

# 武汉都市圈生态系统服务价值权衡/ 协同及驱动因素分析

刘昕洁<sup>1</sup>, 张雪云<sup>2</sup>, 田慧<sup>1</sup>, 袁满<sup>3</sup>, 何力<sup>1,4</sup>

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434000; 2. 荆州职业技术学院, 湖北 荆州 434023;

3. 华中科技大学 建筑与城市规划学院, 武汉 430074; 4. 武汉大学 城市设计学院, 武汉 430072)

**摘要:** [目的] 揭示多尺度驱动因素对ESV的非线性影响与交互效应, 深化对城镇化进程中生态系统服务价值响应机制的理解, 丰富城市群人地系统耦合理论的内涵, 为区域的生态管控提供科学依据。[方法] 基于2000年、2005年、2010年、2015年、2020年五期土地利用遥感数据, 揭示武汉都市圈ESV多尺度下的时空变化特征及其内部服务间的权衡协同关系, 并引入最优参数地理探测器模型探究其驱动机制。[结果] (1) 20年间武汉都市圈总体ESV呈下降趋势, 累计减少1.82亿元, 其中2010—2015年降幅最为显著; (2) 食物生产、土壤保持等服务价值显著下降, 而文化娱乐和景观美学类服务价值相对增长; (3) 9种生态系统服务间的关系总体上以协同为主导, 显著的权衡关系主要存在于食物生产服务与其他服务之间; (4) 人口密度、高程、植被覆盖度等驱动因素对ESV空间分异影响显著, 且自然与社会经济的深度耦合是武汉都市圈ESV空间分异的核心驱动力。[结论] 武汉都市圈ESV经历从增长优先到生态优先, 呈现出建设用地扩张与生态用地流失的矛盾。功能上协同关系占据主导, 空间上受自然与社会经济深度耦合驱动, 需构建自然—经济—政策三元协同机制以实现生态保护与经济发展的动态平衡。

**关键词:** 生态系统服务价值; 时空变化; 权衡协同; 驱动因素; 武汉都市圈

中图分类号: F301; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0425-13

## Analysis of trade-offs/synergies and driving factors of ecosystem service value in Wuhan metropolitan area

Liu Xinjie<sup>1</sup>, Zhang Xueyun<sup>2</sup>, Tian Hui<sup>1</sup>, Yuan Man<sup>3</sup>, He Li<sup>1,4</sup>

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434000, China; 2. Jingzhou Institute of Technology, Jingzhou, Hubei 434023, China; 3. School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** [Objective] This study reveals the non-linear impacts and interactive effects of multi-scale driving factors on ecosystem service value (ESV), thereby deepening the understanding of the response mechanisms of ESV to urbanization, enriching the theory of human-land system coupling in urban agglomerations, and providing a scientific basis for regional ecological management. [Methods] Based on remote sensing-derived land use data for five periods (2000, 2005, 2010, 2015, and 2020), this study revealed the spatiotemporal variation characteristics of ESV at multiple scales and the trade-offs/synergies among internal services in the Wuhan metropolitan area, and introduced the optimal parameters-based geographical detector model to explore its driving mechanisms. [Results] (1) Over the 20-year period, the total ESV of the Wuhan metropolitan area showed a downward trend,

收稿日期: 2025-09-11

修回日期: 2025-10-04

接受日期: 2025-10-22

资助项目: 国家重点研发计划资助“城市群都市圈空间优化关键技术”(2022YFC3800103); 中央高校基本科研业务费专项资金资助“以圈群视角下都市圈创新链、产业链、供应链空间组织评价与优化——基于武汉都市圈与长江中游城市群交互网络的实证研究”(2024WKYXQN017)

第一作者: 刘昕洁(2002—), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向为城乡规划。E-mail: 873308149@qq.com

通信作者: 何力(1989—), 男, 湖北荆州人, 副教授, 主要从事地理信息系统相关研究。E-mail: heli@yangtzeu.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

with a cumulative decrease of 182 million yuan, and the most pronounced decrease occurred during 2010—2015. (2) The values of services such as food production and soil retention decreased substantially, while the values of cultural entertainment and landscape aesthetics showed relative growth. (3) Among the nine ecosystem services, synergies predominated, and significant trade-offs were mainly observed between food production and other services. (4) Driving factors including population density, elevation, and vegetation cover significantly influenced the spatial differentiation of ESV, and the deep coupling of natural and socioeconomic factors was the core driving force for the spatial differentiation of ESV in the Wuhan metropolitan area. [ **Conclusion** ] The ESV of the Wuhan metropolitan area has undergone a shift from a growth-priority to ecological-priority paradigm, presenting the contradiction between the expansion of construction land and the loss of ecological land. Functionally, synergistic relationships dominate, and spatially, it is driven by the deep coupling of natural and socioeconomic factors. A tripartite coordinated mechanism among nature, economy, and policy needs to be established to achieve a dynamic balance between ecological protection and economic development.

**Keywords:** ecosystem service value; spatiotemporal variation; trade-offs and synergies; driving factors; Wuhan metropolitan area

在全球城市群竞争与生态安全博弈并行的新时代,土地利用转型从规模扩张迈向功能优化。都市圈作为区域经济发展的核心载体,其快速扩张使土地利用格局发生变化,影响生态系统服务的供需关系与内部权衡协同机制<sup>[1-3]</sup>。作为长江经济带“双循环”战略支点<sup>[4]</sup>,武汉都市圈在城镇化推进过程中面临发展与保护的深层矛盾:建设用地持续扩张导致江湖湿地萎缩与生态廊道破碎化<sup>[5-6]</sup>,不仅冲击区域生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV),更直接制约高质量发展与构建生态安全格局。科学揭示ESV的时空演变规律,并厘清其内部不同服务间的权衡协同关系与驱动机制,已成为区域可持续发展的关键问题。

生态系统服务价值(ESV)评估是连接自然资源与社会经济的桥梁,旨在量化自然系统为人类提供的物质供给、环境调节、生态支持和文化服务等综合效益<sup>[7]</sup>,为理解生态系统变化提供重要方法论基础。该领域研究方法发展迅速:从Costanza等<sup>[8]</sup>开创的全球当量因子法,到谢高地<sup>[9]</sup>团队提出中国生态系统服务价值当量因子法,再到InVEST模型等<sup>[10]</sup>空间显式建模与多源数据融合技术<sup>[11]</sup>的应用,共同推动了ESV评估的精准化进程<sup>[12-13]</sup>。然而,现有研究在支撑武汉都市圈生态治理方面仍存在局限:(1)研究多聚焦于ESV总量评估,对不同服务类型之间权衡/协同关系的识别与成因解析不足<sup>[14-15]</sup>;(2)驱动机制分析多停留于统计描述,缺乏对自然、社会经济因素交互效应的机理挖掘<sup>[16]</sup>;(3)尚未建立中观尺度(市域—县域)下ESV演变与空间决策的衔接机制,导致研究成果难以转化为可操作的治理策略<sup>[17]</sup>。

基于以上研究缺口与现实需求,本文围绕“格局演

变—权衡协同—驱动机制—优化调控”的逻辑主线展开研究,系统化武汉都市圈2000—2020年各类生态系统服务价值的变化;识别不同类型服务间的权衡/协同关系及其空间分异特征;采用R语言最优参数地理探测器,揭示多尺度驱动因素对ESV的非线性影响与交互效应。研究成果旨在深化对城镇化进程中生态系统服务价值响应机制的理解,丰富城市群人地系统耦合理论的内涵,并为区域的生态管控提供科学依据。

## 1 研究设计与数据来源

### 1.1 研究区位

武汉都市圈(112°30′—116°07′E, 29°05′—31°51′N)地处长江中游,是实施“中部崛起”战略与长江经济带发展的核心区域<sup>[18]</sup>,总面积57 853 km<sup>2</sup>,涵盖武汉市及其周边的黄石、孝感等9个城市。该区域属典型的亚热带季风气候,雨热同期,为生态系统服务的形成提供了良好的自然基础。地貌上呈现“东高西低”的格局,东部为大别山南麓低山丘陵,是重要的水源涵养与土壤保持区;中西部为坦荡低缓的江汉平原。河网密布,湖泊密布,坐拥洪湖、梁子湖等大型湖泊,湿地资源丰富,湿地面积占武汉都市圈行政区域的41.02%<sup>[19]</sup>,构成了以“江河—湖泊—湿地”为骨架的典型江湖复合生态系统。这种“山水林田湖”共生格局,赋予了武汉都市圈生态系统服务供给潜力。

### 1.2 数据来源

本文选取2000年、2005年、2010年、2015年、2020年五期数据进行研究,文中所用数据包括土地利用数据、自然因素数据等,数据来源详见表1。为保证数据一致性,将表中数据的空间分辨率重采样至1 km,投影至WGS 1984 UTM Zone 50N。

表 1 数据集和变量  
Table 1 Datasets and variables

数据类型	空间分辨率	来源
土地利用数据	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
年均温度	1 km	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )
年降水总量	1 km	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )
高程	1 km	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
植被覆盖度	250 m	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )
土壤数据	250 m	国家地球系统科学数据中心 ( <a href="https://www.geodata.cn/data/">https://www.geodata.cn/data/</a> )
地表温度	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
地区生产总值(GDP)	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
第二产业产值	—	《湖北省统计年鉴》、研究区统计年鉴
第三产业产值	—	《湖北省统计年鉴》、研究区统计年鉴
人口密度	1 km	<a href="https://landscan.ornl.gov/">https://landscan.ornl.gov/</a>
夜间灯光指数(NPP)	500 m	<a href="https://lpdaac.usgs.gov/">https://lpdaac.usgs.gov/</a>
道路数据	—	<a href="http://www.openstreetmap.org/">http://www.openstreetmap.org/</a>

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态变化模型 按照中国科学院土地利用分类体系将研究区重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类。本文利用 ArcGIS 对武汉都市圈 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年五年土地利用数据进行分析。土地利用动态变化模型<sup>[20-21]</sup>具体包括:(1)土地利用动态度;(2)土地利用状态指数;(3)土地利用转移矩阵。

1.3.2 ESV 估算 该方法通过将生态系统服务功能分类,并结合单位面积价值当量因子和土地利用类型,计算生态系统服务的总价值<sup>[22]</sup>。根据 Costanza、

谢高地等<sup>[8-9]</sup>的研究,获得生态系统服务的分类并建立相应的当量因子表。在众多关于武汉都市圈 ESV 的研究中,赵育恒等<sup>[23]</sup>的成果具有重要参考价值(表 2),他们通过专家打分法对相关数据进行了修正和完善。本文以此为基础,进一步计算武汉都市圈的 ESV,计算公式为:

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

式中:ESV 即生态系统服务价值(元); $A_i$ 为第  $i$  种土地利用类型的面积( $hm^2$ ); $VC_i$ 为第  $i$  种土地利用类型的 ESV 系数(元/ $hm^2$ )。

表 2 武汉都市圈不同土地利用类型 ESV 系数

Table 2 ESV coefficients of different land use types in Wuhan metropolitan area

生态服务功能	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
气候调节	239.18	453.82	337.30	361.83	0	196.25
气体调节	245.31	453.82	325.04	306.64	0	190.12
水文调节	312.77	423.16	380.23	441.56	0	239.18
土壤保持	361.83	453.82	417.03	263.71	0	239.18
食物生产	490.62	263.71	226.91	337.3	0	128.79
淡水供应	165.58	245.31	226.91	478.35	0	116.52
文化娱乐	128.79	269.84	294.37	361.83	410.89	116.52
提供景观美学	208.51	423.16	392.50	417.03	282.11	177.85
自然遗产 & 自然多样性	226.91	417.03	361.83	374.10	183.98	257.58
总计	2379.50	3403.67	2962.12	3342.35	876.98	1661.99

1.3.3 ESV 权衡协同关系 选用 1 km×1 km 网格作为评价单元,基于 R 语言平台的 corrgram 软件包 (<https://cran.rproject.org/web/packages/corrgram/index.html>)开展相关性分析。根据 Pearson 相关系数分析结果:当  $r > 0$  且通过显著性检验  $p < 0.05$  时,表明不同生态系统服务存在协同关系;当  $r < 0$  且满足

$p < 0.05$  时,则揭示生态系统服务间存在此消彼长的权衡关系,相关系数绝对值越大表明关系作用越突出;若  $r = 0$  且  $p < 0.05$ ,则说明两项服务之间不存在显著的线性关联。

1.3.4 R 语言最优参数地理探测器(OPGD) 地理探测器(Geographical Detector)是用于分析地理现象

空间分层异质性及其驱动因素的统计方法<sup>[24]</sup>,核心思想是基于统计分析来探测和解释某一因子(变量)对空间分布格局的解释力。如果某个因子( $X$ )影响某个现象( $Y$ ),那么 $Y$ 的分布应该与 $X$ 类别的分布相似<sup>[25]</sup>。交互因子探测结果如表3所示。基于R语言的最优参数地理探测器(Optimal Parameters-based Geographical Detector, OPGD)是以上模型的改进方法,通过优化参数选择和空间数据离散化,增强对空间异质性的解释能力。OPGD的实现主要通过“GD包”(地理探测器包)完成<sup>[26]</sup>。该包提供了自动化的最优离散化方法,能够根据输入的连续变量,自动选择最优的离散化方法和区间数量。计算因子 $X$ 对 $Y$ 的 $q$ 值,衡量 $X$ 对 $Y$ 的解释力:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: $q$ 为驱动因子 $X$ 的解释力,取值0~1, $q$ 越大空间分异性越显著, $X$ 对 $Y$ 的解释力越强; $L$ 为变量类别数; $N$ 和 $N_h$ 分别为整个研究样本数和类别 $h$ 的样本数; $\sigma_h^2$ 和 $\sigma^2$ 分别为类别 $h$ 的方差和总方差。

表3 影响因子交互作用类型

Table 3 Types of influencing factor interaction

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子加强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

## 2 结果与分析

### 2.1 武汉都市圈土地利用变化分析

如表4、表5所示,20年间耕地总量净减少量最多,主要转为建设用地和水域,分别占耕地转出总量

的55.65%和24.41%,显示出城市扩张与退田还湖等水域修复工程对耕地的双重挤压。2005—2010年耕地以212.71 km<sup>2</sup>/a的速度加速流失,对应着该时期城镇化的高速推进。2015—2020年耕地动态度与状态指数有所回升,表明该阶段在遏制耕地流失方面取得了一定成效,但未能扭转耕地面积减少的整体趋势。林地总面积减少,林地转为耕地的面积占林地转出量的58.88%,其次转为建设用地的面积占转出量的25.3%,反映农业开垦与城市拓展共同构成了林地流失的主要压力。2010—2015年和2015—2020年林地动态度变化明显,分别下降0.45%和0.44%,10年间林地的减少并非偶发现象,已成为区域发展中的系统性压力。草地面积呈现“先持续减少、后小幅回升”的波动趋势,净减32.98 km<sup>2</sup>,主要转出方向是林地,占总转出量的55.05%。水域面积呈现“先增后减”的波动趋势,面积增长349.54 km<sup>2</sup>,主要转入来源是耕地。水域的状态指数在2000—2005年达到0.55,即该阶段的转入面积大于转出。建设用地面积变化增加最多,扩张1340.42 km<sup>2</sup>,主要侵占耕地和水域。建设用地的状态指数在2000—2015年持续高达0.7左右,说明建设用地的转入面积显著大于转出。未利用土地面积变化呈现先持续减少后局部回升的波动趋势,共减少46.19 km<sup>2</sup>,主要转出方向是水域以及建设用地。2005—2010年锐减57.55 km<sup>2</sup>,退化速度达峰值。

20年间的土地利用变化揭示城镇化驱动下的土地竞争已形成三重压力。耕地向建设用地单向流转,年均64.24 km<sup>2</sup>耕地转为城市用地;林地向耕地的逆向转化,407.64 km<sup>2</sup>森林被开垦为农田,树木砍伐导致碳汇能力下降、水土流失加剧;水域与耕地的高强度置换,49.27%水域变为耕地,24.41%耕地转化为水域。这些变化集中反映出城市需地、农业占地、生态失地的矛盾现状,生态空间被双重挤压。

表4 武汉都市圈土地利用类型变化以及相关指数

Table 4 Changes in land use types and related indices in Wuhan metropolitan area

地类	2000—2005年			2005—2010年			2010—2015年			2015—2020年			2000—2020年		
	面积变化/km <sup>2</sup>	动态度/%	状态指数	面积变化/km <sup>2</sup>	动态度/%	状态指数	面积变化/km <sup>2</sup>	动态度/%	状态指数	面积变化/km <sup>2</sup>	动态度/%	状态指数	面积变化/km <sup>2</sup>	动态度/%	状态指数
耕地	-470.84	-1.57	-0.56	-1063.53	-3.61	-0.47	-417.88	-1.47	-0.42	481.92	1.72	0.13	-1470.33	-4.91	-0.47
林地	-13.58	-0.08	-0.05	25.37	0.14	0.03	-78.46	-0.45	-0.19	-77.10	-0.44	-0.05	-143.77	-0.82	-0.12
草地	-17.68	-1.22	-0.29	-19.28	-1.35	-0.13	-5.89	-0.42	-0.11	9.87	0.70	0.04	-32.98	-2.28	-0.16
水域	279.82	4.89	0.55	345.81	5.76	0.30	6.39	0.10	0.03	-282.47	-4.44	-0.20	349.54	6.10	0.32
建设用地	229.13	7.46	0.69	770.05	23.33	0.70	498.76	12.25	0.69	-157.53	-3.45	-0.09	1340.42	43.63	0.71
未利用地	-6.90	-2.84	-0.11	-57.55	-24.34	-0.40	-3.26	-1.82	-0.31	21.52	12.25	0.18	-46.19	-18.99	-0.37

表 5 武汉都市圈 2000—2020 年土地利用转移矩阵表  
Table 5 Transfer matrix of land use in Wuhan metropolitan area (2000—2020)

2000 年 地类	2020 年地类												总计/ km <sup>2</sup>
	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地		
	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	
耕地	—	—	431.45	18.69	20.12	0.87	563.55	24.41	1284.84	55.65	9.02	0.39	2308.98
林地	407.64	58.88	—	—	55.08	7.96	53.09	7.67	175.38	25.33	1.11	0.16	692.30
草地	17.18	14.61	64.75	55.05	—	—	14.62	12.43	20.50	17.43	0.55	0.47	117.60
水域	184.43	49.27	35.28	9.43	7.08	1.89	—	—	121.60	32.49	25.91	6.92	374.31
建设用地	223.39	82.74	18.69	6.92	1.24	0.46	24.50	9.08	—	—	2.17	0.81	270.00
未利用地	6.45	7.59	0.78	0.92	1.60	1.88	68.15	80.21	7.98	9.39	—	—	84.96
总计	839.10	21.81	550.95	14.32	85.12	2.21	723.93	18.81	1610.30	41.85	38.76	1.01	3848.15

注：“—”代表未发生变化的区域。

2.2 武汉都市圈 ESV 时空分布格局

2.2.1 格网尺度 ESV 分布格局 基于格网尺度的武汉都市圈 ESV 的空间分布特点如图 1 所示。利用 ArcGIS 软件创建渔网和分区统计工具,将研究区域

以 1 km×1 km 作为像素单元,按总 ESV 值分成 5 类。2000—2020 年武汉都市圈 ESV 变化趋势如表 6 所示。20 年间 ESV 整体波动变化呈现降低的趋势,由 2000 年的 157.54 亿元降低到 2020 年的 155.72 亿元。

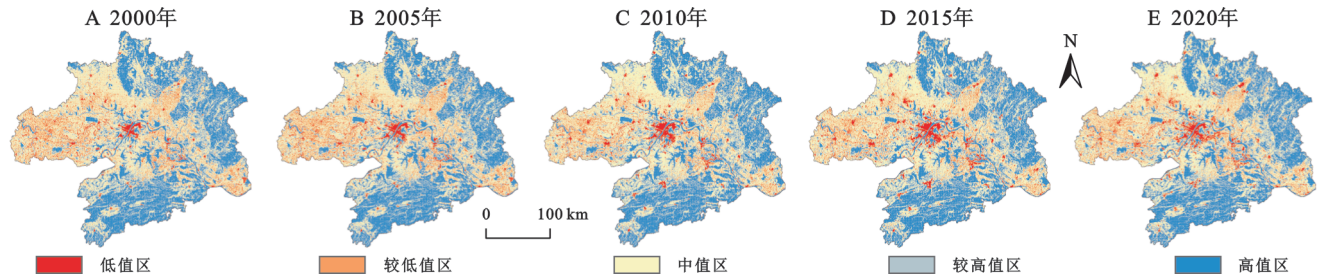


图 1 武汉都市圈 ESV 分布格局

Fig. 1 Spatial distribution patterns of ESV in Wuhan metropolitan area

从土地利用类型来看(表 6),并结合表 2,得出耕地、林地和水域作为主要生态系统服务贡献者,其面积变化对 ESV 影响显著。耕地在食物生产、土壤保持等功能中贡献突出,面积减少是 ESV 降低的最重要原因,下降幅度达 4.91%。2015—2020 年略有回升,对应耕地在此阶段面积短暂回升。林地 ESV 占比同样显著,减幅为 0.82%,同样也是 ESV 降低的重要原因,主要支撑气候调节、气体调节等功能。草地对

ESV 贡献度相对较小,主要支撑土壤保持和景观美学功能。水域对水文调节和淡水供应功能至关重要,20 年间增加了 1.17 亿元,变化率达 6.10%。建设用地所提供的价值增加最多,20 年间变化率高达 43.63%,但建设用地对武汉都市圈 ESV 价值贡献最低且集中于文化娱乐功能。未利用土地由于面积少而对 ESV 贡献度极小,对应的 ESV 20 年间减少了 18.99%,主要支撑自然多样性和水文调节功能。

表 6 2000—2020 年武汉都市圈不同土地利用类型 ESV 变化  
Table 6 Changes in ESV of different land use types in Wuhan metropolitan area (2000—2020)

地类	2000—2020 年武汉都市圈 ESV/亿元					变化率/%				
	2000	2005	2010	2015	2020	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2000—2020
耕地	71.26	70.14	67.61	66.62	67.76	-1.57	-3.61	-1.47	1.72	-4.91
林地	59.76	59.71	59.80	59.53	59.27	-0.08	0.14	-0.45	-0.44	-0.82
草地	4.28	4.23	4.17	4.16	4.18	-1.22	-1.35	-0.42	0.70	-2.28
水域	19.14	20.08	21.23	21.25	20.31	4.89	5.76	0.10	-4.44	6.10
建设用地	2.69	2.90	3.57	4.01	3.87	7.46	23.33	12.25	-3.45	43.63
未利用地	0.40	0.39	0.30	0.29	0.33	-2.84	-24.34	-1.82	12.25	-18.99
总计	157.54	157.45	156.68	155.85	155.72	-0.06	-0.49	-0.53	-0.09	-1.15

从具体服务功能来看(表7),减少量最多的是食物生产和土壤保持,显示出二者在武汉都市圈ESV构成中的主导地位正受到削弱。气候调节价值持续减少。气体调节、水文调节、土壤保持和食物生产4类功能价值不断下降并在2015—2020年出现短暂回升。与之形成对比的是,文化娱乐和景观美学功能

价值总体增多。这些变化反映了生态系统服务功能以农林生产为主导的生产服务逐步转向以人居环境与休闲体验为核心的发展型服务。武汉都市圈在发展中有着通过生态修复与绿色基建建设提升城市竞争力和吸引人才与投资的机遇,此外还出现耕地流失威胁粮食安全,生态服务分配不均的问题。

表7 2000—2020年武汉都市圈各生态系统服务功能ESV变化

Table 7 Changes in ESV of each ecosystem service function in Wuhan metropolitan area (2000—2020)

项目	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年		ESV变化/亿元				
	ESV/ 亿元	占比/ %	ESV/ 亿元	占比/ %	ESV/ 亿元	占比/ %	ESV/ 亿元	占比/ %	ESV/ 亿元	占比/ %	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2000—2020
气候调节	17.74	11.26	17.71	11.25	17.58	11.22	17.44	11.19	17.43	11.19	-0.02	-0.14	-0.14	-0.01	-0.31
气体调节	17.59	11.16	17.54	11.14	17.38	11.09	17.24	11.06	17.25	11.08	-0.04	-0.16	-0.14	0.00	-0.34
水文调节	19.93	12.65	19.89	12.64	19.70	12.58	19.54	12.54	19.54	12.55	-0.04	-0.19	-0.16	0.00	-0.39
土壤保持	20.97	13.31	20.86	13.25	20.56	13.12	20.37	13.07	20.45	13.13	-0.11	-0.30	-0.19	0.07	-0.53
食物生产	21.61	13.72	21.47	13.64	21.06	13.44	20.83	13.37	20.96	13.46	-0.15	-0.41	-0.23	0.13	-0.65
淡水供应	12.36	7.85	12.41	7.88	12.39	7.91	12.31	7.90	12.24	7.86	0.05	-0.02	-0.09	-0.07	-0.12
文化娱乐	12.38	7.86	12.51	7.94	12.81	8.17	12.94	8.30	12.82	8.23	0.13	0.30	0.13	-0.12	0.43
提供景观美学	17.54	11.13	17.61	11.18	17.74	11.32	17.76	11.40	17.67	11.35	0.07	0.13	0.02	-0.09	0.14
自然遗产 & 自然多样性	17.41	11.05	17.44	11.07	17.46	11.14	17.42	11.18	17.37	11.15	0.03	0.02	-0.04	-0.05	-0.04

2.2.2 县域尺度武汉都市圈ESV时空变化特征 根据ESV计算结果,利用ArcGIS将武汉都市圈48个县域地区的ESV总量以定义间隔2亿元进行分级显示(图2,图3)。从时间上看,单个地区20年间对比变化小;从空间分布上看,48个县域地区的ESV存在明显的分异特征。整体上,武汉都市圈ESV以武汉市为中心向外圈层递增,东北和东南部贡献显著;具体到县域按五年平均值看(图3),麻城市和阳新县对都市圈ESV贡献最大,江汉区、硚口区最小。麻城市拥有大别山余脉等丰富的林地资源,阳新县拥有莲花湖、仙岛湖湿地资源等。二者有着生态用地格局丰富且稳定、城市化压力相对较小、生态系统完整性较强的空间优势,是未来生态空间格局优化与差异化管控的关键地区。江汉区、硚口区二者作为武汉市中心城区,是高度建成区,几乎被建设用地所覆盖,且生态用地比例极低,导致其提供的生态系统服务功能收效甚微。从时空分布来看,20年间减少最多的是江夏区、洪山区,增加最多的是仙桃市和黄梅县。江夏区是武汉“光谷南延”核心承载区;作为武汉市副中心的洪山区是武汉面积最大的中心城区,是高校密集区和科技园区建设区。二者20年间均出现城市扩张、交通网络延伸、产业极化等现象。仙桃市作为江汉平原“粮仓”,未被纳入武鄂黄黄优先发展区,避免了高强度开发压力,生态本底得以保留。黄梅县位于鄂皖交界,受武汉辐射较弱,保持低开发强度。

2.2.3 格网尺度ESV变化格局 利用GIS格网尺度法划分1 km×1 km格网,对武汉都市圈ESV空间格局4个阶段变化进行可视化处理(图4)。总体来说,武汉都市圈内绝大多数县域ESV减少。2000—2005年,ESV变化相对较小,减少区域主要集中在洪山区、江夏区等市区及小部分经济发展较快的县域。2005—2010年,部分地区ESV明显正增长,正增长的区域集中在大悟县、仙桃市。2010—2015年武汉都市圈48个地区皆出ESV减少的情况,主要分布江夏区、咸安区。城市建设沿武汉市中心圈层往外辐射。2015—2020年城市内部及周边大量ESV恢复。其中黄陂区、咸安区、赤壁市等城市中心区域的ESV增多。鄂州市的鄂城区、黄冈市的麻城市在内的部分地区ESV依然持续减少。4个阶段的ESV变化动态表明,武汉都市圈发展模式由增长优先到生态优先的转变。

### 2.3 武汉都市圈ESV权衡/协同分析

对武汉都市圈生态系统服务功能之间的协同与权衡关系进行分析(图5),武汉都市圈ESV共36种组合之间存在显著的相关性特征( $p$ 值全部 $<0.01$ ),体现出生态系统内部各服务功能间存在紧密的结构性耦合特征。协同关系占据主导,其中30种为协同关系,6种为权衡关系。调节服务内部(气候调节、气体调节、水文调节、土壤保持)之间呈现出高度协同关系,相关系数均在0.81以上,表明调节功能整体协调、联动性强。文化服务内部(文化娱乐、景观美学

和自然遗产)之间也表现出显著协同,尤其是自然遗产与景观美学之间的相关性高达0.98。土壤保持虽与其他服务间都为协同关系,但相关系数差距较大。供给服务中的食物生产与多个生态系统服务(文化

娱乐、景观美学和气候调节等)呈现出显著的权衡特征。综合来看,武汉都市圈ESV呈现出调节服务、文化服务的内部高协同和食物生产与文化服务高度权衡的结构特征。

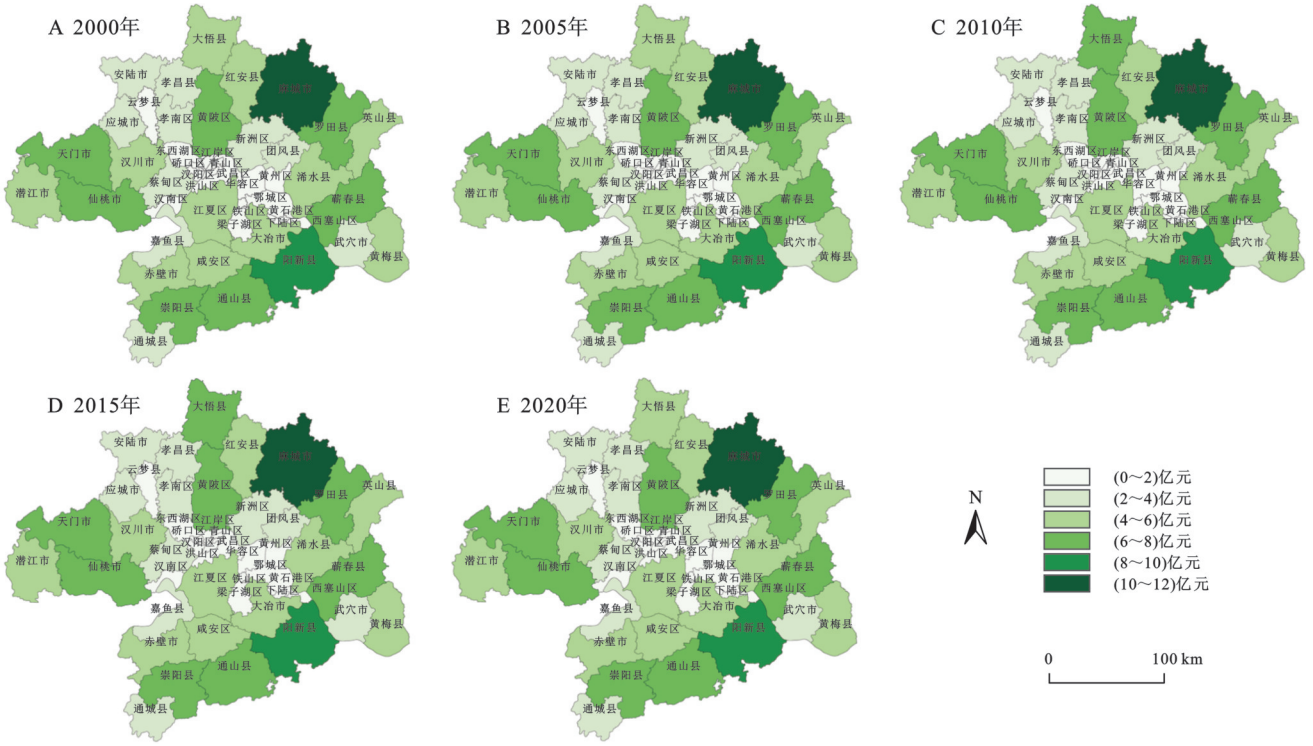


图 2 武汉都市圈县域单元ESV空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ESV in county units in Wuhan metropolitan area

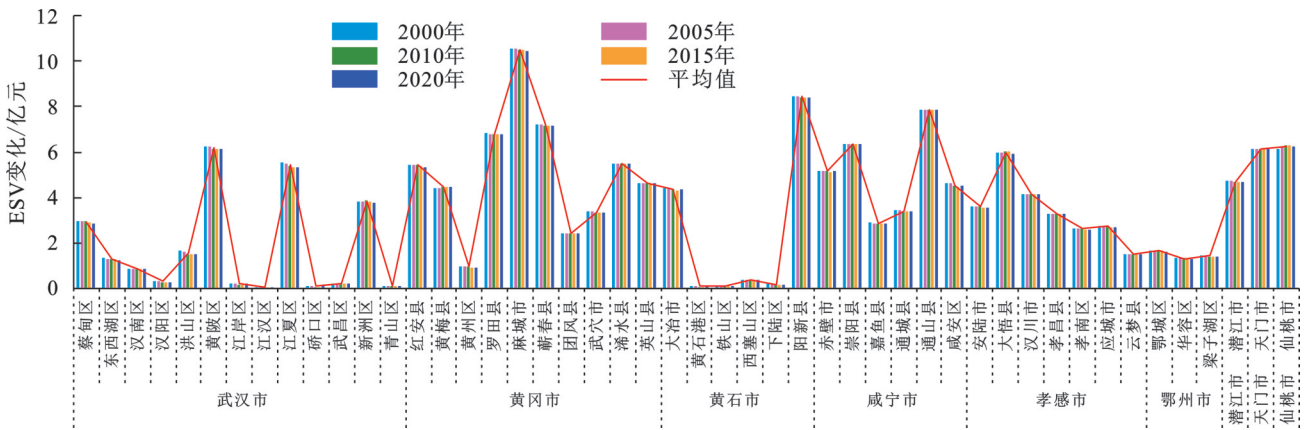


图 3 武汉都市圈县域单元ESV变化

Fig. 3 Changes in ESV of county units in Wuhan metropolitan area

2.4 武汉都市圈ESV空间分异驱动力分析

ESV空间格局实际是由多种驱动因子之间复杂的相互作用而共同形成的。驱动因子的选择遵循理论关联性、区域特殊性与数据可量化原则,根据武汉都市圈实际情况,结合文献分析与数据可获得性,从自然因子和社会经济因子两个维度选取驱动因子对ESV的变化进行评价<sup>[27-28]</sup>。其中自然方面选择了年均温度( $X_1$ )、年降水总量( $X_2$ )、高程( $X_3$ )、植被覆盖度( $X_4$ )、土壤类型( $X_5$ )、地表温度( $X_6$ )6个驱动因子,社会经济方

面选择了地区生产总值( $X_7$ )、第二产业产值( $X_8$ )、第三产业产值( $X_9$ )、人口密度( $X_{10}$ )、夜间灯光指数( $X_{11}$ )、到铁路距离( $X_{12}$ )6个驱动因子,共12个因子。

所有因子与ESV的形成机制存在明确理论关联,涵盖从自然本底(高程、植被覆盖度)到社会经济胁迫(GDP、夜间灯光)的完整作用路径;紧密结合武汉都市圈“江河交汇、平原丘陵相间”的地域特色,突出交通廊道(距铁路距离)等典型城市群特征,形成一个兼具理论完备性、地域特色与数据可靠性的驱动因子体系。

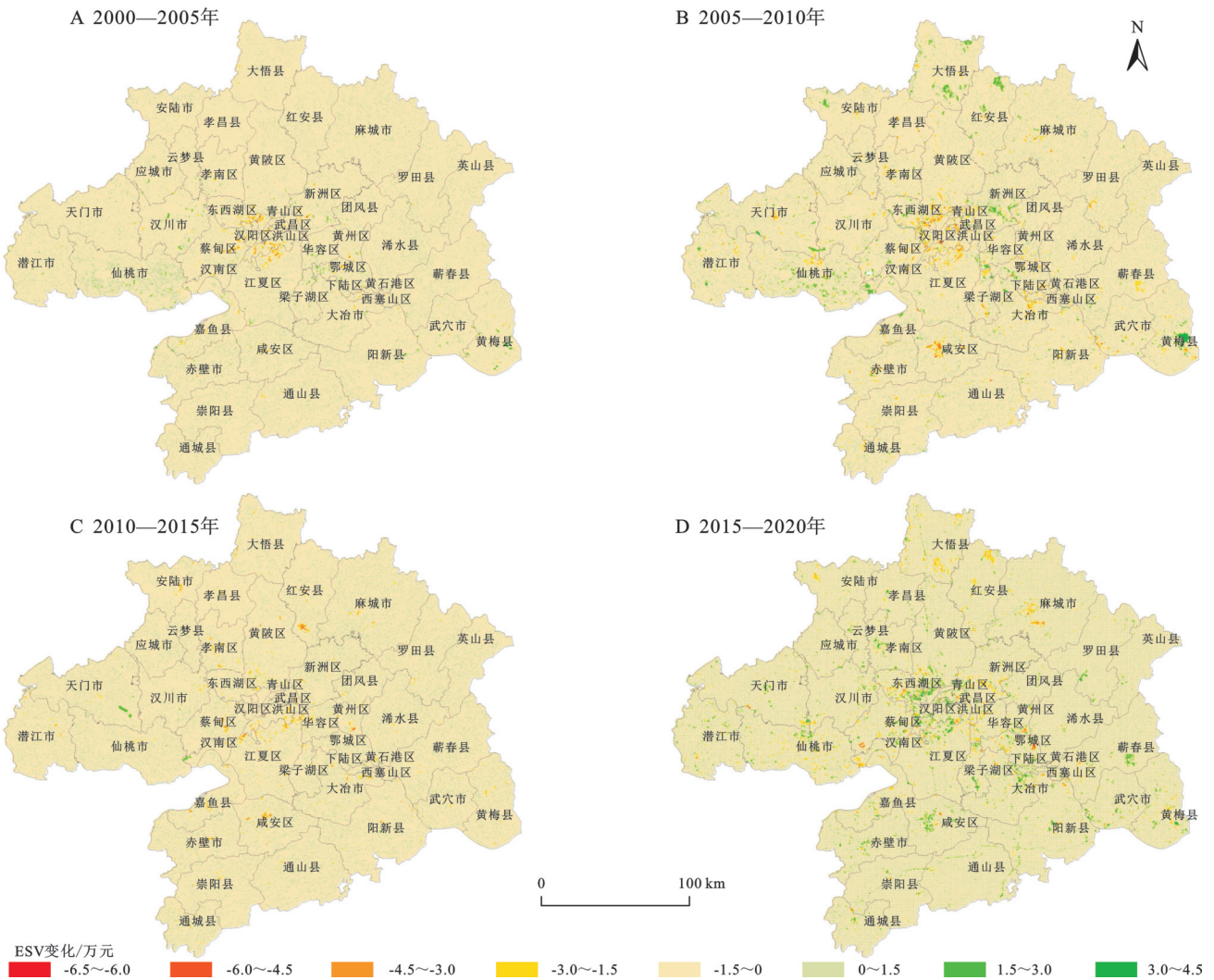


图4 武汉都市圈县域ESV空间变化

Fig. 4 Spatial change of ESV in counties in Wuhan metropolitan area

2.4.1 交互因子探测 从交互作用探测结果来看(图6),研究区域内驱动因子交互作用的解释力明显高于单个因子对武汉都市圈ESV空间分布格局异质性的解释力。各因子的驱动作用呈现出非线性增强、双因子增强、少部分的单因子非线性减弱和非线性减弱的作用效果。

2000年高程( $X_3$ )与地区生产总值( $X_7$ )的交互作用解释力最强(0.79)。高程( $X_3$ )与第二产业产值( $X_8$ )、第三产业产值( $X_9$ )呈明显非线性增强作用。2005年土壤类型( $X_5$ )与人口密度( $X_{10}$ )的交互作用解释力最强(0.87)。人口密度( $X_{10}$ )与高程( $X_3$ )、植被覆盖度( $X_4$ )、地表温度( $X_6$ )等自然因子呈显著双因子增强作用,人口密度的增长与自然环境要素共同作用显著影响了ESV。2010年高程( $X_3$ )与人口密度( $X_{10}$ )的交互作用解释力最强,为0.83。夜间灯光指数( $X_{11}$ )与自然和社会经济因子的交互作用结果均呈现双因子增强。2015年第二产业( $X_8$ )等8个因子与植被覆盖度( $X_4$ )的交互作用呈现非线性减弱。当 $X_8$ 等

单独作用对ESV有较强的贡献,但与 $X_4$ 共同作用时,由于相互抵消、竞争或制约,导致交互作用削弱,表明城市化、产业发展等对ESV的作用增强使得植被覆盖度在调节生态系统服务时的作用被削弱。2015年高程( $X_3$ )与人口密度( $X_{10}$ )的交互作用解释力最强,为0.84。2020年因子间的交互作用全部为加强,反映了自然与社会经济因子的深度耦合及其对生态系统的非线性影响。总体上看,20年间自然因素高程( $X_3$ )与社会经济因素地区生产总值( $X_7$ )、人口密度( $X_{10}$ )等多个因子交互作用解释力均较强。

2.4.2 单因子探测 采用最优参数地理探测器的单因子探测识别对武汉都市圈ESV空间异质性的解释力(表8)。本研究根据研究区大小创建了 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的渔网,提取渔网中心点的像元值,并剔除无效值。12个驱动因子都通过了多重共线性检验, $q$ 值越大,说明因子影响耦合协调度的解释力越强<sup>[29]</sup>。其中,人口密度( $X_{10}$ )、高程( $X_3$ )、植被覆盖度( $X_4$ )对ESV空间异质性解释力最强,平均解释率最少的是到铁路的距离( $X_{12}$ )。



表 8 驱动因子探测结果( $q$  值)  
Table 8 Detection results of driving factors ( $q$  value)

影响因素	解释变量	$q$ 值					平均值
		2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	
自然因素	年均温度( $X_1$ )	0.30	0.23	0.26	0.37	0.28	0.29
	年降水总量( $X_2$ )	0.21	0.32	0.21	0.26	0.25	0.25
	高程( $X_3$ )	0.50	0.51	0.54	0.54	0.45	0.51
	植被覆盖度( $X_4$ )	0.37	0.50	0.55	0.72	0.37	0.50
	土壤类型( $X_5$ )	0.36	0.35	0.35	0.35	0.33	0.35
	地表温度( $X_6$ )	0.27	0.26	0.25	0.33	0.42	0.30
人类活动因素	地区生产总值( $X_7$ )	0.39	0.35	0.40	0.35	0.29	0.36
	第二产业产值( $X_8$ )	0.15	0.25	0.22	0.22	0.17	0.20
	第三产业产值( $X_9$ )	0.11	0.18	0.17	0.41	0.19	0.21
	人口密度( $X_{10}$ )	0.51	0.62	0.63	0.64	0.58	0.60
	夜间灯光指数( $X_{11}$ )	0.20	0.30	0.33	0.33	0.37	0.31
	到铁路距离( $X_{12}$ )	0.12	0.11	0.11	0.24	0.26	0.17

在自然因素中,高程( $X_3$ ) $q$ 值长期稳定(0.45~0.54)。植被覆盖度( $X_4$ ) $q$ 值波动幅度最大,在2015年达到峰值0.72,2020年骤降至0.37。在社会经济因素中,第三产业产值( $X_9$ )2015年 $q$ 值突增至0.41,2020年骤降至0.19。人口密度( $X_{10}$ ) $q$ 值持续上升(2000年的0.51到2015年的0.64),2020年略降至0.58。夜间灯光指数( $X_{11}$ ) $q$ 值稳步上升(2000年的0.20至2020年的0.37),反映持续增强的影响力。到铁路的距离( $X_{12}$ )虽解释力相对较弱,但 $q$ 值从2000年的0.12升至2020年的0.26,后期增长显著。在12种因子中,人口密度( $X_{10}$ )、高程( $X_3$ )长期主导,夜间灯光指数( $X_{11}$ )影响力持续增强,反映城镇化对ESV的胁迫效应。

### 3 讨论

#### 3.1 武汉都市圈ESV权衡/协同关系分析

武汉都市圈生态系统服务之间呈现出高度的结构性耦合特征。整体上,以调节服务与文化服务的强协同为主导,自然生态系统在发挥气候、水文等调节功能的同时,其本身也构成了具有人文价值景观资源。从具体服务类型看,调节服务内部表现出显著的协同关系,这种协同性源于各类调节服务把完整的自然生态系统作为空间载体,调节服务之间存在明显的联动机制,如植被在改善土壤保持的同时增强水文调节与气候调节。文化服务内部同样呈现明显的协同关系,尤其是自然遗产与景观美学的相关性,具有遗产价值的自然景观往往兼具极高的美学品质,在空间分布和功能表现上具有高度一致性。土壤保持虽与其他服务均呈协同关系,但与文化娱乐服务的关联性较弱,二者生态功能作用和空间分布差异明显,土壤保持主要发挥生态调节作用,且土

壤保持重点区域多位于生态修复区和农林地,而文化娱乐服务更多依赖人类活动和景观环境,文化娱乐区域集中于风景区和滨水空间,空间异质性进一步削弱了二者的直接关联。

供给服务中的食物生产与其他服务之间存在明显的权衡关系,尤其是对文化与调节类服务的负面影响突出,这一结果揭示了区域土地利用中的结构性矛盾:农业扩张通过侵占自然生态空间,不仅直接削弱了生态调节功能,还降低了区域的美学与游憩价值,反映了当前土地利用中资源分配与生态功能维护之间的深层矛盾。

基于权衡/协同分析,武汉都市圈生态系统服务并非孤立存在,而是形成了以调节服务与文化服务协同为核心、食物生产与多类服务权衡为矛盾的网络化结构,强调了从系统角度理解生态功能的必要性。武汉都市圈在生态系统管理中应当确立协同增益、权衡调控的治理思路。需要通过保护连片自然生态空间来充分发挥其调节文化服务的协同增益效应,同时重点优化农业生产空间布局,发展生态农业,建立跨区域生态补偿机制,从而系统性地缓解食物生产与其他功能间的冲突,推动区域土地利用向多功能协同方向整体发展。

#### 3.2 武汉都市圈ESV驱动因素

3.2.1 核心驱动因子识别 根据地理探测器对武汉都市圈ESV的单因子探测结果,反映以下结果:自然因素体现出全域性、稳定性的驱动特征。高程( $X_3$ )对ESV的影响最高且稳定,地形条件在区域空间格局演变中发挥着基础约束作用。表明尽管武汉都市圈经历快速城镇化,其“东高西低”的格局通过限制开发潜力、约束开发强度等维持ESV空间分异格局。

植被覆盖度( $X_4$ )虽受城市化影响,但仍维持较高覆盖率,成为ESV的核心支撑。其剧烈波动(2015年峰值0.72,2020年0.37)体现了生态系统对人类活动干扰与政策调控的响应。《关于加快推进生态文明建设的意见》等推动植被恢复的生态修复措施,能够在短期内通过干预迅速产生成效。而社会经济因素有时间滞后效应,产业扩张、铁路建设、污染扩散等对ESV的负面影响需要较长时间累积。降水( $X_2$ )、土壤类型( $X_5$ )等因子通过提供水资源等基础生态功能,决定了ESV的本底值,而社会经济更多是在此基础上的变动。

社会经济对武汉都市圈ESV有局部性和阶段性影响。第三产业产值( $X_9$ )的解释力在2015年突增(0.41)后2020年骤降(0.19),这一波动反映出服务业发展和ESV关系的阶段性特征。生产性服务业不断向中心城区高度聚集,对土地利用和生态空间产生置换效应,增强了解释力。而2020年的下降则可能源于产业空间向外围扩散、业态绿色转型、新冠疫情冲击等多重因素的共同作用。人口密度( $X_{10}$ )、夜间灯光( $X_{11}$ )的解释力在2000—2015年持续上升,清晰表明城市化对ESV的胁迫影响不断增强。到铁路距离( $X_{12}$ )的解释力虽弱,但后期显著增强,交通基础设施的生态效应逐渐凸显。2014年随着宜万铁路正式通行动车,以武汉为中心的中国高铁稠密的米字网正式形成,铁路网络的完善不仅改变着区域可达性格局,更通过促进沿线土地开发和资源流动,间接影响着生态系统。

自然因子的平均解释力( $q=0.37$ )高于社会经济因子( $q=0.31$ ),社会经济因子的影响高度集中于城市建成区,而自然因子(如高程、植被)的作用覆盖全域,导致自然因子整体解释力更广。武汉都市圈ESV仍高度依赖自然条件的支撑,社会经济尚未完全主导ESV的空间格局。这一结果是生态保护政策的成效体现,需警惕快速城市化可能带来的阈值突破风险,社会经济因子的解释力可能持续增强。应坚持“自然为本、人文为用”的协同治理路径,在通过生态红线等刚性管控手段维系自然因子基础功能的同时,积极推进产业生态化转型与低影响开发,引导社会经济活动与区域自然本底相协调。应充分利用自然系统对政策干预响应迅速的特点(如植被恢复工程的即时效应),通过系统性生态修复提升生态韧性。针对社会经济活动所具有的滞后性生态影响,构建长期监测与动态评估体系,在治理过程中,应注重短期内加强修复与增效,长期则通过调控来减少生态压力,在动态发展中实现自然基础与社会经济的协同平衡。

3.2.2 交互作用的识别 最高解释值均出现在自然因子与社会经济因子间的共同交互作用,自然与社

会经济的深度耦合是ESV空间分异的核心驱动力。从作用机制来看,自然条件为社会经济提供空间载体,而社会经济通过土地利用变化反作用于自然系统,形成非线性反馈。自然因子提供约束框架,社会经济主导动态变化。降水( $X_2$ )、高程( $X_3$ )等因子通过山地避让、防洪等限制开发潜力,划定生态安全底线;社会经济发展通过填湖造地、地下空间开发等技术手段不断突破自然边界。从时序演变来看,20年间高程( $X_3$ )与人口密度( $X_{10}$ )、地区生产总值( $X_7$ )等社会经济因子的交互作用持续保持较强的解释力。地形条件通过约束城市扩张,与区域经济发展和人口集聚过程形成了稳定的耦合机制。低海拔区域由于地形条件适宜,成为经济和人口集聚的重点区域,但也因此承受更大的生态压力。

交互作用结果同样也是政策干预与经济动态博弈。这一特征在土壤类型( $X_5$ )与第二产业产值( $X_8$ )的交互作用中表现得尤为明显。二者的交互作用结果5个时间节点间均增强,在2013年国务院办公厅发布《近期土壤环境保护和综合治理工作安排》这一关键政策节点后,交互作用的解释力出现提升。该政策框架明确了我国土壤环境保护的阶段目标,提出到2020年建成国家土壤环境保护体系,实现全国土壤环境质量的显著改善。各地政府加强了对工业用地的规划管理,限制高污染企业,同时鼓励生态友好型产业(高端制造、新能源产业)向适宜的土壤类型区域集聚,提高土地资源利用效率。这种政策引导下的产业空间重构,保障了区域经济发展的持续需求,强化了土壤类型对产业布局的生态约束作用,增强了二者的交互解释力。

未来的生态治理应摒弃单一要素管理思维,转向注重自然与社会经济因子协同作用的系统治理。通过建立基于多元要素融合的空间管控体系,在保障经济发展的同时维护生态系统稳定性,推动区域可持续发展。

## 4 结论

(1) 武汉都市圈整体格局呈现“中部农田环绕城市群、外围山林水系镶嵌”的圈层结构。20年间快速城市化过程中,建设用地无序扩张,耕地、林地大幅减少,这些变化集中反映出“城市需地、农业占地、生态失地”的矛盾现状。

(2) 武汉都市圈ESV中食物生产和土壤保持功能占据主导地位。九大功能中,减少量最多的是食物生产,文化和景观美学功能价值总体增多,反映了生态系统服务功能从“生产”向“服务”的转型。

在县域尺度上,武汉都市圈ESV以武汉市为中心向外圈层递增,东北和东南部贡献显著。在网格尺度上,2005—2010年这个阶段的ESV变化最明显,是城镇化与生态保护间高强度的动态博弈结果。2015—2020年ESV恢复最明显,市中心及周边地区大量ESV恢复,反映出生态保护政策的有力推进。4个阶段的ESV变化动态表明,武汉都市圈发展模式由增长优先到生态优先的转变。

(3) 武汉都市圈ESV以调节服务和文化服务之间的显著协同关系为主,体现出生态功能整体协调、结构稳定。食物生产与多项服务存在明显权衡关系,需在土地利用与生态保护之间实现功能平衡与空间优化。

(4) 武汉都市圈的ESV仍高度依赖自然条件的支撑,社会经济尚未完全主导ESV的空间格局。自然与社会经济的深度耦合是ESV空间分异的核心驱动力;自然与社会经济因子的交互作用持续主导ESV空间分异;武汉都市圈的ESV演变是“自然承载力框架内的人类能动性重塑”的结果。这一现象警示,若仅依赖单纯保护植被或限制GDP增长等单一因子的管理策略,将难以应对系统性生态风险。构建以“自然—经济—政策”为核心的三元协同机制,强化生态红线的刚性约束、提升政策协同效能与动态管理能力,保障武汉都市圈生态系统服务功能的稳定与提升。在发展中动态平衡生态保护与经济增长,避免人地关系突破不可逆的临界阈值,推动自然保护与经济发展的制度协同。

#### 参考文献(References):

- [1] 曹淑芬,齐善忠. 济南市2001—2020年土地利用动态变化时空分异特征研究[J]. 山东师范大学学报:自然科学版,2025,40(1):81-88.  
Cao S F, Qi S Z. Spatiotemporal differentiation characteristics of dynamic land-use changes in Jinan city from 2001 to 2020 [J]. Journal of Shandong Normal University: Natural Sciences Edition, 2025,40(1):81-88.
- [2] 张斌,李璐,夏秋月,等. 基于土地利用的武汉都市圈生态系统服务权衡/协同分析[J]. 水土保持研究,2022,29(4):377-386,393.  
Zhang B, Li L, Xia Q Y, et al. Trade off/synergy analysis of ecosystem services in Wuhan city circle based on land use [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):377-386,393.
- [3] 田文涛,都沁军. 河北省生态系统服务权衡协同关系评估与预测[J]. 环境科学,2025,46(10):6378-6392.  
Tian W T, Du Q J. Assessment and prediction of trade-offs and synergies of ecosystem services in Hebei Province [J]. Environmental Science, 2025,46(10):6378-6392.
- [4] 曹梦莹. 武汉都市圈耕地生态安全水平时空演变及影响因素研究[D]. 武汉:武汉大学,2023.  
Cao M Y. Spatio-temporal evolution and influencing factors of cultivated land ecological security level in Wuhan metropolitan area[D]. Wuhan: Wuhan University, 2023.
- [5] 俞培孟. 武汉都市圈蓝绿空间生境-调节-游憩服务权衡协同关系及优化研究[D]. 武汉:华中农业大学,2024.  
Yu P M. Habitat-regulation-recreation services' trade-off/synergy relationships and optimization of blue-green space in Wuhan metropolitan area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [6] 路亚方. 武汉都市圈湿地生态系统服务变化及情景模拟[D]. 武汉:华中农业大学,2022.  
Lu Y F. Change and scenario simulation of wetland ecosystem services in Wuhan metropolitan area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [7] 兰永真,孙特生,李韦韦. 陇东黄土高原农田生态系统服务及其权衡协同关系[J]. 农业工程学报,2023,39(12):236-244.  
Lan Y Z, Sun T S, Li W W. Trade-offs and synergies of farmland ecosystem services in Loess Plateau: a case study of Longdong Region, Northwest China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(12):236-244.
- [8] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [9] 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.
- [10] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013,165:6-18.
- [11] 霍思高,黄璐,严力蛟. 基于SolVES模型的生态系统文化服务价值评估:以浙江省武义县南部生态公园为例[J]. 生态学报,2018,38(10):3682-3691.  
Huo S G, Huang L, Yan L J. Valuation of cultural ecosystem services based on SolVES: a case study of the South Ecological Park in Wuyi County, Zhejiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(10):3682-3691.
- [12] 朱治州,钟业喜. 长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(7):1520-1530.  
Zhu Z Z, Zhong Y X. Spatio-temporal evolution of land use and ecosystem service value in Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(7):1520-1530.
- [13] 汪东川,孙志超,孙然好,等. 京津冀城市群生态系统服务价值的时空动态演变[J]. 生态环境学报,2019,28

- (7):1285-1296.
- Wang D C, Sun Z C, Sun R H, et al. Spatial-temporal dynamic evolution of ecosystem service value in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(7):1285-1296.
- [14] 姜春前,任引,张旭东,等.南方低山丘陵区山水林田湖草沙系统治理技术与示范[J].*生态学报*,2025,45(6):2932-2937.
- Jiang C Q, Ren Y, Zhang X D, et al. Technology and demonstration of comprehensive management of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands and deserts in the hilly and low mountainous region of Southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(6):2932-2937.
- [15] 钱红运,陈爽.特大城市新区土地利用变化对生态系统服务权衡-协同关系影响:以南京江北新区为例[J].*生态与农村环境学报*,2023,39(9):1123-1132.
- Qian H Y, Chen S. Effects of land use change on trade-off-synergy relationship of ecosystem services in new area of megacity: the case of Nanjing Jiangbei new area [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(9):1123-1132.
- [16] 王诗琦,刘焱序,李琰,等.近20年黄土高原生态系统服务研究进展[J].*生态学报*,2023,43(1):26-37.
- Wang S Q, Liu Y X, Li Y, et al. Research progress on the ecosystem services on the Loess Plateau during the recent 20 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(1):26-37.
- [17] 杨光宗,吕凯,李峰.基于格网尺度的南昌市土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J].*中国土地科学*,2022,36(8):121-130.
- Yang G Z, Lyu K, Li F. Spatial and temporal correlation analysis of land use change and ecosystem service value in Nanchang City based on grid scale [J]. *China Land Science*, 2022,36(8):121-130.
- [18] 王婧.耕地多功能供需风险的多尺度评估:以武汉都市圈为例[D].武汉:华中农业大学,2024.
- Wang J. Multiscale assessment of supply-demand risk for multifunctional cultivated land [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [19] 彭凯锋,蒋卫国,邓越.武汉都市圈湿地受损程度识别及驱动因素分析[J].*自然资源学报*,2019,34(8):1694-1707.
- Peng K F, Jiang W G, Deng Y. Identification of wetland damage degree and analysis of its driving forces in Wuhan Urban Agglomeration [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019,34(8):1694-1707.
- [20] 黄贞斌,李红波.武汉都市圈土地利用及生态系统服务价值时空演变多情景模拟[J].*长江流域资源与环境*,2023,32(12):2542-2557.
- Huang Z B, Li H B. Multi-scenario simulation of temporal-spatial evolution of land uses and ecosystem services in Wuhan urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023,32(12):2542-2557.
- [21] 王译.基于改进CLUE-S模型的土地利用变化预测研究及景观格局分析:以福建省长乐区为例[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
- Wang Y. Research on land use change prediction based on improved CLUE-S model and landscape pattern analysis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [22] 罗海平,宋焱,彭津琳.基于Costanza模型的我国粮食主产区生态服务价值评估研究[J].*长江流域资源与环境*,2017,26(4):585-590.
- Luo H P, Song Y, Peng J L. Evaluation on esv of major grain-producing areas in China: The empirical research based on costanza model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017,26(4):585-590.
- [23] 赵育恒,曾晨.武汉都市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素[J].*生态学报*,2019,39(4):1426-1440.
- Zhao Y H, Zeng C. Analysis of spatial-temporal evolution and factors that influences ecological service values in Wuhan Urban Agglomeration, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(4):1426-1440.
- [24] Li R N, Zheng H, O'Connor P, et al. Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs [J]. *Science Advances*, 2021, 7(14): eabf8650.
- [25] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [26] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5):593-610.
- [27] 徐秋蓉,郑新奇.一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法[J].*测绘学报*,2015,44(S1):96-101.
- Xu Q R, Zheng X Q. Analysis of influencing mechanism of urban growth using geographical detector[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015,44(S1):96-101.
- [28] 李紫健,陈江平,张伟康,等.湖北省生态系统服务价值演变及影响因素分析[J].*测绘科学*,2023,48(1):245-257.
- Li Z J, Chen J P, Zhang W K, et al. Analysis of evolution and influencing factors of ecosystem service value in Hubei Province [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023,48(1):245-257.
- [29] 祁玉馨,赵聪聪,申沛鑫,等.哈尔滨市土壤保持服务价值时空演变及其驱动力[J].*水土保持通报*,2024,44(1):357-367.
- Qi Y X, Zhao C C, Shen P X, et al. Spatiotemporal evolution of soil conservation function value and its driving forces in Harbin City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(1):357-367.