

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.027; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.027.

姚侠妹, 盛雨恬, 祁慧敏, 等. 模拟多情景下淮河生态经济带土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 300-311.

Yao Xiamei, Sheng Yutian, Qi Huimin, et al. Simulating land use changes and spatial response of ecosystem service value in the Huaihe River Eco-Economic Belt under multiple scenarios[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 300-311.

# 模拟多情景下淮河生态经济带土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应

姚侠妹<sup>1</sup>, 盛雨恬<sup>1</sup>, 祁慧敏<sup>1</sup>, 李蕙竹<sup>1</sup>, 姚晓洁<sup>1</sup>, 偶春<sup>2</sup>

(1. 安徽建筑大学 建筑与规划学院, 合肥 230601; 2. 阜阳师范大学 生物与食品工程学院, 安徽 阜阳 236037)

**摘要:** [目的] 模拟淮河生态经济带在多情景下的土地利用变化, 分析这些变化对生态系统服务价值产生的空间响应及影响, 为实现土地资源利用和社会经济协调可持续发展提供科学依据。[方法] 以淮河生态经济带为研究对象, 基于 2000 年、2010 年和 2020 年三期土地利用数据, 通过耦合 MOP-PLUS 模型模拟 2040 年自然发展、经济优先和低碳发展情景下的土地利用演变规律。并计算各情景下生态系统服务价值(ESV), 定量分析 ESV 的时空动态特征。再根据格网尺度的视角剖析 ESV 的空间分布态势及其集聚特征和识别潜在的服务提升区域。[结果] (1) 3 种预设情景中, 经济优先情景下的耕地和林地面积减少程度最大, 分别减少 1 342 989 hm<sup>2</sup>, 24 857 hm<sup>2</sup>; 低碳发展情景下林地和水域面积增加程度最大, 分别增加 117 990 hm<sup>2</sup>, 442 451 hm<sup>2</sup>。(2) 在 3 种情景模拟下, 研究区 2040 年 ESV 低碳发展情景(7 291.51 亿元) > 自然发展情景(6 583.59 亿元) > 经济发展情景(6 413.77 亿元)。(3) 低碳发展情景下, 研究区的东北部和西南部的热点以及显著热点增多, 聚集性较强, 而冷点区域主要分布于研究区的中部平原。[结论] 对未来土地利用的科学规划与布局, 是维护并提升生态环境质量不可或缺的根本途径。通过不同情景比对, 低碳发展情景能有效优化土地利用, 显著提升淮河生态经济带的生态系统服务价值, 增强生态服务潜力, 并促进区域生态与经济协调发展。

**关键词:** 低碳; PLUS 模型; 土地利用变化; 生态系统服务; 淮河生态经济带

中图分类号: F301.24; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0300-12

## Simulating land use changes and spatial response of ecosystem service value in the Huaihe River Eco-Economic Belt under multiple scenarios

Yao Xiamei<sup>1</sup>, Sheng Yutian<sup>1</sup>, Qi Huimin<sup>1</sup>, Li Huizhu<sup>1</sup>, Yao Xiaojie<sup>1</sup>, Ou Chun<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. College of Biological and Food Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang, Anhui 236037, China)

**Abstract:** [Objective] Land use changes in the Huaihe River Eco-Economic Belt under multiple scenarios were simulated, and the spatial response and impact of these changes on ecosystem service value were analyzed, providing a scientific basis for achieving coordinated and sustainable development of land resource utilization and social economy. [Methods] Taking the Huaihe River Eco-Economic Belt as the research area, and based on land use data from 2000, 2010, and 2020, the land use evolution patterns under the scenarios of natural development, economic priority, and low-carbon development in 2040 were simulated by the coupled MOP-PLUS model. The ecosystem service value (ESV) under each scenario was calculated, and the spatiotemporal dynamic characteristics of ESV were quantitatively analyzed. Furthermore, from a grid-scale perspective, the spatial distribution of ESV and its aggregation characteristics were analyzed, and areas for potential service enhancement were identified. [Results] (1) Among the three preset scenarios, the economic priority scenario exhibited the largest

收稿日期: 2024-07-09

修回日期: 2024-09-03

接受日期: 2024-09-06

资助项目: 安徽省哲学社会科学规划项目“淮河生态经济带安徽段生态环境分区识别及长效治理策略研究”(AHSKY2023D023)

第一作者: 姚侠妹(1981—), 女, 安徽蚌埠人, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事景观规划与城乡发展研究。E-mail: yaoxiamei@126.com。

通信作者: 偶春(1983—), 男, 安徽合肥人, 教授, 硕士, 硕士研究生导师, 主要从事景观规划与城乡发展研究。E-mail: ouchun\_2007@163.com。

<http://stbcyj.paperonice.org>

reductions in cropland (1 342 989 hm<sup>2</sup>) and forestland (24 857 hm<sup>2</sup>), while the low-carbon development scenario showed the largest increases in forestland (117 990 hm<sup>2</sup>) and water areas (442 451 hm<sup>2</sup>). (2) Under the three scenarios in 2040, the ESV low-carbon development scenario (7.291 51×10<sup>11</sup> Yuan) > natural development scenario (6.583 59×10<sup>11</sup> Yuan) > economic development scenario (6.413 77×10<sup>11</sup> Yuan) in the study area. (3) Under the low-carbon development scenario, the hot spots and significant hot spots in the northeast and southwest of the study area increased, exhibiting strong aggregation, while the cold spots were mainly distributed in the central plains of the study area. [Conclusion] Scientific planning and management of future land use are fundamental ways to maintain and improve the quality of the ecological environment. By comparing different scenarios, low-carbon development scenario can effectively optimize land use, significantly increase the ecosystem service value of the Huaihe River Eco-Economic Belt, enhance the potential of ecological services, and promote the coordinated development of regional ecology and economy.

**Keywords:** low-carbon; PLUS model; land use change; ecosystem service; Huaihe River Eco-Economic Belt

生态系统服务作为联系生态系统和人类社会的桥梁,直观反映生态系统健康状况和人类社会需求<sup>[1]</sup>。随着土地利用强度的持续提升,LUCC模式经历了显著的变迁,对生态系统服务的供给和分配产生了深远的影响,LUCC结构的不平衡严重限制了生态系统服务的价值提升。为了有效处理在经济快速发展过程中所面临的社会及环境压力,模拟未来不同情景下土地利用变化格局,定量分析生态系统服务价值的时空动态特征<sup>[2]</sup>,对区域发展和国土空间优化具有重要战略意义。在生态系统服务价值估算的研究领域中,Costanza等<sup>[3]</sup>于1997年开创性地提出了“当量因子法”,为评估大尺度地区乃至全球范围的生态系统服务价值提供了重要框架。谢高地等<sup>[4]</sup>在这一方法的基础上进行了深入的修正与完善,使之能够更精确地反映不同土地利用类型下各类生态系统服务功能的价值。土地利用情景模拟是评估生态系统服务价值(ESV)对政策变化反映的重要手段,目前主要采用数量模型和空间格局模型两种方法。数量约束模型有马尔可夫链(Markov Chain)、系统动力学(SD)等<sup>[5-6]</sup>。空间约束模型有元胞自动机(CA)模型、未来土地利用模拟(FLUS)模型、斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型、小区域土地利用变化及其效应模型(CLUE-S)等<sup>[7-10]</sup>。这些模型均有不同的侧重点,具体而言,SD模型和Markov Chain以其独特的机制,有效捕捉并模拟动态系统在未来不同时间点的量化结构与配置变化<sup>[11-12]</sup>。在空间模拟与约束分析的框架下,CA模型作为基石,为理解复杂空间系统的动态演变提供了有力工具<sup>[13]</sup>。在此基础上,PLUS模型,则是对既有模型体系的一次重要拓展与深化。该模型不仅克服了CLUE-S及FLUS在转化规则探索与景观动态再现上的局限性,提升了精准识别土地利用变化驱动因子的能力,且增强了在复

杂土地利用演变过程中的精细化的模拟<sup>[14]</sup>。

淮河生态经济带作为中国东部重要的地理与经济单元,其具有独特的地理位置、丰富的自然资源与复杂的生态系统结构。随着《淮河生态经济带发展规划》的深入实施,区域经济的迅速发展引发与环境保护的紧张关系。如何实现区域可持续发展,成为亟待解决的问题。对此本文采用MOP-PLUS模型,通过MOP模型对项目或政策进行优先级排序和资源分配,确保在有限的资源下实现最大化效益;同时,PLUS模型则用于模拟不同政策或项目实施后的土地利用变化,预测其对生态环境的影响。基于此构建3种模拟情景:自然演变、经济优先以及低碳发展情景,量化不同情景下生态系统服务价值,再采用热点分析空间分布态势及其集聚特征。这种综合考量有助于在促进发展的同时,有效实现低碳可持续发展,为实现《淮河生态经济带发展规划》中提出的生态优先、绿色发展理念提供实证依据。深入探讨不同发展路径下土地利用格局的变化趋势及其对生态系统服务价值的潜在影响。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

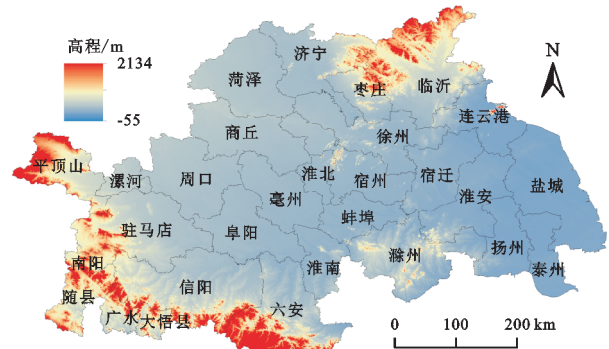
淮河生态经济带作为国家战略的重点区域,其地理范围广泛,跨越5个省份,共计囊括了29个市(县),总面积达24.3万km<sup>2</sup>(图1)。不仅承载着重要的农业生产任务,是国家粮食安全的战略要地,同时也是连接南北、沟通东西的重要交通枢纽和经济走廊。随着《淮河生态经济带发展规划》的深入实施,旨在大力推进绿色发展战略,强化区域间的协调共进,积极探索并创新绿色低碳发展的体制机制,积极推动碳排放权管理。当前淮河生态经济带区域经济的快速发展与生态环境保护之间的矛盾日益凸显。

因此,本研究以淮河生态经济带作为研究区域,分析并预测 3 种情景下未来土地利用在数量与空间布局上的演变趋势。为推动该区域土地利用结构的合理规划与调整,进而为实现生态系统管理的可持续性提供科学参考。

## 1.2 数据来源及预处理

本研究所需数据包括土地利用数据、社会经济数据、气候与环境数据。数据名称及来源如表 1 所示。土地利用数据、土壤类型和年平均降水数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。土地利用数据为矢量数据,运用 ArcGIS 软件将土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地 6 类。道路和水域距离数据来源于(<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>),在 ArcGIS 中运用欧氏距离计算得到。高程数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),坡度与坡向数据基于高程数据在 ArcGIS 中生成。所有数据划分为  $300 \times 300$  m 栅格单元进行处理,转换为 WGS-1984-UTM-Zone-50 N 投影坐标系,且统一行列号。

cn/),坡度与坡向数据基于高程数据在 ArcGIS 中生成。所有数据划分为  $300 \times 300$  m 栅格单元进行处理,转换为 WGS-1984-UTM-Zone-50 N 投影坐标系,且统一行列号。



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号 GS(2020)4623 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

表 1 主要数据及其来源

Table 1 Main data and their sources

数据类型	数据名称	数据来源
土地利用数据	2000年、2010年、2020年土地利用数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
	人口	中国科学院资源环境科学与数据中心
社会经济数据	GDP	中国科学院资源环境科学与数据中心
	距一级道路距离	全国地理信息资源目录服务系统
	距二级道路距离	全国地理信息资源目录服务系统
	距三级道路距离	全国地理信息资源目录服务系统
	距高速距离	全国地理信息资源目录服务系统
	距铁路距离	全国地理信息资源目录服务系统
	距乡道距离	全国地理信息资源目录服务系统
	距县道距离	全国地理信息资源目录服务系统
气候和环境	土壤类型	中国科学院资源环境科学与数据中心
	年平均降水	中国科学院资源环境科学与数据中心
	高程	地理空间数据云
	坡度	由高程生成
	坡向	由高程生成
	距水系距离	全国地理信息资源目录服务系统

## 2 研究方法

### 2.1 基于 MOP 模型的多情景土地利用结构预测

MOP 模型,即“Multi-Objective Programming”(多目标规划)模型,作为一种高效的决策辅助工具,其在土地利用结构优化领域的应用尤为显著。该模型擅长在多个相互关联且可能相互冲突的目标之间寻求最佳的平衡点,从而生成一系列切实有效的决策方案<sup>[15]</sup>。

2.1.1 低碳效益目标 依据孙伟等<sup>[16-17]</sup>所提出的方法论计算。本研究中参考了之前对淮河生态经济带不同土地利用类型的碳排放/吸收能力评估结果,以确定各类用地的碳排放系数。各类土地利用类型的

具体碳排放系数见表 2。

$$\text{Min}F_2 = \sum_{k=1}^n C_k X_k \quad (1)$$

式中: $F_2$ 为碳排放量; $X_k$ 为各类土地利用类型的面积; $C_k$ 为各类土地利用类型的碳排放系数,即每单位面积的土地利用类型  $k$  所产生的碳排放量。

2.1.2 发展情景的设定及约束条件 本研究针对淮河生态经济带的发展趋势与政策导向,模拟 3 种不同的发展情景:自然发展情景、经济优先情景和低碳发展情景。

(1) 自然发展情景。依据 2000—2020 年研究区域土地利用变化的历史轨迹,采用 Markov 链模型对各类土地利用类型的未来面积进行前瞻预测<sup>[18]</sup>。

表2 各土地利用类型对应的碳排放系数  
Table 2 Carbon emission coefficients for each land use type

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
碳排放系数/(m <sup>2</sup> ·a)	0.0422	-0.0578	-0.0021	-0.0252	4.297	-0.0005

(2) 经济优先情景。该情景则依据《淮河生态经济带发展规划》(以下简称《规划》)的约束条件,采用PLUS模型的线性回归分析,整合2000年、2010年及2020年的土地利用图数据,进而构建淮河生态经济带在2000—2020年土地利用转移矩阵(表3)。综合考量既往研究确立的阈值标准与研究区域当前的实际情况,在线性发展情景的基础上,降低建设用地向耕地、水域、林地、草地、未利用地转移的可能性40%,耕地、林地、草地、水域、未利用地转移到建设用地的概率增加40%,10%,20%,10%,50%<sup>[19]</sup>。

(3) 低碳发展情景。鉴于“碳达峰”与“碳中和”双重目标已上升为国家层面的核心战略导向,我们亟需深入挖掘高碳汇土地类型的碳减排潜力。为此,应将降低碳排放量作为核心优化指标,进一步强化对生态用地的保护与恢复,旨在提升区域整体的碳吸收与储存能力。同时,需合理规划并适度增加建设用地的面积,以满足发展需求,但在此过程中,

需要遏制高碳排放型土地利用的无序蔓延,确保发展与减排的双赢局面。为确保多种情景下的未来土地利用变化既符合自然规律又满足政府规划预期,参考前人研究<sup>[20]</sup>的土地利用碳排放研究获取各用地类型的土地碳排放系数,基于2040年自然发展情景和《规划》内容,构建了土地利用预测的约束条件,如表4所示。

表3 2000—2020年土地利用转移矩阵概率  
Table 3 Land use transition probability matrix (2000—2020) %

转移概率	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	93.07	0.99	0.13	0.70	5.11	0.00
林地	8.79	90.78	0.13	0.12	0.18	0.00
草地	38.39	14.41	42.98	0.45	3.72	0.04
水域	16.81	0.23	0.00	77.95	5.00	0.01
建设用地	10.16	0.05	0.01	0.88	88.89	0.00
未利用地	2.46	0.09	0.38	1.70	5.95	89.42

表4 土地利用预测约束条件  
Table 4 Constraints on land use forecasting

约束类型	约束条件/m <sup>2</sup>	说明
1 土地利用总面积约束	$\sum_{i=6}^i t_i = 2.6127 \times 10^{11}$	各类土地利用类型面积的总和应等于研究区的总面积
2 耕地保有量约束	$t_1 \geq 1.6546 \times 10^{11}$	本研究预计未来10 a耕地面积下降速度将减缓,因此以2020年耕地值下浮5%作为耕地下限,设置约束条件
3 林地面积约束	$t_2 \geq 2.3600 \times 10^{10}$	森林作为最大的有机碳库,林地是增加碳吸收的主要源头,以2020年林地面积设为下限,可建立林地面积约束条件
4 草地面积约束	$t_3 \geq 6.4489 \times 10^9$	草地具有良好的水土保持作用,要保证草地面积的基本稳定,保护和合理利用草场资源。根据《规划》草地预计面积为 $6.4489 \times 10^9$ m <sup>2</sup> 作为下限
5 水域面积约束	$t_4 \geq 1.6192 \times 10^{10}$	水域具有较高的生态服务价值,根据规划目标,至2040年,水域面积预计为 $1.6192 \times 10^{10}$ m <sup>2</sup> 。
6 建设用地面积约束	$4.4223 \times 10^{10} < t_5 < 4.8878 \times 10^{10}$	建设用地是各项经济活动的主要载体,预计2040年建设用地面积为 $4.6551 \times 10^{10}$ m <sup>2</sup> 。将建设用地面积变动在预测值的5%作为约束条件
7 未利用地面积约束	$t_6 < 1.6371 \times 10^8$	随着发展对土地需求的不断增加,以及科学技术的逐渐提高,未来未利用地将有很大一部分被开发,面积将逐步减少
8 各用地类型面积约束	$0.95a_k < t_i < 1.05a_k$	优化情景下各类用地面积以自然发展为基准,浮动为5%
9 生态控制区	$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \geq 1.9595 \times 10^{11}$	根据《规划》,2040年淮河生态经济带生态控制区面积应大于总面积的75%

2.2 基于PLUS模型的多情景模拟

PLUS模型是一种前沿的土地利用变化模拟框架,可以提供了一个综合且动态的土地利用模拟方法。该模型的设计旨在提高模拟的精确度和实用性,为土地资源的有效管理和规划提供科学依据<sup>[21]</sup>。该模型基于两期土地利用类型数据,并综合考虑了不同地类的像元数量、转换概率矩阵以及邻域影响权重。以2010年与2020年的土地利用数据,通过不

断调试筛选出包括高程、坡度、坡向、年平均降水量、土壤类型、水系距离、人口分布、GDP水平以及到不同等级道路(一级、二级、三级、高速道路)、铁路、县道和县镇府距离的共计15个驱动因子(图2),用以评估对淮河生态经济带在2010—2020年土地利用的变化态势<sup>[22]</sup>。

运用PLUS的LEAS模块以及Markov Chain,验证结果显示Kappa系数需超过0.75的基准值,则表明

PLUS模型的模拟精度较高,可用于未来淮河生态经济  
济带土地利用情况的模拟。进一步以2040年土地利

用结构的优化目标为导向,预测该区域在2040年的  
土地利用空间分布模式。

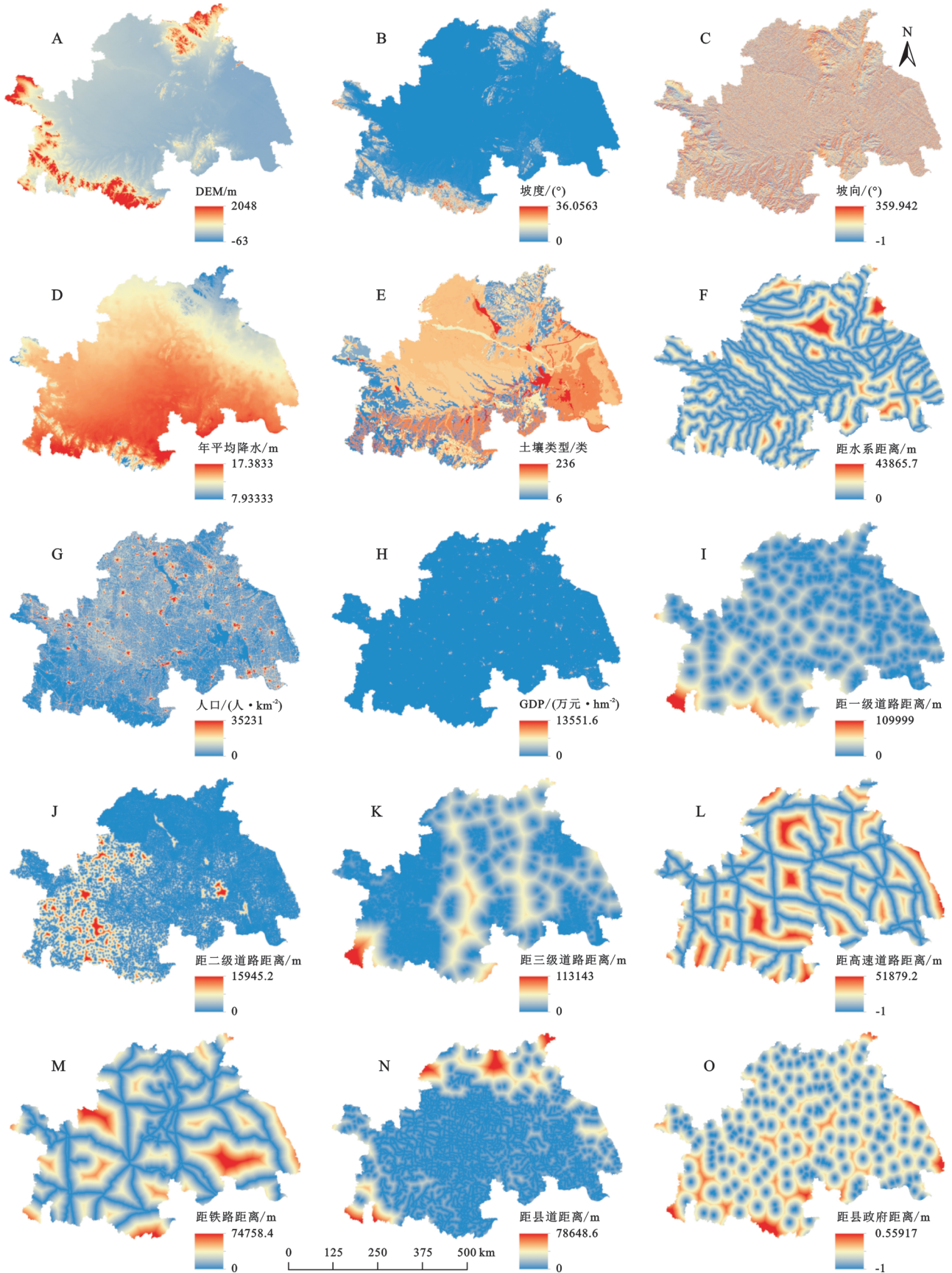


图2 研究区土地利用变化驱动因子

Fig. 2 Driving factors of land use change in the study area

### 2.3 生态系统服务价值评估

生态系统服务价值评估是一种量化的研究方法,旨在明确生态系统为人类社会提供的物质和非物质资源的经济价值。这些服务广泛涵盖了食物供应、水源保障、气候调节、自然景观以及文化遗产等多个方面<sup>[23]</sup>。通过这一评估,可以更好地理解生态系统对人类福祉的重要性,从而推动生态系统的科学管理和有效保护。参照谢高地等的研究方法计算价值当量<sup>[24]</sup>。生态系统的粮食产量价值主要依据淮

河生态经济带农田的五大粮食产量进行计算分别是水稻、小麦、玉米、大豆和薯类,最终确定研究区的价值当量约为2 473.22元/hm<sup>2</sup>,并制定淮河生态经济带各地类单位面积的单项ESV系数表(表5)。生态系统服务价值的计算公式如下:

$$ESV = \sum_{k=1}^n A_k \times VC_k \quad (2)$$

式中:ESV为生态系统服务价值; $k$ 为土地利用类型; $A_k$ 为第 $k$ 类土地利用类型的面积; $VC_k$ 为第 $k$ 类土地利用类型单位面积的生态系统服务价值。

表5 淮河生态经济带生态系统服务价值系数

Table 5 Ecosystem service value coefficients of Huaihe River Eco-Economic Belt

元/(hm<sup>2</sup>·a)

一级类型	二级类型	生态系统服务价值系数					合计
		耕地	林地	草地	水域	未利用地	
供给服务	食物生产	2723.91	651.28	593.57	1619.96	24.73	5622.46
	原料生产	605.94	1483.93	865.63	902.73	74.20	3932.43
	水资源供给	-3227.56	766.70	482.28	13454.34	49.46	11525.23
调节服务	气体调节	2201.17	4888.74	3066.80	3301.76	272.05	13730.52
	气候调节	1150.05	14641.49	8099.81	7283.65	247.32	31422.32
	净化环境	333.89	4286.92	2671.08	11315.00	766.70	19373.59
	水文调节	3697.47	9563.14	5935.74	156394.37	519.38	176110.10
支持服务	土壤保持	1286.08	5960.47	3734.57	4006.62	321.52	15309.26
	维持养分循环	383.35	453.42	284.42	309.15	24.73	1455.08
	生物多样性	420.45	5424.61	3388.32	12885.50	296.79	22415.66
文化服务	美学景观	185.49	2382.54	1496.30	8186.37	123.66	12374.37

### 2.4 ESV热点分析

本研究采用Getis-Ord  $G_i^*$ 统计方法,旨在精准识别淮河生态经济带地区生态服务价值的空间聚类特征,特别是显著的高值与低值区域<sup>[25]</sup>。该方法不仅能够有效识别出这些聚类区域,还能通过可视化手段直观展现其空间分布。当 $G_i^*$ 值趋近于零,表明生态系统服务价值的分布呈现随机性,缺乏显著的聚集趋势;而当 $G_i^*$ 值呈现正值时,该区域被标记为“热点”,显著体现生态系统服务价值高值的集中分布;相反,若 $G_i^*$ 值显示为负,则此区域被识别为“冷点”,显著代表生态系统服务价值低值的集聚。这种分析方法为我们深入理解淮河生态经济带地区ESV的空间分布特征提供了有力的工具, $G_i^*$ 值的计算公式参照高星等<sup>[26]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同情景下土地利用结构预测

不同情景下的土地利用结构预测结果见表6。相比于2020年土地利用现状,在自然发展情景下,耕地、林地、草地面积显著减少,分别降低2.16%,0.07%,0.58%。建设用地和水域面积增加,分别增加2.31%,0.51%。其中耕地和建设用地面积变化较为明显,耕地面积减少565 812 hm<sup>2</sup>,建设用地面积增加603 819 hm<sup>2</sup>。在经济

优先情景下,耕地和建设用地变化速度明显增加,与2020年相比,建设用地扩张5.50%,耕地面积缩减5.14%。研究区林地与草地也在呈现减少趋势,且比自然情景减少得多。在低碳发展情景下,耕地面积的减少和建设面积的扩张趋势得到控制。林地和水域均呈现缓慢增加趋势,林地的面积在持续扩大,其增量为117 990 hm<sup>2</sup>,这一增长体现生态环境保护的积极成效。水域的面积增长量为422 451 hm<sup>2</sup>,在3种不同的情境对比下增长幅度最为突出,凸显水域资源在生态系统中的重要性及其保护的必要性。

### 3.2 基于PLUS模型的土地利用空间分布模拟

3.2.1 土地利用扩张分析 针对2010—2020年淮河生态经济带的土地利用类型数据,运用随机森林算法通过随机采样的方式,在决策树数量为20的条件下,设定采样率为0.01,同时确保训练随机森林(RF)时所使用的特征数量不超过所选取的15个驱动因子。生成各类土地利用类型的发展概率图集(图3),并进行归一化处理(0~1),土地利用类型转换成本矩阵见表7。通过图集分析可以看到建设用地具有显著的发展潜力,其次是耕地。通过分析土地利用扩张的发展概率,了解未来土地利用的可能发展方向,为后续的土地利用空间分布模拟提供重要依据和参考。

表 6 土地利用结构预测  
Table 6 Prediction of land use structure under different scenarios

土地利用类型	2020年土地利用现状		自然演变情景		经济优先情景		低碳发展情景	
	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%
耕地	17416377	66.66	16850565	64.50	16073388	61.52	16545555	63.33
林地	2359971	9.03	2342034	8.96	2335114	8.94	2477961	9.48
草地	797193	3.05	644895	2.47	634298	2.43	757332	2.90
水域	1485675	5.69	1619208	6.20	1579543	6.05	1908126	7.30
建设用地	4051260	15.51	4655079	17.82	5490464	21.01	4422321	16.93
未利用地	16371	0.06	15066	0.06	14040	0.05	15552	0.06
总计	26126847	100	26126847	100	26126847	100	26126847	100.00

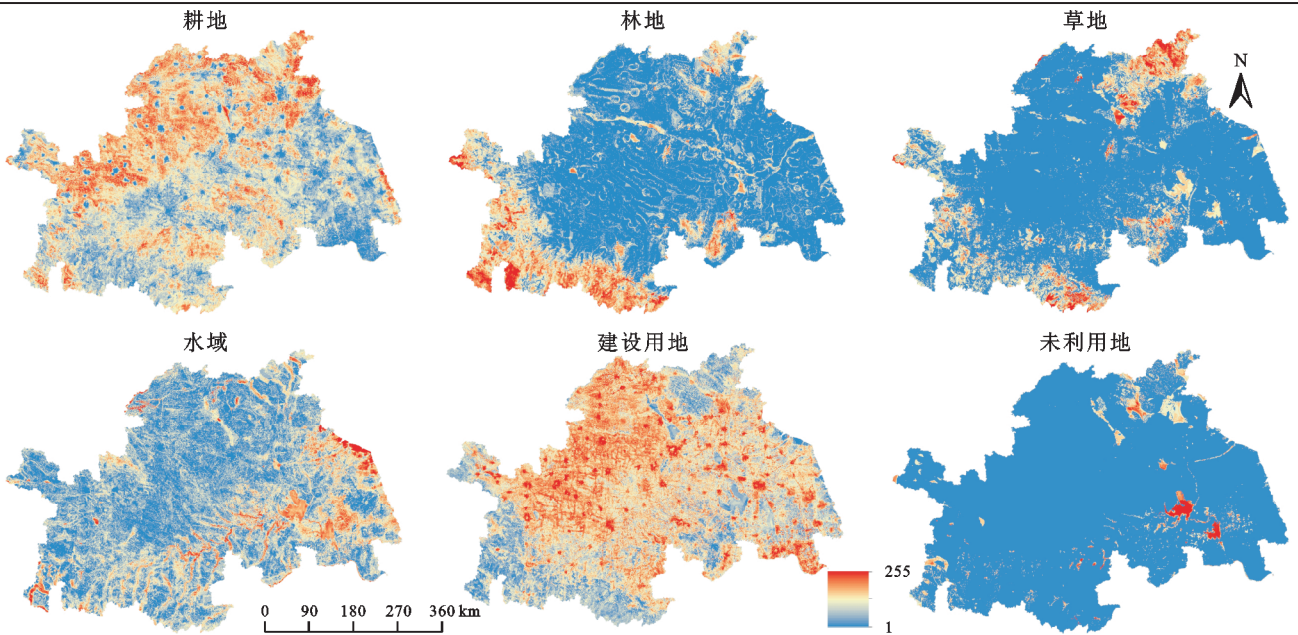


图 3 各用地类型土地发展概率

Fig. 3 Probability atlas of land development for each land use type

表 7 土地利用转换成本矩阵

Table 7 Land use conversion cost matrix

类型	自然演变情景						经济优先情景						低碳发展情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
d	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
e	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:a, b, c, d, e, f分别代表耕地、林地、灌木、草地、水域和建设用地;1=可能转换,0=不可能。

3.2.2 PLUS 模型精度验证 基于 2000—2010 年土地扩张数据图,融入各类土地资源的潜在发展能力进行模拟预测。为了验证模型的可行性,利用 PLUS 模型中的精度验证功能,将 2020 年的模拟土地利用图与实际的 2020 年土地利用图进行比对分析(图 4)。分析结果显示,Kappa 系数为 0.879,表明模拟总体情况良好,可用于预测淮河生态经济带在 2040 年的土

地利用格局。

3.2.3 淮河生态经济带 2040 年多情景模拟 将土地利用结构预测的数值结果写入 PLUS 模型的 CA 模块,对不同情景的空间分布布局进行模型。且与 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用图作为对比(图 5)。土地利用结构变化趋势与之前大致相同,建设用地面积增加较为明显,而耕地面积下降幅度较大;

在经济优先情景下,减少的耕地面积大部分转换为建设用地,与另外2种情景相比,建设用地面积扩张速度最快,面积增幅最大,林地和草地面积少量减少;在低碳发展情景下,建设用地的扩张得到了有效控制,与其他2种情景相比,耕地、草地的下降幅度有所缓和,林地通过光合作用和土壤植被作用形成碳汇,对环保和可持续发展至关重要。相较于2020年,低碳情景下林地的面积增加117 990 hm<sup>2</sup>,同时,水域通过生物活动和沉积作用,能够将大量的碳长期储存,在碳循环中起到了重要的碳汇作用,相较于其他

两种情景,水域面积也明显增加。

2020年土地利用现状

2020年土地利用模拟

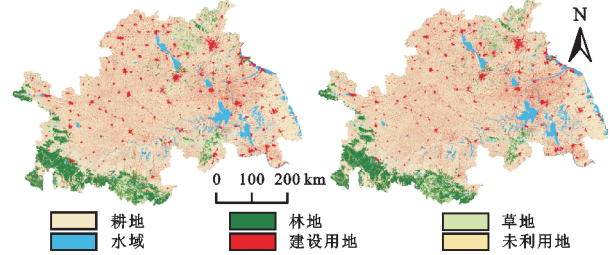


图4 PLUS土地利用模拟结果与真实土地利用状况对比图  
Fig. 4 Comparison of PLUS land use simulation results with actual land use conditions

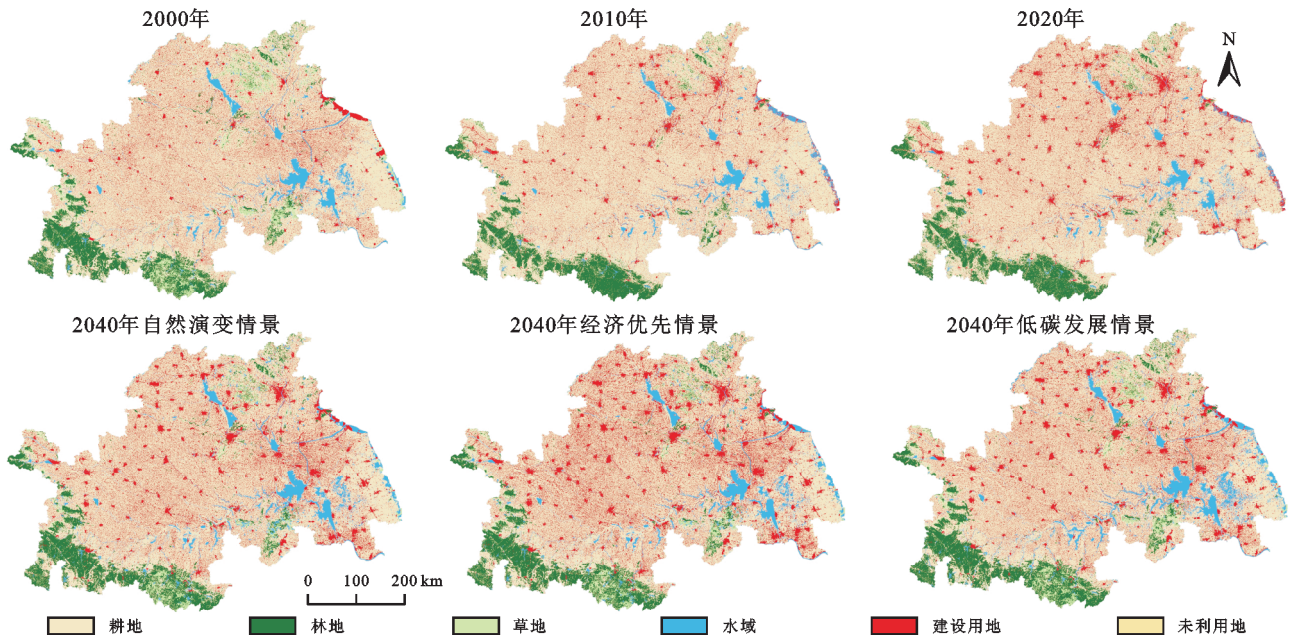


图5 不同情景下的土地利用空间分布模拟

Fig. 5 Simulation of spatial distribution of land use under different scenarios

### 3.3 生态系统服务价值变化特征

计算出各情景生态系统服务价值(表8,图6),自然演变情景、经济优先和低碳发展情景下研究区ESV分别是6 583.59亿元,6 413.77亿元和7 291.51亿元,与2020年相比,自然演变情景下研究区生态系统服务价值提升了182.32亿元。相较于2020年的基准数据,在2040年的经济优先发展情景下,生态系统服务价值提升了12.5亿元。与其他两种发展情景增长量进行对比得出其增长幅度明显较小,说明

在追求经济优先发展的同时,对于生态系统服务价值的提升作用相对有限。在低碳发展情景下,与2020年相比提升了890.24亿元,这一增幅远超其他预设情景,得益于林地面积和水域面积的提升,这一变化促使西南部区域生态系统服务价值的提升面积显著增加,而中部平原地区的生态系统服务价值非但未显著下滑,且在部分城市区域出现了价值增长的现象,整体而言,研究区域内的生态质量得到了积极改善与优化。

表8 生态系统服务价值评估结果

Table 8 Assessment results of ecosystem service value

亿元

土地利用类型	生态系统服务价值			
	2020年现状	2040年自然演变情景	2040年经济优先情景	2040年低碳发展情景
耕地	1701.45	1646.17	1570.25	1616.37
林地	1191.86	1182.80	1179.31	1251.45
草地	244.09	197.46	194.21	231.88
水域	3263.43	3556.74	3469.62	4191.38
未利用地	0.45	0.41	0.38	0.42
合计	6401.27	6583.59	6413.77	7291.51

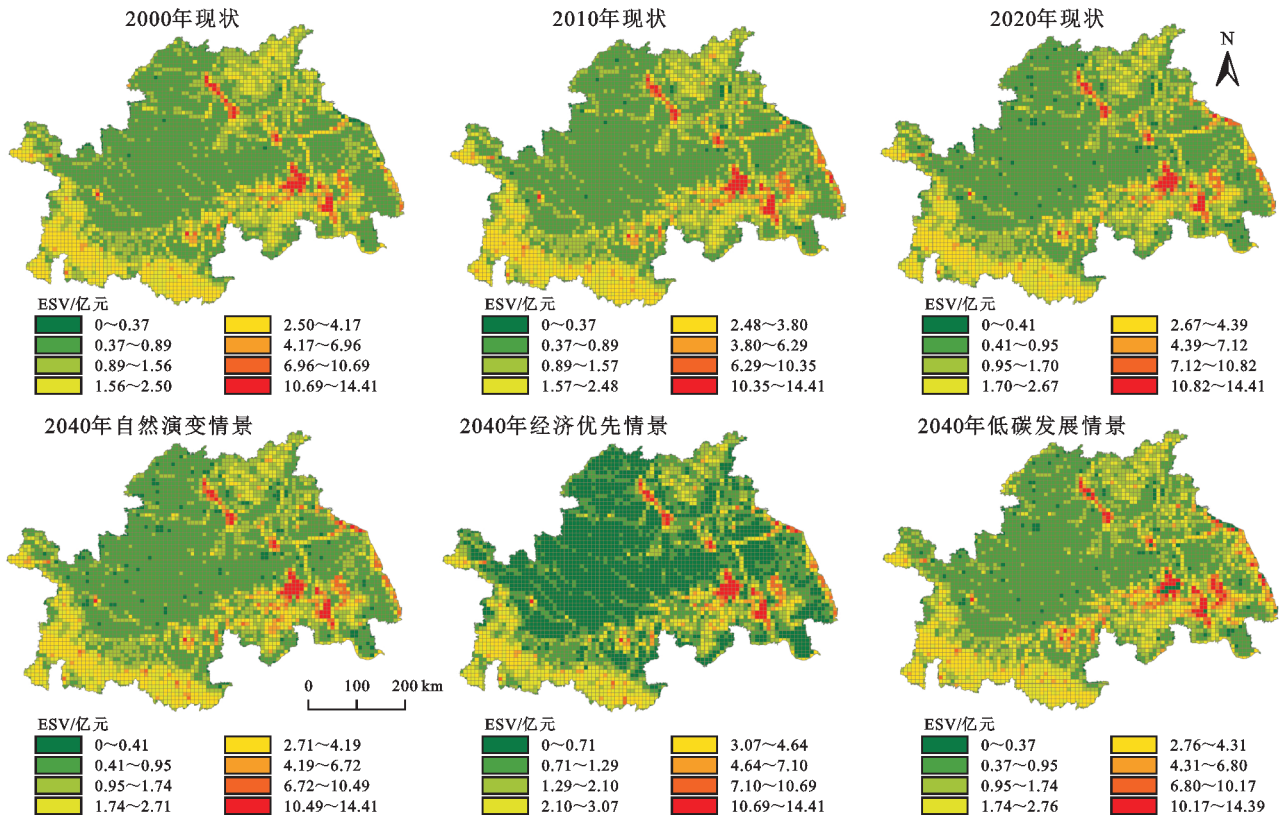


图 6 不同情境下的生态系统服务价值评估

Fig. 6 Ecosystem service value assessment under different scenarios

### 3.4 淮河生态经济带生态系统服务价值的热点分析

从时间轴来看(图 7),从 2000—2020 年热点数量显著减少,冷点数量显著增加,不显著逐渐向冷点转变。热点主要聚集在海拔较高的林地,鉴于林地作为生态系统中的核心组成部分,具备高度的自然稳定性及较低的景观破碎与分离特征,其面临的生态风险相对较低;而置信度较高的冷点则主要集中在海拔较低的耕地和建设用地,这些区域的景观脆弱性较高,内部稳定性较差。相较于 2020 年的冷热点分布格局,3 种模拟情景下的冷点都缓慢增长,自然情景下的显著冷点与 2020 年无显著变化;经济发展情景下的热点与显著热点相较于 2020 年均减少,这是由于林地草地面积的减少;低碳情景的显著热点相较于其他两种情景,是呈现增加趋势,增加的显著热点主要分布在临沂、连云港、盐城和信阳。

### 3.5 低碳发展背景下生态系统服务提升空间的识别与分析

本研究深入探讨生态系统服务价值的提升与生态质量改善的潜在联系。基于这一发现,将低碳发展情景下服务价值增长的区域识别为未来生态系统服务优化的关键区域。为了进一步细化这些区域的生态提升潜力,依据服务价值增长的程度并运用 ArcGIS 软件中自然断点法进行划分(图 8),在为淮

河生态经济带的规划政策制定与生态工程的实施提供科学、系统的参考依据,确保生态质量的持续改善与生态系统服务的有效增强。

研究表明,约 5.88% 的区域展现出显著的增值潜力,在研究区的东南部,如盐城、淮安和扬州等地分布较为集中。中等增值潜力的区域占据约 31.21% 的面积,主要分布在研究区的南部,涵盖扬州、蚌埠、阜阳和淮南等地。相比之下,增值潜力相对较低的区域占据约 62.88% 的面积,这些区域在研究区内分布广泛。

## 4 讨论

土地利用类型的变化是导致研究区 ESV 变化量最直接原因,张发等<sup>[27]</sup>分析了博斯腾湖流域土地利用变化及其对生态服务功能价值影响。张华玉等<sup>[28]</sup>深入剖析了广西海岸带地区土地利用类型在时间与空间维度上的演变特征。现有对不同情景下的区域土地利用及 ESV 动态变化特征及规律,对区域土地利用规划调整和生态系统保护具有重要意义。而对淮河生态经济带地区的 ESV 多情景模拟的分析较少。本研究采用 MOP-PLUS 模型,模拟出 3 种情景下的 2040 年淮河生态经济带土地利用类型空间分布,进一步计算出 3 种情景下的生态系统服务价值,并剖析 ESV 的空间分布态势及其集聚特征,最后识

别淮河生态经济带潜在的服务提升区域。在预设的 3 种情景中,低碳发展情景下 ESV 达到最高,说明在低碳发展的框架下合理规划与利用有限的土地资源,能够有效提升生态系统服务价值,也与国家“双碳”战略及碳达峰政策的推进理念相符。研究区 ESV 高值区分布土地利用类型多为林地、草地和水域,ESV 低值区多分布于建设用地,这也与姜晗等<sup>[29]</sup>研究结果一致。且与《淮河生态经济带发展规划》中,“建设覆盖淮河干流和主要支流的生态走廊,通

过植树造林、湿地恢复等措施,提升生态系统碳吸收能力。”等规划方向相符。体现了低碳发展对于未来可持续发展的重要性,引发对生态文明建设的深刻思考。进一步验证,仅依靠单维度的自然演变、经济优先或低碳发展,对于推动区域迈向高质量发展及构建生态文明而言,显得片面且不足,难以有效支撑可持续发展目标。因此,亟需精细调控开发与保护之间的动态平衡,以确保两者和谐共生,共同促进区域的全面、绿色、协调发展。

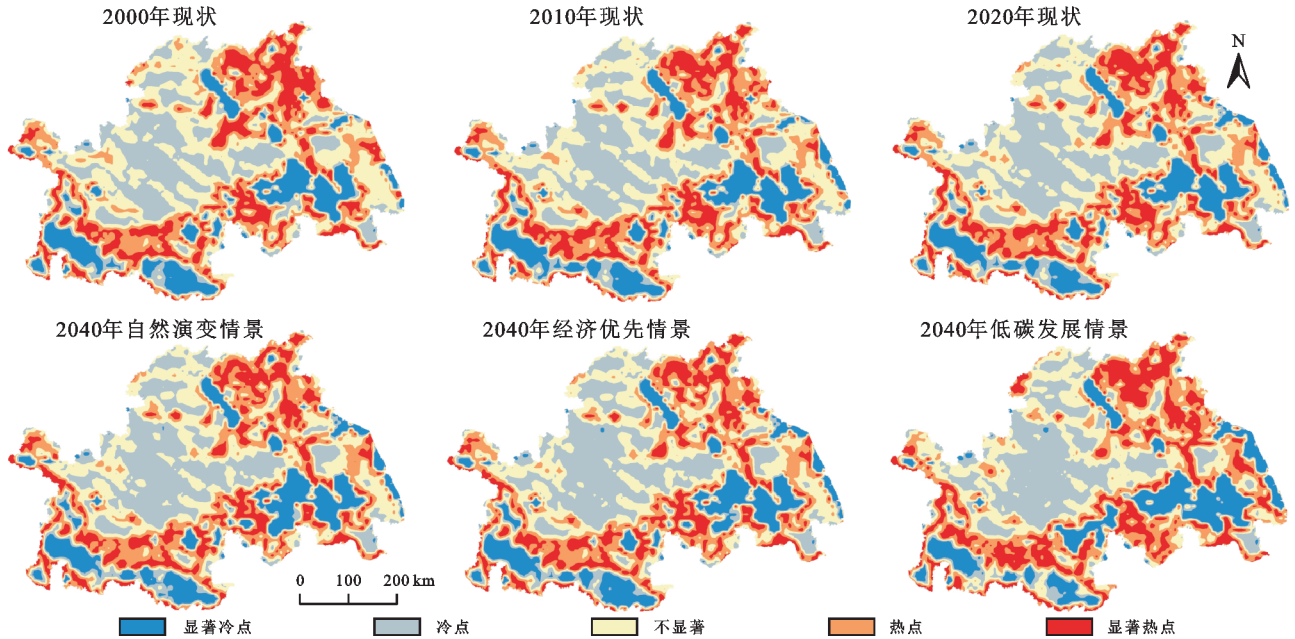


图 7 淮河生态经济带生态服务价值冷热点空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of cold and hot spots of ecological service value in the Huaihe River Eco-Economic Belt

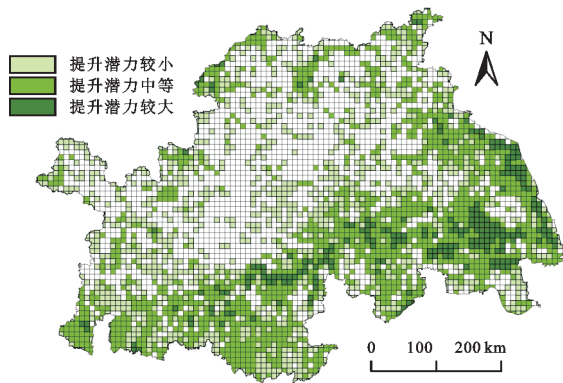


图 8 生态系统服务提升空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of ecosystem service enhancement

在情景模拟过程中,转化规则的设定存在一定程度的主观判断与考量,且本文采用的是 ESV 当量评估法,是根据 2020 年研究区的粮食产量进行修正和计算评估,但仍可能对未来生态系统服务价值变动幅度的预测存在偏差。为进一步优化研究质量,后续工作应致力于提升数据集的精细度,以增强预测结果的全面性和准确性。

## 5 结论

(1) 采用耦合 MOP 与 PLUS 模型方法在权衡低碳减排目标和情景模拟设置方面能够有效地优化和模拟土地利用结构与空间布局。土地利用模拟的整体精度为 87.90%,为淮河生态经济带的未来土地利用模拟提供方法支撑。

(2) 不同情景下的土地利用结构与空间布局时有显著的差异。3 种预设情景中,在自然发展的背景下,中部平原区广袤的耕地被建设用地逐渐蚕食,同时水域面积呈现出微小但持续的扩大,而林地与草地的面积却呈现出不断缩减的趋势。建设用地对平原区耕地的侵蚀现象愈发显著,扩张趋势明显增强,与此同时,耕地与林地的缩减现象也依然持续,分别减少 1 342 989 hm<sup>2</sup>, 24 857 hm<sup>2</sup>;低碳发展情景下建设用地向耕地扩张的态势得到了有效的控制和缓解,林地和水域面积增加程度最大,分别增加 117 990 hm<sup>2</sup>, 442 451 hm<sup>2</sup>。

(3) 从生态系统服务价值的总量方面分析,低碳发展情景下的价值最为显著,达到 7 291.51 亿元,这

一数值在三者中居于首位。自然演变情景下的生态系统服务价值虽有所减少,但仍保持在较高的水平,具体数值为6 583.59亿元。而经济优先情景,在追求经济发展的同时,对生态系统服务价值产生了一定的负面影响,导致其数值最低,为6 413.77亿元。从冷热点的空间分布上看,低碳发展情景下的显著热点相较于其他两种情景是呈现增加趋势,增加的显著热点主要分布在临沂、连云港、盐城和信阳。

(4)在对低碳发展情景下生态系统服务价值的提升区域分析后,得以识别出具有显著生态效益的区域,从而为淮河生态经济带的规划政策制定和生态工程的实施提供有力的科学依据和参考,旨在促进区域的可持续发展与生态保护,其中,提升潜力较大的区域面积占比约5.88%,在研究区东南部的盐城、淮安、扬州等地分布较为密集,为未来的协调保护和发展提供空间基础。

#### 参考文献(References):

- [1] 许静,刘慧.甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测[J].中国环境科学,2024,44(4):1863-1874.  
Xu J, Liu H. Assessment and prediction of ecosystem services trade-offs and synergies relationships in Gansu Province [J]. China Environmental Science, 2024, 44(4):1863-1874.
- [2] 曹跃群,赵世宽,杨玉玲,等.重庆市生态系统服务价值与区域经济增长的时空动态关系研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(11):2354-2365.  
Cao Y Q, Zhao S K, Yang Y L, et al. Research on the spatio-temporal dynamic relationship between the ecosystem services value and the regional economic growth in Chongqing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(11):2354-2365.
- [3] Costanza R, d' Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387:253-260.
- [4] 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,2008,23(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, 23(5):911-919.
- [5] Mathewos M, Lencha S M, Tsegaye M. Land use and land cover change assessment and future predictions in the matenchose watershed, rift valley basin, using CA-Markov simulation [J]. Land, 2022, 11(10):1632.
- [6] 宋蕾,曹银贵,周伟,等.基于SD模型的三峡库区快速城镇化地区耕地利用模拟研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):818-827.  
Song L, Cao Y G, Zhou W, et al. Simulation study on cultivated land utilization in rapid urbanization area of Three Gorges Reservoir area based on SD model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(4):818-827.
- [7] 曹雪,罗平,李满春,等.基于扩展CA模型的土地利用变化时空模拟研究:以深圳市为例[J].资源科学,2011,33(1):127-133.  
Cao X, Luo P, Li M C, et al. Spatio-temporal simulation of land use change based on a extended CA model: a case study of Shenzhen City, China [J]. Resources Science, 2011, 33(1):127-133.
- [8] Zhang Y, Yu P H, Tian Y S, et al. Exploring the impact of integrated spatial function zones on land use dynamics and ecosystem services tradeoffs based on a future land use simulation (FLUS) model [J]. Ecological Indicators, 2023, 150:110246.
- [9] 杨朔,苏昊,赵国平.基于PLUS模型的城市生态系统服务价值多情景模拟:以汉中市为例[J].干旱区资源与环境,2022,36(10):86-95.  
Yang S, Su H, Zhao G P. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: a case study of Hanzhong City [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10):86-95.
- [10] 谢莹,匡鸿海,吴晶晶,等.基于CLUE-S模型的重庆市渝北区土地利用变化动态模拟[J].长江流域资源与环境,2016,25(11):1729-1737.  
Xie Y, Kuang H H, Wu J J, et al. Dynamic simulation of land use change in Yubei district of Chongqing based on clue-s model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(11):1729-1737.
- [11] Liu H J, Yin W C, Yan F Y, et al. A coupled STIRPAT-SD model method for land-use carbon emission prediction and scenario simulation at the county level [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024, 108:107595.
- [12] Singh V G, Singh S K, Kumar N, et al. Simulation of land use/land cover change at a basin scale using satellite data and Markov chain model [J]. Geocarto International, 2022, 37(26):11339-11364.
- [13] 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.
- [14] 牛统莉,熊立华,陈杰,等.基于PLUS模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J].武汉大学学报:工学版,2024,57(2):129-141,151.  
Niu T L, Xiong L H, Chen J, et al. Land use simulation and multi-scenario prediction of the Yangtze River

- Basin based on PLUS model[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(2):129-141, 151.
- [15] Mutmainnah W, Bowo L P, Sulistiyono A B, et al. Causative chains that leads to ship collisions in Japanese maritime traffic system (MTS) as final outcome of MOP model [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2018, 874:221-227.
- [16] 吴小妮, 管卫华, 张惠, 等. 长三角城市群碳排放效率与高质量发展的时空耦合特征及影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(11):2273-2284.  
Wu X N, Guan W H, Zhang H, et al. Spatio-temporal coupling characteristics and driving factors of carbon emission efficiency and high-quality development in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(11):2273-2284.
- [17] 孙伟, 乌日汗. 长三角核心区碳收支平衡及其空间分异[J]. *地理研究*, 2012, 31(12):2220-2228.  
Sun W, Wu R H. Study on the balance of carbon budget and its spatial differentiation in Yangtze River Delta [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(12):2220-2228.
- [18] 王丹, 兰安军, 范泽孟, 等. 典型喀斯特区域土地利用变化对生态系统服务价值的响应情景模拟[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4):308-315, 325.  
Wang D, Lan A J, Fan Z M, et al. Scenario modeling of response of land use change to ecosystem service values in A typical Karst Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4):308-315, 325.
- [19] 王博. 基于PLUS模型的鄱阳湖区土地利用冲突时空演变及多情景模拟[D]. 南昌: 江西师范大学, 2023.  
Wang B. Spatial-temporal pattern evolution and multi-scenario simulation of land use conflict in Poyang Lake Area based on PLUS mode [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2023.
- [20] 王子尧, 孟露, 李惊, 等. 低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(9):3571-3581.  
Wang Z Y, Meng L, Li L, et al. Multi-scenario simulation of land use and ecosystem services in Beijing under the background of low-carbon development [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9):3571-3581.
- [21] 张瀚宇, 史名杰, 曹月娥, 等. 基于MOP-PLUS模型的新疆阿克苏地区土地利用景观格局优化及多情景模拟[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(10):2256-2264.  
Zhang H Y, Shi M J, Cao Y E, et al. Optimization of land use landscape pattern and multi scenario simulation in Aksu region of Xinjiang based on MOP-PLUS model [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(10):2256-2264.
- [22] Huang X, Liu J, Peng S Y, et al. The impact of multi-scenario land use change on the water conservation in central Yunnan urban agglomeration, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147:109922.
- [23] 张娜. 陕西省农田生态系统服务价值评估及其空间规划建议[J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(6):244-253.  
Zhang N. Service value evaluation of farmland ecosystem services and suggestions for spatial planning in Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(6):244-253.
- [24] 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.
- [25] 程红霞, 胡列群, 林粤江. 近50年新疆沙尘暴冷热点的时空分布特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(7):100-104.  
Chen H X, Hu L Q, Lin Y J. Temporal and spatial distribution characteristics of hot and cold spots of sandstorm in Xinjiang in recent 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(7):100-104.
- [26] 高星, 刘泽伟, 李晨曦, 等. 基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(20):7113-7122.  
Gao X, Liu Z W, Li C X, et al. Land use function transformation in the Xiong'an New Area based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20):7113-7122.
- [27] 张发, 玉素甫江·如素力, 艾尔肯·图尔逊. 基于土地利用的博斯腾湖流域生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2021, 41(13):5254-5265.  
Zhang F, Yusufjiang Rusuli, Aierken Tuersun. Spatio-temporal change of ecosystem service value in Bosten Lake Watershed based on land use [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13):5254-5265.
- [28] 张华玉, 秦年秀, 汪军能, 等. 广西海岸带土地利用时空格局及其驱动因子[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3):367-374.  
Zhang H Y, Qin N X, Wang J N, et al. Spatiotemporal pattern and driving factors of land use in Guangxi coastal zone [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3):367-374.
- [29] 姜晗, 吴群. 基于LUCC的江苏省生态系统服务价值评估及时空演变特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(11):2712-2725.  
Jiang H, Wu Q. Ecological service value evaluation and temporal-spatial evolution characteristics in Jiangsu Province based on LUCC [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(11):2712-2725.