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

黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析

张初蕊 陈立欣 王丽群 宋午椰 阎祉

Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin

Zhang Churui, Chen Lixin, Wang Liqun, Song Wuye, Yan Zhiyi

引用本文:
张初蕊, 陈立欣, 王丽群, 宋午椰, 阎祉. 黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(6):70–81. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230226
Zhang Churui, Chen Lixin, Wang Liqun, Song Wuye, Yan Zhiyi. Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6):70–81. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230226

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230226

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

北京林业大学学报, 2024, 46(1): 104–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220489

黄河流域生态空间网络特征

Characteristics of spatial ecological network in the Yellow River Basin of northern China

北京林业大学学报, 2022, 44(12): 142–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210159

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

基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化

Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200272

森林生态系统服务多功能性：概念、指标和经营模拟模型

Forest ecosystem service multi–functionality: definitions, indicators and simulation models for forest management

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230327

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230226

黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析

张初蕊[1,2] 陈立欣[1,2] 王丽群[3] 宋午椰[1,2] 阎祉祎[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083；
3. 中咨集团生态技术研究所（北京）有限公司，北京 100089）

摘要:【目的】在黄河流域生态恢复背景下，研究生态系统服务价值（ESV）的时空动态演变特征及其驱动因素，为可持续发展提供理论参考。**【方法】**基于 2001—2020 年 20 期的黄河流域土地利用数据，计算黄河流域 ESV，利用空间自相关和探索性时空数据分析，揭示黄河流域 ESV 的时空分异动态特征，并引入时空地理加权回归模型探究黄河流域 ESV 时空分异的驱动因素。**【结果】**（1）2001—2020 年黄河流域 ESV 整体呈上升趋势，生态系统服务中调节服务价值所占比重最大。不同土地利用类型中，草地和林地所提供的生态服务价值最高。（2）黄河流域 ESV 空间上存在显著正相关。大多数地区，局部空间自相关指标时间路径的相对长度和弯曲度较小，结构比较稳定，但空间依赖效应较弱。ESV 移动方向中负向协同增长占比最大，呈低速增长特征。2001—2020 年 ESV 时空凝聚概率超过 80%，说明黄河流域 ESV 局部空间格局呈现相对锁定状态。（3）流域 ESV 驱动因素中，年降雨量主要起负向作用，年均气温和植被覆盖则主要起正向作用，而人口密度与夜间灯光指数的影响作用相对较弱。**【结论】**黄河流域 ESV 增长现状相对稳定，短期内较难改变，在影响 ESV 变化的因素中自然因素起主导作用。

关键词：黄河流域；生态系统服务价值；时空跃迁；时空地理加权回归；关键驱动因素
中图分类号：S714.7; S716; X826 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)06−0070−12
引文格式：张初蕊，陈立欣，王丽群，等. 黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析［J］. 北京林业大学学报，2024，46(6)：70−81. Zhang Churui, Chen Lixin, Wang Liqun, et al. Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 70−81.

Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin

Zhang Churui[1,2] Chen Lixin[1,2] Wang Liqun[3] Song Wuye[1,2] Yan Zhiyi[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, Beijing 100083, China;
3. China Consulting Group Ecological Technology Research Institute (Beijing) Co., Ltd, Beijing 100089, China)

Abstract: ［**Objective**］This paper aims to study the spatiotemporal dynamic evolution characteristics and driving factors of ecosystem service value (ESV) in the context of ecological restoration in the Yellow River Basin, and provide theoretical reference for sustainable development. ［**Method**］Based on the land use data of the Yellow River Basin from 2001 to 2020, the ESV of the Yellow River Basin was calculated. Spatial autocorrelation and exploratory spatiotemporal data analysis (ESTDA) were used to reveal the dynamic characteristics of spatiotemporal differentiation of ESV in the Yellow River Basin. The spatiotemporal geographic weighted regression (GTWR) model was introduced to explore the driving factors of spatiotemporal differentiation of ESV in the Yellow River Basin. ［**Result**］(1) From 2001 to 2020, the ESV of the Yellow River Basin showed an overall upward trend, and the value of regulation services accounted for the largest proportion of ecosystem services. Among different land use types, grassland and forest land

收稿日期: 2023−09−05 **修回日期:** 2024−01−02
基金项目: 国家重点研发计划（2022YFF1302501）。
第一作者: 张初蕊。主要研究方向：生态系统服务研究。Email：churui0228@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 陈立欣，副教授。主要研究方向：生态水文研究。Email：myclover17@126.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

provided the highest ecological service value. (2) There was a significant positive correlation in the spatial distribution of ESV in the Yellow River Basin. In most regions, the relative length and curvature of the local spatial autocorrelation index time path were relatively small, and the structure was relatively stable, but the spatial dependence effect was weak. The proportion of negative synergistic growth in the direction of ESV movement was the highest, showing a low-speed growth characteristics. The probability of spatiotemporal aggregation of ESV from 2001 to 2020 exceeded 80%, indicating that the local spatial pattern of ESV in the Yellow River Basin was in a relatively locked state. (3) Among the driving factors of watershed ESV, annual rainfall mainly played a negative role, while annual average temperature and vegetation cover mainly played a positive role, while the impact of population density and nighttime light index was relatively weak. [**Conclusion**] The current situation of ESV growth in the Yellow River Basin is relatively stable and difficult to change in the short term. Natural factors play a dominant role in influencing ESV changes.

Key words: the Yellow River Basin; ecosystem service value; spatiotemporal transition; spatiotemporal geographically weighted regression; key driving factor

黄河流域是我国重要的生态屏障，也是农业和资源供给的关键区域[1]，近 20 年来黄河流域的生态恢复得到了显著改善[2]。特别是自退耕还林还草工程实施以来，黄河流域上游水源涵养功能得到稳步提升，黄河流域中游 88.2% 面积植被恢复取得显著成效[3]，但生态环境问题尚未根本好转，林草覆盖率高的区域耗水已经接近水分承载力阈值[4]，存在生态系统退化，生态系统服务能力降低等现状，急需开展各项生态问题研究，为黄河流域生态保护和提高生态系统服务功能提供科学依据。

生态系统和生态过程是生态系统服务的载体，通过物质循环、能量流动以及信息传递等为人类社会提供必要的环境条件和物质基础。随着城市化的驱动土地利用有着显著的变化，进而影响着生态系统服务的供给。大量研究表明，生态系统服务价值（ecosystem service value，ESV）评估能够有效量化生态系统功能[5−6]。

不同的土地利用类型所提供的 ESV 必然是不同的，由此出现了 ESV 空间分布异质性[7]，对其量化评估可以直观得到生态系统服务在时间和空间上的供给差异来科学地为环境部门提供定量的生态环境信息，并制定针对性的管理措施。然而，目前大部分 ESV 的时空格局差异研究停留在了度量截面特征上。将时间进程与空间格局分离开，造成现有研究缺乏对区域 ESV 时空特征动态演变的分析。因此，对 ESV 的时间演变与空间异质性进行综合分析，可以更加精确揭示区域 ESV 分布的动态过程。Rey 等[8]提出的探索性时空数据分析（exploratory spatial temporal data analysis，ESTDA）方法实现了时间与空间的交互分析，即选择采用 ESTDA 中的 LISA 时间路径分析和时空跃迁分析方法，基于 ESV 地理空间关联，从时空耦合视角分析区域 ESV 的动态变化。

定量解释 ESV 异质性的驱动因素，探究多方面因素与 ESV 的关系，有利于资源合理规划和针对性的人为调配。驱动因素的常用研究方法有地理探测器[9−11]、地理加权回归[12−13]等方法，但这些方法没有将时间因素纳入模型中，基于此本文选取了时空地理加权回归模型，在地理加权回归模型的基础上，加入时间维度，实现从不同时空维度探究驱动因素[14−15]。吴小影等[16]通过 GTWR 模型分析了长三角地区城市建设用地扩展强度的驱动因素。王海军等[17]构建了重心—GTWR 模型分析了京津冀城市群城镇用地扩展格局及驱动力。

本研究旨在（1）评价黄河流域 2001—2020 年不同生态地类所提供 ESV，（2）分析黄河流域 ESV 的时空格局和动态性特征，（3）揭示 ESV 时空分异的驱动因素。研究结果可为优化黄河流域土地利用结构，实施有效的生态补偿政策提供科学依据。

1　研究方法与数据来源

1.1　研究区概况

黄河流域（96° ~ 119°E、32° ~ 42°N），总面积达到 79.5 万 km^2。流域内土地利用类型以草地、林地和耕地为主。2001—2020 年流域年均降水量 390 ~ 630 mm，年均气温 4.7 ~ 8.5 ℃，无霜期较短。地势整体西高东低，生态本底脆弱，水土流失、荒漠化等生态环境问题突出。本研究根据中国科学院资源环境科学数据中心的黄河流域区划边界。将黄河源地至内蒙古自治区河口镇定为上游，河口镇至河南省桃花峪定为中游，桃花峪至入海口定为下游[18]（图 1）。

1.2　数据来源

本研究土地利用数据集来源于 NASA 数据中心（https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/）2001—2020 年的 MCD12Q1 数据集，空间分辨率为 500 m × 500 m。

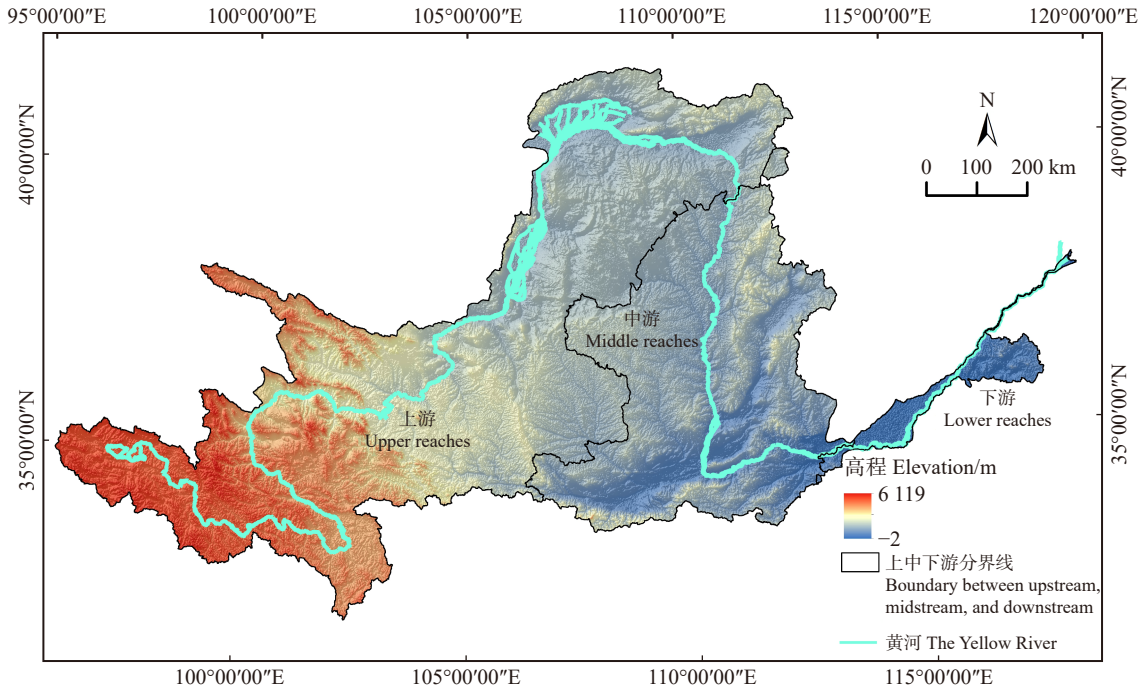


图 1 黄河流域概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River Basin

原始数据基于谢高地等[19]土地利用类型划分方法进行重分类，得到林地、灌木、草地、湿地、耕地、水域和城建及未利用地等七大类。农业数据集(研究区稻谷、小麦和玉米的播种面积以及单位面积净利润)来源于《中国统计年鉴 2020》和《全国农产品成本收益资料汇编 2020》。黄河流域边界数据、河流数据、高程数据、2001—2020 年 5 年一期气象数据和人口密度数据(1 km × 1 km)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)。NDVI 数据(1 km × 1 km)来源于 NASA 数据中心(https://search.earthdata.nasa.gov/search/)的 MOD13A3 数据集。夜间灯光数据(1 km × 1 km)来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值评估

本研究参考谢高地等[19]修订的 ESV 当量因子表，将单位面积(1 hm^2)的稻谷、小麦和玉米三大粮食的净利润作为 1 个标准单位生态系统服务价值当量因子(标准当量因子)的 ESV 量，为消除多年物价波动影响，本研究基于 2020 年成本收益计算[20]。由于谢高地等所建立的当量因子表未将城建用地纳入研究，所以本文未考虑建设用地及未利用地所提供的生态价值，本文中按 0 计算[10]。本研究根据黄河流域实际情况进行 ESV 系数确定。

$$D = S_r G_r + S_w G_w + S_c G_c \tag{1}$$

式中：D为 1 个标准当量因子的 ESV 量(元/hm^2)；S_r、S_w、S_c 代表研究区稻谷、小麦和玉米播种面积占 3 种作物播种总面积百分比。G_r、G_w、G_c 代表稻谷、小麦和玉米单位面积平均净利润。

$$\mathrm{ESV} = \sum A_k V_k \tag{2}$$

式中：ESV代表生态系统服务价值(元)；A_k为第k种土地利用类型面积(hm^2)；V_k为第k种土地利用类型单位面积的 ESV 系数(元/hm^2)。表 1 为黄河流域 ESV 系数。

1.3.2 生态贡献率

生态贡献率表示在某一时间段内，各土地利用类型产生的 ESV 变化量对区域总 ESV 变化量的影响大小，该指数反映区域 ESV 变化的主要贡献因子，具体公式参考文献 [21]。

1.3.3 ESV 空间聚集特征分析

空间自相关是较常用的评估空间聚集规律的方法，有效反映空间上某一单元的某一属性值与其相邻单元的空间相关程度。采用常用的全局 Moran's I 统计量，反映网格单元的空间相关性以及相关性大小[22]。

局部空间自相关指标(local indicators of spatial association，LISA)是从局部空间上判断聚合或离散情况，通过测度某一个单元的属性值与相邻单元的相关程度，来研究其空间聚集结构，进而分析动态的空间分异规律[23]。

1.3.4 探索性时空数据分析

LISA 时间路径是研究 Moran's I 散点图中研究

表 1　黄河流域生态系统服务价值系数　　元/hm^2

Tab. 1　Ecosystem service value (ESV) coefficients of the Yellow River Basin　　CNY/ha

服务类别 Service type	单项服务 Individual service	林地 Forest land	灌木林地 Shrub land	草地 Grassland	湿地 Wetland	耕地 Cropland	水域 Waters
供给服务 Provision service	食物生产 Food production	420.39	295.83	155.70	794.06	1 728.26	622.80
	原料生产 Material production	980.90	669.51	217.98	778.50	389.25	186.84
	水资源供给 Water resource supply	513.81	342.54	124.56	4 032.60	−2 039.66	8 143.06
调节服务 Regulating service	气体调节 Gas regulation	3 222.97	2 195.36	794.06	2 958.28	1 385.72	747.36
	气候调节 Climate regulation	9 653.34	6 586.07	2 086.37	5 605.16	731.79	2 210.93
	净化环境 Environmental purification	2 802.58	1 992.95	685.08	5 605.16	217.98	4 452.99
	水文调节 Hydrological regulation	6 009.98	5 215.92	1 525.85	37 725.87	2 335.49	85 151.78
支持服务 Supporting service	土壤保持 Soil conservation	3 923.61	2 678.02	965.33	3 596.65	809.63	731.79
	维持养分循环 Maintaining nutrient cycle	295.83	202.41	77.85	280.26	249.12	62.28
	生物多样性 Biodiversity	3 581.08	2 444.47	871.91	12 253.51	264.69	1 992.95
文化服务 Cultural service	美学景观 Aesthetic scenery	1 572.56	1 074.32	389.25	7 364.56	124.56	1 541.42
总计 Total		32 977.05	23 697.40	7 893.94	80 994.61	6 196.83	105 844.20

单元坐标随时间的变化发生的迁移特征。LISA 时间路径的几何特征主要包括相对长度、弯曲度以及移动方向[24−26]。

为进一步探究 ESV 在黄河流域各研究单元的空间关系演变，本研究在 LISA 时间路径分析基础上引入时空跃迁，将其划分为 Type0、Type1、Type2、Type3 等 4 种类型，同时 Rey 也提出了时空流变迁和时空凝聚，将其定义为研究时段内某跃迁类型数目与全域内跃迁总数的关系[26]。

1.3.5　时空地理加权回归模型

时空地理加权回归模型可以更有效地反映长时间跨度下的影响因子空间异质性[27]。关于驱动因子的选择，基于黄河流域生态环境和社会经济背景，重点考虑了自然因素、社会经济因素以及土地利用状况三大类。其中，自然环境方面选取年降雨量、年均气温和归一化植被指数。社会经济方面选取了人口密度和夜间灯光指数[28]。土地利用方面选取了景观数据中的斑块密度和蔓延度指数[29]。

2　结果与分析

2.1　ESV 时间演变

本文选取 2001、2005、2010、2015 和 2020 年的数据来分析 ESV 时间变化趋势。2001 年以来，黄河流域的 ESV 总体呈上升趋势(表 2，图 2a)，由 2001 年的 6 789.52 × 10^8 元增长到 2020 年的 7 134.48 × 10^8 元，总价值增长了 344.96 × 10^8 元。其中，增长幅度最大的时间段是 2005—2010 年，增幅为 1.67%，长幅最小的是 2010—2015 年，增幅为 0.63%，其余时间段增长速度较为相近，平均增幅为 1.45%。

过去 20 年间黄河流域提供最高 ESV 的是调节服务，平均占总 ESV 的比例为 66.97%，呈现上升的趋势。支持服务次之，平均占比为 23%，比例逐渐降低。供给服务和文化服务的占比较小且基本不变。单项生态系统服务中，气体调节、气候调节、水文调节和土壤保持构成了黄河流域 ESV 的主体部分，水资源供给对 ESV 产生负作用，且负作用逐渐增加。

虽然各地类单位面积所提供的 ESV(表 1)中，水域和湿地单位面积所提供的 ESV 最大，林地和灌木次之，草地和耕地的较少，但从黄河流域各类用地提供的 ESV(图 2a)来看，研究时段内，草地提供的 ESV 平均达到 4 495.62 亿元，平均占生态系统服务总价值的 64.60%。20 年间草地 ESV 占比由 67.93% 下降到 61.73%。林地提供的 ESV 平均 1 211.81 亿元，20 年间平均占总体的比例从 15.26% 上升到 19.27%，平均增长率为 7.37%。其余地类大致相似，占生态系统服务总价值的比例缓慢上升。

2001—2020 年黄河流域 ESV 变化贡献率见图 2b，各时段内，林地、草地和耕地均为 ESV 变化的主要贡献者。2001—2020 年黄河流域林地的生态贡献率最大，占到 ESV 变化的 44.50%，草地和耕地次之，

表 2 2001—2020 年黄河流域 ESV 变化 10^8 元

Tab. 2 Changes in ESV of the Yellow River Basin from 2001 to 2020 10^8 CNY

服务类别 Service type	单项服务 Individual service	2001		2005		2010		2015		2020	
		ESV	比例 Proportion/%	ESV	比例 Proportion/%	ESV	比例 Proportion/%	ESV	比例 Proportion/%	ESV	比例 Proportion/%
供给服务 Provision service	食物生产 Food production	350.13	5.16	365.16	5.31	373.72	5.35	379.38	5.40	383.28	5.37
	原料生产 Material production	214.50	3.16	218.57	3.18	222.55	3.19	224.26	3.19	227.33	3.19
	水资源供给 Water resource supply	−181.01	−2.67	−197.89	−2.88	−204.93	−2.93	−210.78	−3.00	−212.11	−2.97
调节服务 Regulating service	气体调节 Gas regulation	765.74	11.28	779.27	11.34	792.53	11.34	798.11	11.35	808.05	11.33
	气候调节 Climate regulation	1 638.88	24.14	1 651.97	24.04	1 677.24	24.01	1 683.77	23.95	1 708.39	23.95
	净化环境 Environmental purification	532.07	7.84	535.67	7.80	543.45	7.78	545.73	7.76	553.41	7.76
	水文调节 Hydrological regulation	1 600.55	23.57	1 633.02	23.76	1 667.12	23.86	1 684.68	23.96	1 713.89	24.02
支持服务 Supporting service	土壤保持 Soil conservation	807.13	11.89	815.81	11.87	827.98	11.85	831.87	11.83	842.40	11.81
	维持养分循环 Maintaining nutrient cycle	90.40	1.33	92.67	1.35	94.42	1.35	95.31	1.36	96.41	1.35
	生物多样性 Biodiversity	670.01	9.87	674.48	9.81	684.66	9.80	688.28	9.79	698.57	9.79
文化服务 Cultural service	美学景观 Aesthetic scenery	301.13	4.44	303.28	4.41	308.04	4.41	309.99	4.41	314.84	4.41
总计 Total		6 789.52	100.00	6 872.00	100.00	6 986.78	100.00	7 030.61	100.00	7 134.48	100.00
变化率 Rate of change/%				1.21		1.67		0.63		1.48	

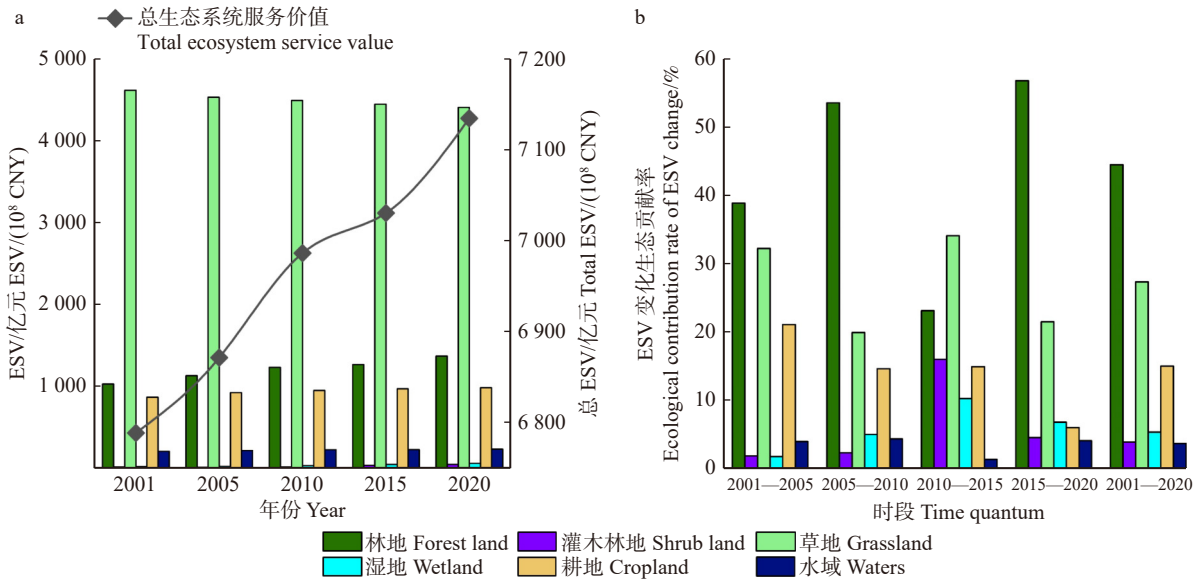


图 2 各地类提供生态系统服务价值(ESV)及各地类 ESV 变化生态贡献率

Fig. 2 Ecosystem service value (ESV) provided by different regions and ecological contribution rates of ESV changes in different regions

分别为 27.36% 和 15.06%。三者贡献率达 85% 以上，表明该 3 种地类的 ESV 变化量对黄河流域总 ESV 变化影响大，是主要的贡献因子。

2.2 ESV 空间特征

黄河流域 ESV 以处于 7 096.06 ~ 14 202.16 万元的中等区域为主(图 3f ~ j)，主要土地利用类型是

草地(图 3a ~ e), ESV 始终处于高值的区域是零星分布的湿地和水域地带(图 3f ~ j), 林地大范围分布的中游东南部地区 20 年间较大区域 ESV 由高值附近的较高值逐渐转变为高值区域(图 3f ~ j)。ESV 低值区域主要分布在中下游的耕地区域(图 3f ~ j)。

2.3　ESV 时空动态特征分析

2.3.1　ESV 空间自相关分析

黄河流域 ESV 的 Moran's *I* 值, 均显著大于 0 ($Z > 2.58$, $P < 0.01$), 且过去 20 年间呈波动式缓慢上升态势(表 3), 表明黄河流域 ESV 空间分布存在显著正相关性和空间聚集效应, 且 ESV 的空间聚集效应有逐渐增强的趋势, 在空间布局上表现为趋于较大范围聚集的特点, 空间相关性不断增大。

从 2001—2020 年 5 年一期黄河流域生态系统服务价值 LISA 空间分布(图 4)可以得到 4 种空间聚集类型, 即: 高—高(HH)、高—低(HL)、低—高(LH)、低—低(LL)分布。黄河流域"HH"和"LL"聚类分布较广, 约占黄河流域总面积的 20%。其中"HH"集中分布在中游的林地, "LL"集中分布在黄河流域北部、中游南部以及下游, 20 年间向外围扩大。"HH"和"LL"同时呈现大面积分布, 表明黄河流域部分区域的生态环境存在一定的不协调和不平衡。

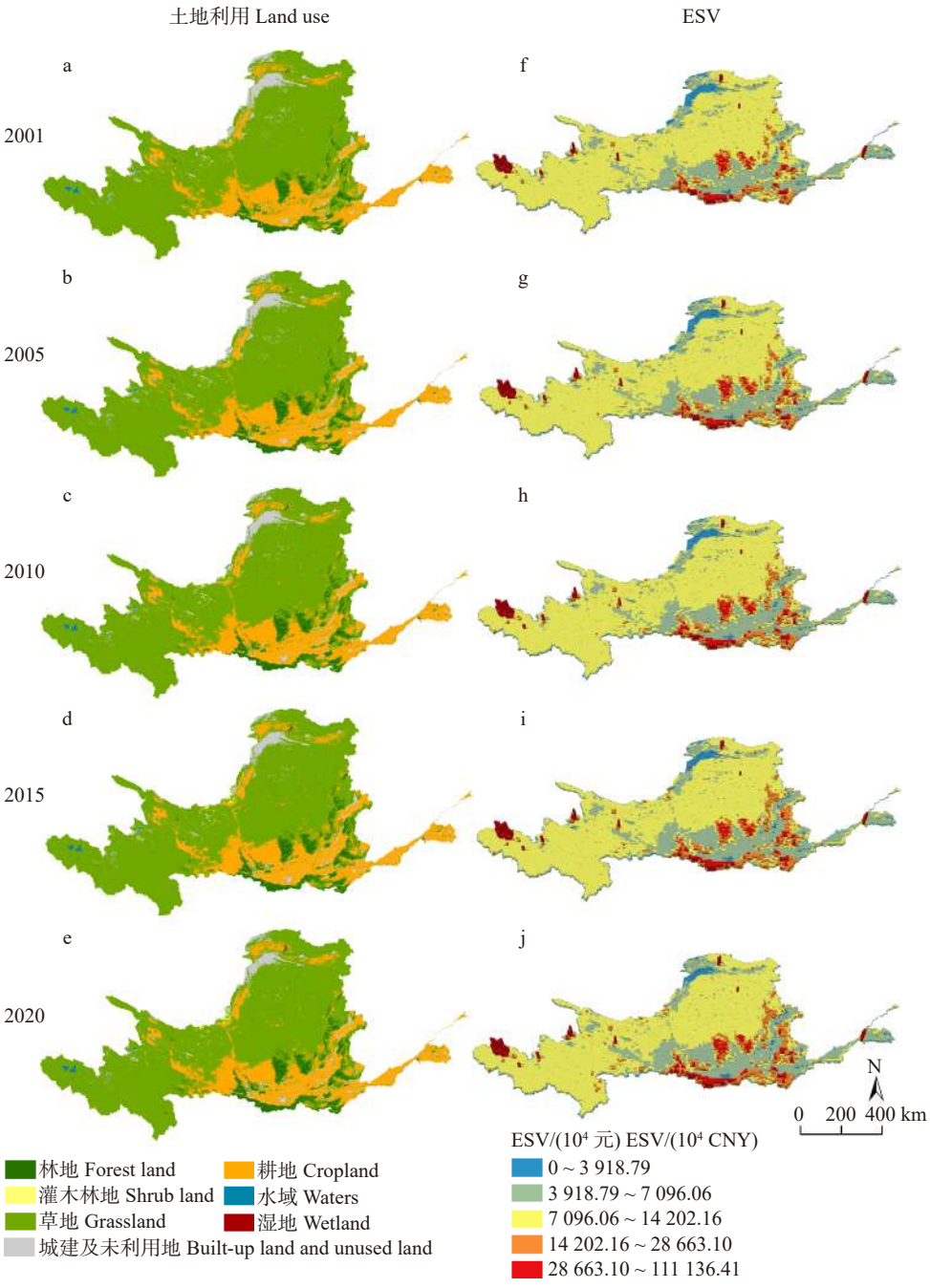


图 3　2001—2020 年黄河流域土地利用及 ESV 空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of land use and ESV in the Yellow River Basin from 2001 to 2020

表 3 黄河流域 ESV 全局 Moran's *I*

Tab. 3 Global Moran's *I* of ESV in the Yellow River Basin

项目 Item	2001	2005	2010	2015	2020
Moran's *I*	0.640	0.644	0.651	0.645	0.650
Z	81.934	82.474	83.368	82.506	83.121
P	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

"LH"零散分布于"HH"区域周边，呈增加的趋势，但增加的面积较少。"HL"分布最少，零星出现在黄河流域东南部地区，20 年间空间分布没有明显变化。

2.3.2 LISA 时间路径

LISA 时间路径分析结果表明(图 5a)，2001—2020 年黄河流域 ESV 的 LISA 时间路径的相对长度大于 1 的研究单元有 2 070 个，约占总研究单元数的 24.70%，主要集中分布在黄河流域中游的山西、陕西和河南部分地区，零星分布在上游地区，表明这些区域的 ESV 在研究时段内的增长过程中变动幅度相对较大，具有更为动态的局部空间结构。相对长度较小的区域面积分布较广，说明黄河流域大范围内 ESV 增长处于一个稳定的局部空间格局。

研究区内弯曲度(图 5b)数值全部都大于 1，表明黄河流域的 ESV 均具有明显的迁移变化特征。总体来看，黄河流域 ESV 的弯曲度较低，具有相对较弱的空间依赖特征。弯曲度大的区域较少且分散，主要分布在中游东南部地区，表明这些地区 ESV 的增长过程波动特征较强，空间依赖效应较大。

研究区移动方向空间分布特征(图 5c)，总体来看，黄河流域大范围内 ESV 负向协同增长聚集，呈

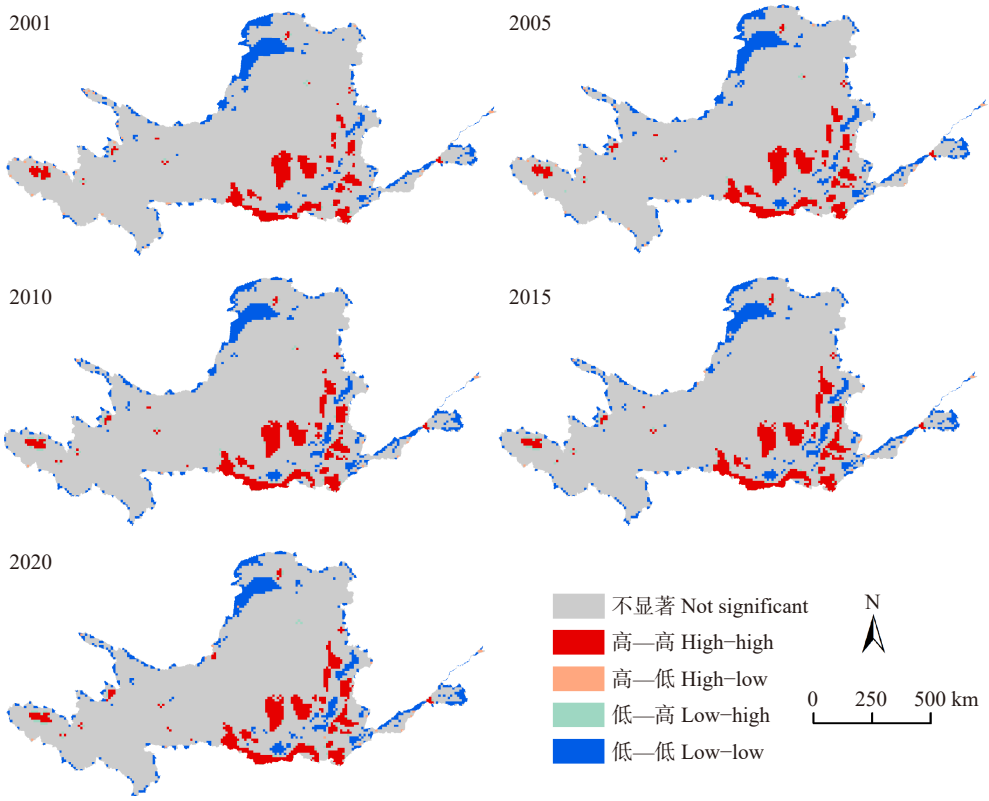


图 4 2001—2020 年黄河流域生态系统服务价值 LISA 图

Fig. 4 LISA diagram of ESV in the Yellow River Basin from 2001 to 2020

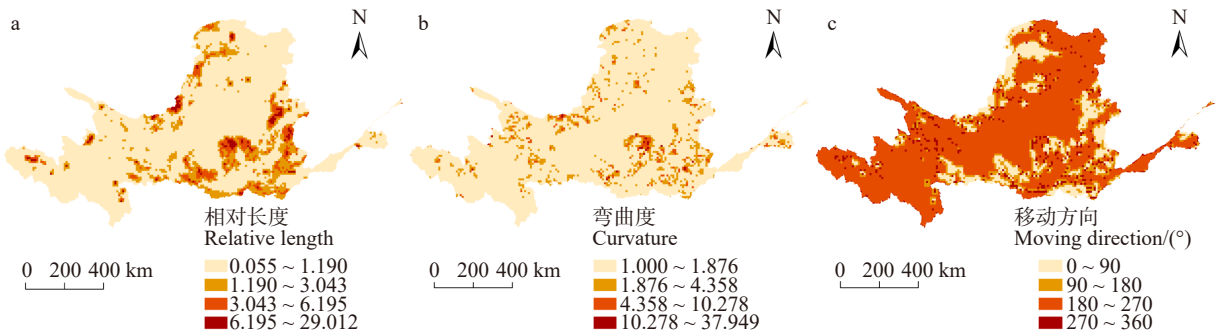


图 5 2001—2020 年 LISA 时间路径相对长度、弯曲度与移动方向

Fig. 5 Relative length, curvature and moving direction of LISA time path from 2001 to 2020

低速增长特征。其中，正向的协同增长(移动方向为 0°～90°)研究单元有 1 238 个，占协同增长研究单元的 18.26%，远小于负向协同增长(移动方向 180°～270°)的数量。

2.3.3　时空跃迁分析

2001—2020 年间，时空跃迁(表 4)中跃迁类型最多的是 Type0，占所有跃迁类型的比例高达 77.9%，即各研究单元自身与邻域随着时间的推移均不发生跃迁，不同类型间存在一定的转移惰性，具有较强空间聚集性。黄河流域 ESV 的增长大范围内基本保持一个较为稳定的状态。发生 Type3 跃迁类型的情况较少，只占 2.4%，即很少出现研究单元自身与邻域 ESV 增长同时发生跃迁的情况。时空变迁概率为 19.7%，时空凝聚概率为 80.1%，说明 ESV 增长的空间分布凝聚力强，各研究单元之间 ESV 增长的相对位置较稳定，存在一定的路径依赖。

2.4　ESV 驱动因素分析

不同时期的各驱动因素对 ESV 的影响存在空间异质性，GTWR 回归系数的显著性比例均在 93% 以上[30]。年降水量(图 6a)对 ESV 的影响在北部和东南部地区起较小促进作用。随时间的推移，年降水量对北部 ESV 的促进作用面积逐渐减小，对东南部促进作用面积增大。年均气温(图 6b)对 ESV 的影响年际差异较大，对西部、南部和东部区域整体起到正向作用，其中在中游的西南部和东部影响较大，随着时间推移年均气温的促进作用逐渐减小。负向影响主要出现在中游西北方向和下游区域。NDVI(图 6c)对东部和下游地区的 ESV 起负向作用，对中上游 ESV 具有促进作用，由西向东逐渐增强。人口密度(图 6d)对 ESV 的影响基本保持稳定，但影响力相对较小。人口密度在黄河流域上游和下游促进 ESV 增长，中部西北方向人口密度促进作用逐渐增强，在中游部分呈抑制 ESV 增长，且向东南方向逐渐增强。夜间灯光(图 6e)对 ESV 的影响 20a 间比较稳定且影响力相对较小，夜间灯光在上游大范围地区和下游地区呈负向作用力，在中部地区的正向作用力向正东方向逐渐增强。斑块密度(图 6f)在全流域对 ESV 起负影响，中游的作用力相对较小。相反，蔓延度指数(图 6g)对 ESV 全流域呈正向作用力，在下游地区作用力相对较大。

3　讨　　论

3.1　ESV 时空动态特征及演变

本研究采用 ESTDA 对 2001—2020 年黄河流域 ESV 的局部空间结构变化动态性特征进行了研究，现有 ESV 研究大部分忽略了时间维度与空间的交互影响以及小尺度邻域影响效应，ESTDA 将时间尺度纳入计算，结合空间关联指标与 ESV 分布的方向性运动分析，显示了 ESV 的持续演化。从黄河流域 ESV 的 LISA 几何特征(图 5)来看，黄河流域 ESV 的相对长度和弯曲度空间分布情况总体较为一致，中游的 ESV 增长表现出更大的局部动态特征和更波动的空间依赖性。其主要原因是中游所在的黄土高原区，自 20 世纪末以来实施了退耕还林、天然林保护等生态建设工程[31]，森林覆盖率显著提高[32]，林地的变化是影响 ESV 变化的主体。另外，黄土高原是水土流失最严重地区之一，极易造成物质流失、生物多样性下降等问题[33]，导致生态服务功能下降，也是 ESV 动态性增强的重要原因之一。黄河流域空间形态转移情况(表 4)来看，ESV 大范围内呈现负向协同增长聚集特征，整体表现为低速增长状态。ESV 的增长存在“马太效应”，即 ESV 增长快的地区不会大幅倒退，ESV 增长慢的地区不会明显改善，具备了锁定特征，揭示了改变当前 ESV 增长的相对状态比较困难的现状。

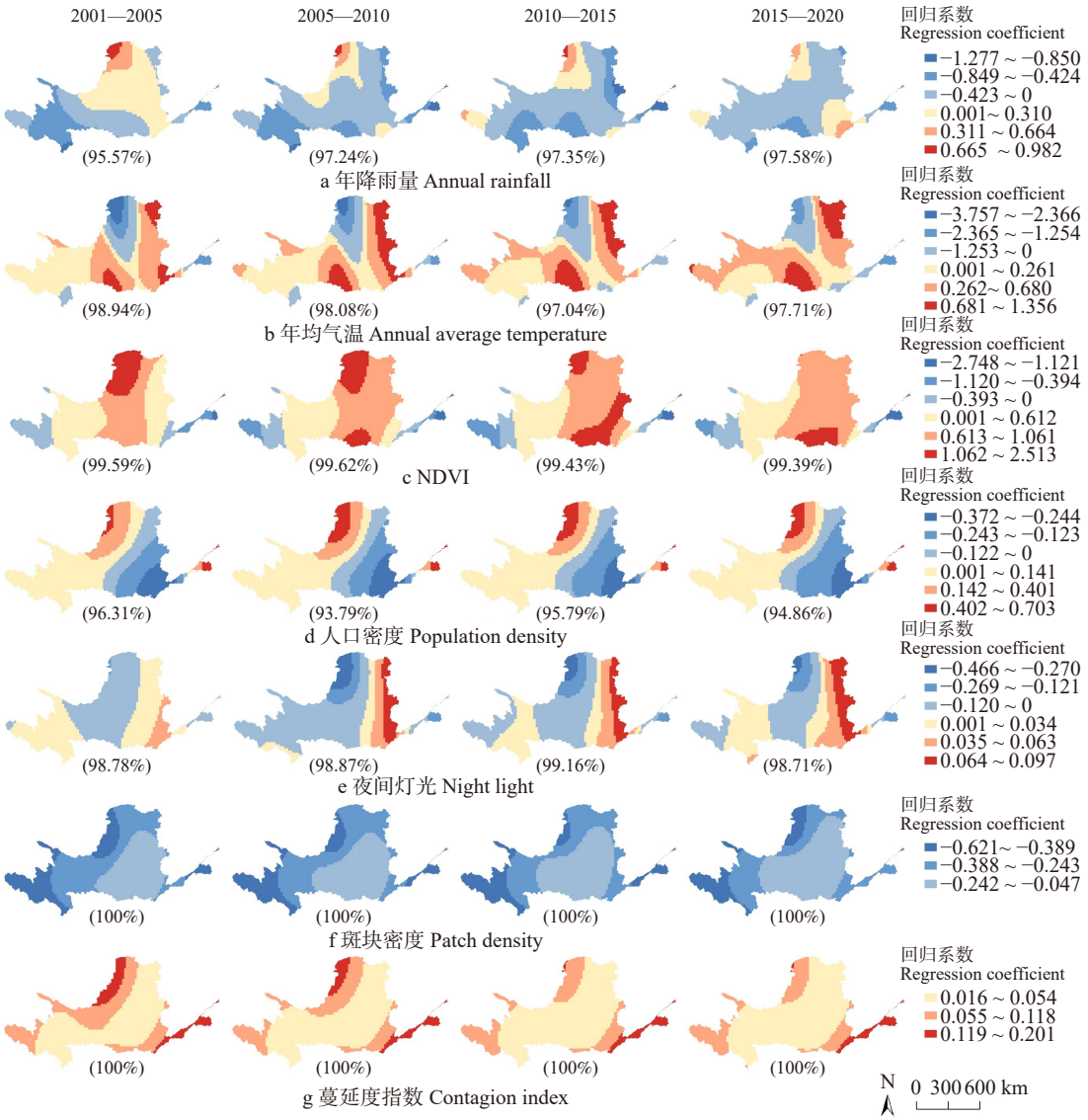
3.2　ESV 影响因素

不同气候区的影响因素存在显著的空间差异性，图 6 可以看到以年均气温和 NDVI 为主导的自然因素对黄河流域 ESV 空间分异有较高解释力，与孙梦华等[34]研究结果相一致。干旱区 ESV 来源主要集中于植被所产生的价值，区域 NDVI 和降水对 ESV 起主导的正向作用，而温度的升高会加剧干旱程度，影响植被的生长。半干旱区降水的促进作用和部分地区温度的抑制作用相对减弱。半湿润区

表 4　黄河流域 ESV Moran's *I* 转移概率矩阵与时空跃迁

Tab. 4　Moran's *I* transition probability matrix and spatiotemporal transition of ESV in the Yellow River Basin

转移矩阵 Transfer matrix	2001—2020				类型 Type	比例 Proportion	变迁 Transition	凝聚 Condensation
	HH	LH	LL	HL				
HH	0.103	0.009	0.016	0.002	Type0	0.779		
LH	0.013	0.046	0.035	0.000	Type1	0.142	0.197	0.801
LL	0.005	0.013	0.618	0.006	Type2	0.055		
HL	0.006	0.002	0.114	0.012	Type3	0.024		



括号内为显著性比例，显著性水平比例为 GTWR 估计的参数值在显著性水平为 0.05 时通过检验的比例。The proportion of significance is shown in parentheses, and the proportion of significance level is the proportion of parameter values estimated by GTWR that pass the test at a significance level of 0.05.

图 6 黄河流域 ESV 驱动因素空间异质性

Fig. 6 Spatial heterogeneity of ESV driving factors in the Yellow River Basin

ESV 来源增多，NDVI 的主导正向作用逐渐减弱，甚至过多的降水有可能限制植被的生长[35]，因而降水成为了负向影响因素。高温可能导致水资源减少、植被衰退，在下游山东等地表现出较强的负向作用。斑块密度和蔓延度指数反映了景观的破碎化程度，图 6f、g 中斑块密度的负向作用和蔓延度指数的正向作用都体现了景观的破碎化使生态系统服务受到一定程度的破坏，而斑块之间较好的连通性可以提高 ESV。这一结果与张明阳等关于景观格局和生态系统服务价值关系的研究结果[36]相一致，他们指出保证林地、草地等关键景观类型的有效网络面积连通可以增强区域 ESV。

人口密度和夜间灯光对 ESV 的影响作用力相对较弱，上游和下游人口密度为正向作用，夜间灯光为负向作用，中游则相反（图 6d、e）。上游地区人口密度较小，其对生态环境的干扰程度相对较弱[37]，下游地区经济较为发达，人口密度是重要的生产力衡量指标[38–39]，ESV 与生产力紧密相关，因此呈现出一定的正向作用。但中游地区地形地势较为陡峭，加之人类活动和降水较多，造成土壤流失、土地退化等[40]，严重影响生态系统服务的生产和提供。夜间灯光作为经济水平的代表，在上游地区较低，上游地区依赖自然资源，传统农牧业生产方式普遍，生态环境受到重创[41]，造成资源过度消耗、土地退化问题，进而影响 ESV。下游地区经济水平较高，随着城镇化和经济水平的提高，许多耕地被城镇和工业用地占用[42]，绿地减少，加上工业和农业对水资源的大量需求和污染[43]，大大降低了 ESV。中游地区的经济

发展与生态环境矛盾相对缓和，夜间灯光对中游 ESV 有明显正向作用。Li 等[44]在全国范围内研究了影响生态系统服务的自然与人为因素比较，其结果显示人为因素在黄河流域 ESV 中占主导地位，略高于自然因素，这与本文研究结果存在偏差。根据危小建等[45]的研究结果发现，区域 ESV 与影响因素的关系具有明显的尺度依赖特征，网格尺度改变，既影响 ESV 的自相关性，也影响着影响因素的作用方向和作用力。各影响因素对 ESV 的影响是一个长期交互复杂的过程，并且区域上存在不同空间尺度的协同联动。本研究将时间维度纳入模型计算考虑了长时间序列的影响，然而，由于数据可得性和模型限制，影响因子的选取与尺度的调整还存在不全面的问题，后续会进一步选取更多合适影响因子运用多方法多尺度进行研究。

3.3 建　议

黄河流域经济发展和生态保护始终存在不平衡、不协调情况，近年来随着国家逐步重视生态文明建设，越来越多的学者将生态系统服务的量化用于生态保护决策参考当中。为了实现生态系统服务与发展的平衡，黄河流域的保护策略需要因地制宜。针对黄河流域上游海拔高，植被稀疏，要防止土地退化，提升生态系统服务价值，注重水源涵养功能，带动解决中下游水资源矛盾。中游地区加大修复措施力度，保护生物多样性和土壤保持服务功能。下游重点维护生态与发展的平衡性，在生态保护的前提下，推动发展具有关联效应和带动作用的产业，为整个流域经济共同发展起到积极作用。全域内建立合理生态补偿机制，结合 ESV 的空间关联性，由高 ESV 增长区域带动，精准推进小尺度、跨区域的区域合作，建立毗邻合作区，搭建合作双赢的生态系统服务发展平台。

4 结　　论

（1）2001—2020 年黄河流域总 ESV 整体呈逐年稳定上升的趋势，4 项生态系统服务的变化与总 ESV 增长相一致，其中调节服务占比最大，供给服务中的水资源供给服务则是唯一的负向增长项。林地、草地和耕地是主要贡献因子，其中林地对总 ESV 变化贡献率最大。

（2）黄河流域中游东南部 ESV 的 LISA 时间路径相对长度较大，其 ESV 变化动态性相对比较剧烈，大部分区域处于一个稳定的空间结构。LISA 相对路径弯曲度整体偏小，即流域整体上空间依赖特征不明显。LISA 时间路径移动方向表明 ESV 负向协同增长远大于正向协同增长，处于低速增长状态。黄河流域时空跃迁中跃迁类型间具有惰性，时空凝聚概率为 80.1%，各研究单元 ESV 增长的相对位置较为锁定。

（3）黄河流域 ESV 时空分异受自然环境因子和社会因子的共同作用，各影响因子都具有明显时空差异性。其中自然环境因子起到了主导 ESV 变化的作用，不同的气候区域各影响因子的作用强度具有明显差异。良好的斑块连接，即地类破碎程度减小，有利于 ESV 的增长。

参　考　文　献

[1] 石涛. 黄河流域生态保护与经济高质量发展耦合协调度及空间网络效应 [J]. 区域经济评论, 2020(3): 25−34.
Shi T. Spatial correlation network and regional connected effect of coupling coordination degree between ecological protection and high-quality economic development in the Yellow River Regions[J]. Regional Economic Review, 2020(3): 25−34.

[2] 徐勇, 王传胜. 黄河流域生态保护和高质量发展: 框架、路径与对策 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 875−883.
Xu Y, Wang C S. Ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin: framework, path, and countermeasure[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(7): 875−883.

[3] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 等. 黄土高原植被恢复成效及影响因素 [J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8593−8605.
Li T, Lü Y H, Ren Y J, et al. Gauging the effectiveness of vegetation restoration and the influence factors in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8593−8605.

[4] 王艳芬, 陈怡平, 王厚杰, 等. 黄河流域生态系统变化及其生态水文效应 [J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 520−528.
Wang Y F, Chen Y P, Wang H J, et al. Ecosystem change and its ecohydrological effect in the Yellow River Basin[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 520−528.

[5] Groot R, Brander L, van der Ploeg S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. Ecosystem Services, 2012, 1(1): 50−61.

[6] Ouyang Z, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. Science, 2016, 352: 1455−1459.

[7] 陈玉福, 董鸣. 生态学系统的空间异质性 [J]. 生态学报, 2003, 23(2): 346−352.
Chen Y F, Dong M. Spatial heterogeneity in ecological systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 346−352.

[8] Rey S J, Janikas M V. STARS: space-time analysis of regional systems[J]. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 67−86.

[9] 景海超, 刘颖慧, 贺佩, 等. 青藏高原典型区生态系统服务空间异质性及其影响因素: 以那曲市为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2657−2673.
Jing H C, Liu Y H, He P, et al. Spatial heterogeneity of ecosystem services and it's influencing factors in typical areas of the Qinghai-Tibet Plateau: a case study of Nagqu City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2657−2673.

[10] 王耕, 张芙榕. 近 30 年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 [J]. 环境科学, 2024, 45(1): 228−238.
Wang G, Zhang F R. Spatial and temporal evolution and impact factors analysis of ecosystem service value in the Liaohe River Delta over the past 30 years[J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 228−238.

[11] 黄木易, 方斌, 岳文泽, 等. 近 20 a 来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测 [J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2790−2803.
Huang M Y, Fang B, Yue W Z, et al. Spatial differentiation of ecosystem service values and its geographical detection in Chaohu Basin during 1995−2017[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2790−2803.

[12] 夏楚瑜, 国淏, 赵晶, 等. 京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应 [J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2756−2769.
Xia C Y, Guo H, Zhao J, et al. Dynamic responses of ecosystem services to urbanization at multi-spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2756−2769.

[13] 赵泳春, 苏方林. 经济差异化增长下生态系统服务价值的时空演变特征: 以珠江–西江经济带为例 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1782−1798.
Zhao Y C, Su F L. Spatio-temporal dynamic characteristics of the ecosystem service values under differential economic growth: a case study of the Pearl River-West River Economic Belt[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(7): 1782−1798.

[14] 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): 383−401.

[15] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis[J]. Environment and Planning A, 1998, 30(11): 1905−1927.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 田晓华, 卢飞, 徐翠蓉. 基于超效率 SBM 模型的黄河中下游生态效率测度与空间相关性分析 [J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 2023, 36(1): 89−97.
Tian X H, Lu F, Xu C R. Ecological efficiency measurement and spatial correlation analysis in the middle and lower reaches of the Yellow River based on the super-SBM model[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2023, 36(1): 89−97.

[19] 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.

[20] 郑晓豪, 陈颖彪, 郑子豪, 等. 湖北省生态系统服务价值动态变化及其影响因素演变 [J]. 生态环境学报, 2023, 32(1): 195−206.
Zheng X H, Chen Y B, Zheng Z H, et al. Dynamic changes of ecosystem service value and evolution of its influencing factors in Hubei Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(1): 195−206.

[21] 封建民, 郭玲霞, 李晓华. 汉中市土地利用时空变化及其对生态系统服务价值的影响 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 275−282.
Feng J M, Guo L X, Li X H. Temporal and spatial variations of land uses and their influences on ecosystem service function values in Hanzhong City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 275−282.

[22] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 等. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1660−1672.
Qiao B, Zhu C X, Cao X Y, et al. Spatial autocorrelation analysis of land use and ecosystem service value in Maduo County, Qinghai Province, China at the grid scale[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1660−1672.

[23] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2783−2792.
Wang B, Zhao J, Hu X F. Spatial pattern analysis of ecosystem services based on InVEST in Heihe River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(10): 2783−2792.

[24] Ye X, Rey S. A framework for exploratory space-time analysis of economic data[J]. The Annals of Regional Science, 2013, 50(1): 315−339.

[25] 张中浩, 聂甜甜, 高阳, 等. 长三角城市群生态安全评价与时空跃迁特征分析 [J]. 地理科学, 2022, 42(11): 1923−1931.
Zhang Z H, Nie T T, Gao Y, et al. Ecological security assessment and spatio-temporal transition characteristics in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(11): 1923−1931.

[26] Rey S J, Murray A T, Anselin L. Visualizing regional income distribution dynamics[J]. Letters in Spatial and Resource Sciences, 2011, 4(1): 81−90.

[27] Rey S J. Spatial empirics for economic growth and convergence[J]. Geographical Analysis, 2001, 33(3): 195−214.

[28] Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. Landscape and Urban Planning, 2012,

106(1): 62−72.

[29] 罗盛锋, 闫文德. 广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力 [J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3248−3259.
Luo S F, Yan W D. Evolution and driving force analysis of ecosystem service values in Guangxi Beibu Gulf coastal areas, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3248−3259.

[30] 李英利. 财政压力、土地财政与区域房价的时空演化: 基于 GTWR 模型的实证研究 [J]. 财政研究, 2020(5): 78−89.
Li Y L. Fiscal pressure, land finance and the spatio-temporal evolution of regional house price: empirical research based on GTWR model[J]. Public Finance Research, 2020(5): 78−89.

[31] 张琨, 林乃峰, 徐德琳, 等. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1057−1063.
Zhang K, Lin N F, Xu D L, et al. Research advance on ecological security in China: assessment models and management measures[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(12): 1057−1063.

[32] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向 [J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7333−7343.
Wang C, Wu X, Fu B J, et al. Ecological restoration in the key ecologically vulnerable regions: current situation and development direction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7333−7343.

[33] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策 [J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398−7409.
Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398−7409.

[34] 孙梦华, 牛文浩, 张蚌蚌, 等. 黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应: 以陕甘宁地区为例 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3913−3922.
Sun M H, Niu W H, Zhang B B, et al. Spatial-temporal evolution and responses of ecosystem service value under land use change in the Yellow River Basin: a case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia region, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3913−3922.

[35] Austin A T, Vitousek P M. Nutrient dynamics on a precipitation gradient in Hawaii[J]. Oecologia, 1998, 113(4): 519−529.

[36] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 等. 桂西北典型喀斯特区生态系统服务价值对景观格局变化的响应 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1174−1179.
Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, et al. Responses of ecosystem service values to landscape pattern change in typical karst area of northwest Guangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1174−1179.

[37] 王婧, 康荣华, 方媛, 等. 宁夏清水河平原生态脆弱性评价及驱动因子分析 [J]. 水利水电快报, 2023, 44(8): 98−105.
Wang J, Kang R H, Fang Y, et al. Eco-environmental vulnerability evaluation in Qingshui River Plain of Ningxia and driving force analysis[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2023, 44(8): 98−105.

[38] 王殿茹, 薛少冰. 中国人口密度对生态环境的影响: 基于双向固定效应模型的实证分析 [J]. 河北地质大学学报, 2022, 45(5): 97−103.
Wang D R, Xue S B. The impact of population density on ecosystem in China based on the two-way fixed effects model[J]. Journal of Hebei Geo University, 2022, 45(5): 97−103.

[39] 桑海云. 财政转移支付、就业机会与相对贫困缓解 [J]. 技术经济与管理研究, 2022(9): 124−128.
Sang H Y. Fiscal transfer payments, employment opportunities and relative poverty alleviation[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2022(9): 124−128.

[40] 安彬, 肖薇薇, 朱妮, 等. 近 60 a 黄土高原地区降水集中度与集中期时空变化特征 [J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1333−1344.
An B, Xiao W W, Zhu N, et al. Temporal and spatial variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period on the Loess Plateau from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1333−1344.

[41] 程永生, 张德元, 赵梦婵. 黄河流域生态保护和高质量发展的时空演变与驱动因素 [J]. 经济体制改革, 2021(5): 61−69.
Cheng Y S, Zhang D Y, Zhao M C. Spatial-temporal evolution and driving factors of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform of Economic System, 2021(5): 61−69.

[42] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(6): 1018−1029.
Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1018−1029.

[43] 张世举, 王娟. 黄河河南段滩涂水资源利用研究 [J]. 节水灌溉, 2013(5): 37−39.
Zhang S J, Wang J. Comprehensive utilization of water resources in the Yellow River intertidal zone of Henan Province[J]. Water Saving Irrigation, 2013(5): 37−39.

[44] Li F Z, Yin X X, Shao M. Natural and anthropogenic factors on China's ecosystem services: comparison and spillover effect perspective[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2022, 324:116064[2023−05−30].https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116064.

[45] 危小建, 辛思怡, 张颖艺, 等. 不同格网尺度下生态服务价值空间分异及其影响因素差异探析 [J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7585−7597.
Wei X J, Xin S Y, Zhang Y Y, et al. Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7585−7597.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　臧润国）