillover and regional economic growth: based on the empirical data of “Two Circles and Four Areas” in Shandong Province[J]. Review of Economy and Management, 2020, 36(4): 147−160.

[29] Qiao X Y, Meng Y C, Zhu X Y. Research on the hierarchical structure of the metropolitan system and economic development of the provincial capital urban circle in Shandong[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2015, 13(1): 78−86.

[30] 马交国, 张卫国, 宋昆. 行政区划调整导向下济南都市圈区域协调发展策略[J]. 规划师, 2020, 36(4): 5−12.
Ma J G, Zhang W G, Song K. Jinan provincial capital metropolitan area coordinated development plan with administrative adjustment[J]. Planners, 2020, 36(4): 5−12.

[31] Li K, Hou Y, Andersen P S, et al. An ecological perspective for understanding regional integration based on ecosystem service budgets, bundles, and flows: a case study of the Jinan metropolitan area in China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 305: 114371.

[32] 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(5): 911−919.
Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008(5): 911−919.

[33] 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.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243−1254.

[34] 李佳鸣, 冯长春. 基于土地利用变化的生态系统服务价值及其改善效果研究: 以内蒙古自治区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4741−4750.
Li J M, Feng C C. Ecosystem service values and ecological improvement based on land use change: a case study of the Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4741−4750.

[35] 关兴良, 方创琳, 周敏, 等. 武汉城市群城镇用地空间扩展时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1447−1459.
Guan X L, Fang C L, Zhou M, et al. Spatial and temporal characteristics of spatial expansion of urban land in Wuhan urban agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(9): 1447−1459.

[36] 王飞, 叶长盛, 华吉庆, 等. 南昌市城镇空间扩展与景观生态风险的耦合关系[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1248−1262.
Wang F, Ye C S, Hua J Q, et al. Coupling relationship between urban spatial expansion and landscape ecological risk in Nanchang City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1248−1262.

[37] 朱会义, 李秀彬, 何书金, 等. 环渤海地区土地利用的时空变化分析[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 253−260.
Zhu H Y, Li X B, He S J, et al. Spatio-temporal change of land use in Bohai Rim[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(3): 253−260.

[38] 邵明, 李方正. 城市生态空间生态系统服务功能权衡协同及管控研究: 以成都东部新城为例[J]. 风景园林, 2021, 28(7): 114−120.
Shao M, Li F Z. Research on trade-off and synergistic relationship of ecosystem service and space regulation in city ecological space: a case study of Chengdu Eastern New City[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(7): 114−120.

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

[40] 李鸿健, 任志远, 刘焱序, 等. 西北河谷盆地生态系统服务的权衡与协同分析: 以银川盆地为例[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1731−1738.
Li H J, Ren Z Y, Liu Y X, et al. Tradeoffs-synergies analysis among ecosystem services in northwestern valley basin: taking Yinchuan Basin as an example[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1731−1738.

[41] 姚礼堂, 张学斌, 周亮, 等. "山地−绿洲−荒漠"复合系统土地利用变化的生态系统服务权衡与协同效应: 以张掖市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(20): 8138−8151.
Yao L T, Zhang X B, Zhou L, et al. Ecosystem service tradeoffs and synergies effects of land use change in mountain-oasis-desert complex system: a case study of Zhangye City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8138−8151.

[42] 兰紫橙, 贾岚, 程煜. 闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 3909−3920.
Lan Z C, Jia L, Cheng Y. The ecosystem services evaluation and trade-off synergy in Min River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 3909−3920.

[43] 倪泽睿, 杨上广, 张全. 长三角地区生态系统供给服务价值评估及权衡协同分析[J]. 生态经济, 2021, 37(11): 150−155.
Ni Z R, Yang S G, Zhang Q. Evaluation, trade-off and synergy analysis of ecosystem supply service value in the Yangtze River Delta[J]. Ecological Economy, 2021, 37(11): 150−155.

[44] 王海军, 张彬, 刘耀林, 等. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析[J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1076−1092.
Wang H J, Zhang B, Liu Y L, et al. Multi-dimensional analysis of urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(6): 1076−1092.

[45] 沈杨, 汪聪聪, 高超, 等. 基于城市化的浙江省湾区经济带碳排放时空分布特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 329−342.
Shen Y, Wang C C, Gao C, et al. Spatio-temporal distribution and its influencing factors of carbon emissions in economic zone of Zhejiang Bay Area based on urbanization[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(2): 329−342.

[46] 吴小影, 杨山, 尹上岗, 等. 基于 GTWR 模型的长三角地区城市建设用地时空动态特征及其驱动机理[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11): 2594−2606.
Wu X Y, Yang S, Yin S G, et al. Spatial-temporal dynamic characteristics and its driving mechanism of urban built-up area in Yangtze River Delta based on GTWR model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(11): 2594−2606.

[47] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3−4): 383−401.

[48] 谷瑞丽, 多玲花, 邹自力, 等. 黄河下游城市群生态系统健康时空演变特征研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 285−292.
Gu R L, Duo L H, Zou Z L, et al. Spatial and temporal evolutionary characteristics of ecosystem health in the Lower Yellow River Urban Agglomeration[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 285−292.

[49] 张凯莉, 冯荣荣, 刘潭, 等. 黄河流域城市化与生态系统服务价值协调性及障碍因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1254−1267.
Zhang K L, Feng R R, Liu T, et al. Coordination and obstacle factors of urbanization and ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1254−1267.

[50] 吕彦莹, 王晓婷, 于新洋, 等. 山东省自然生态空间系统化识别与差异化管控研究[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 3010−3019.
Lü Y Y, Wang X T, Yu X Y, et al. Systematic identification and differential control of natural ecological space in Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 3010−3019.

(责任编辑 范 娟
责任编委 李 雄)