

# 省际交界地区土地利用及生态系统服务价值预测 ——以淮海经济区为例

罗敏, 舒帮荣, 曲艺, 张如

(江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏徐州 221116)

**摘要:** [目的] 分析淮海经济区的区域生态系统服务价值, 为同类地区生态经济统筹发展提供科学依据。[方法] 以淮海经济区为研究区, 基于PLUS模型和当量因子法, 在分析省际交界典型地区淮海经济区2000—2020年土地利用演变特征基础上, 评估其生态系统服务价值(ESV), 预测其2030年不同情景下土地利用格局及ESV。[结果] ①研究区2000—2020年耕地与建设用地之间的转移最为密切, 耕地转出面积为6 127.58 km<sup>2</sup>, 其中89.76%转为建设用地。②自然发展情景下, 耕地、林地、草地面积减少, 建设用地、水域、未利用地面积增加; 经济发展情景下, 各地类的变化幅度比自然发展情景更大, 生态环境将受不利影响; 生态保护情景下, 林地、草地和水域面积增加, 生态环境将明显改善; 统筹发展情景下, 各地类面积基本介于经济发展和生态保护情景之间。③2000—2020年研究区ESV先降后升, 研究区内绝大部分城市ESV低于其所属省平均水平, 生态环境改善相对较慢, 2030年自然发展、经济发展、生态保护与统筹发展情景的ESV较2020年均不同幅度的增加。ESV空间分布特征与土地利用格局基本一致, 高值区主要分布在研究区的江河湖泊地带, 中值区集中在较高值区周围, 呈分散状态, 低值区与较低值区则集中于各城市中心城区。[结论] 淮海经济区各城市未来应注重加强合作, 充分发挥经济区的协调作用, 实现行政区和经济区的优势互动, 以促进该区域生态系统的可持续发展。

**关键词:** 省际交界地区; 生态系统服务价值; 情景模拟; PLUS模型; 淮海经济区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2025)03-0353-10

**中图分类号:** F301.2, X171.1

**文献参数:** 罗敏, 舒帮荣, 曲艺, 等. 省际交界地区土地利用及生态系统服务价值预测[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 353-362. Luo Min, Shu Bangrong, Qu Yi, et al. Prediction of land-use and ecosystem service value in inter-provincial border areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 353-362. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.021; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.021.

## Prediction of land-use and ecosystem service value in inter-provincial border areas —A case study of Huaihai economic zone

Luo Min, Shu Bangrong, Qu Yi, Zhang Ru

(School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** [Objective] The regional ecosystem service value of the Huaihai economic zone was analyzed in order to provide a scientific basis for the coordinated development of the ecological economy in similar areas. [Methods] Taking the Huaihai economic zone as the study area, based on the PLUS model and equivalent factor method, the evolution of land-use from 2000 to 2020 in this typical inter-provincial border region were analyzed. The ecosystem service value (ESV) was assessed, and land-use patterns and ESV under different scenarios in 2030 were predicted. [Results] ① From 2000 to 2020, the most significant land-use change in the study area was the conversion from cultivated land to construction land. The area of converted cultivated land was 6 127.58 km<sup>2</sup>, of which 89.76% was converted into construction land. ② Under the natural development scenario, the areas of

收稿日期: 2024-08-16

修回日期: 2025-01-26

采用日期: 2025-02-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“城镇化背景下土地利用转型的环境与经济效益耦合研究: 以山东省为例”(42001191); 江苏师范大学研究生科研与实践创新计划项目“基于LUCC的淮海经济区生境质量时空演变与多情景模拟”(2024XKT0185)

第一作者: 罗敏(2000—), 女(汉族), 江苏省盐城市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用模拟。Email: 1044218568@qq.com。

通信作者: 舒帮荣(1982—), 男(汉族), 四川省泸州市人, 博士, 教授, 主要从事国土空间规划、土地经济与管理方面的研究。Email: bangyunshu@126.com。

cultivated, forest, and grass lands decrease, whereas the areas of construction land, water bodies, and unused land increase. Under the economic development scenario, changes in land-use types are more pronounced than under the natural development scenario, potentially leading to adverse environmental impacts. Under the ecological protection scenario, forest, grassland, and water body areas increased, which significantly improved the ecological environment. Under the coordinated development scenario, the areas of land-use types generally fell between those of the economic development and ecological protection scenarios. ③ From 2000 to 2020, the ESV in the study area initially decreased and then increased. The ESV of most cities in the study area were lower than the average level of their respective provinces, indicating relatively slow ecological improvement. By 2030, the ESV under natural development, economic development, ecological protection, and coordinated development scenarios showed varying degrees of increase compared to 2020. The spatial distribution of the ESV was consistent with the land-use pattern, with high-value areas mainly distributed along rivers and lakes, medium-value areas scattered around high-value areas, and low-value areas concentrated in the central urban areas of cities. [Conclusion] In the future, cities in the Huaihai economic zone should focus on strengthening cooperation, leveraging the coordinating role of the economic zone, and achieving advantageous interactions between administrative and economic regions to promote sustainable development of regional ecosystems.

**Keywords: inter-provincial border area; ecosystem service value; scenario simulation; PLUS model; Huaihai economic zone**

生态系统服务与生态系统的状态直接相关<sup>[1]</sup>, 关乎人类福祉和区域的可持续发展。生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)是评价生态系统服务的重要指标,能以货币形式反映生态系统向人类提供的各类产品和服务的价值<sup>[2-3]</sup>。土地利用/覆被变化作为地球表面变化的一种表现,对区域生态系统有着显著影响<sup>[4]</sup>。土地利用方式不同直接影响生态系统结构和功能,进而影响ESV<sup>[5]</sup>,故结合土地利用定量分析不同情景下区域ESV对区域可持续发展具有重要意义。

目前,国内外学者主要运用功能价值法和当量因子法进行ESV核算<sup>[5-7]</sup>,但因功能价值法实施成本高、主观性强和适配性有限等,其更适用于小尺度区域<sup>[8]</sup>。而当量因子法因操作简便、结果更具可比性和适用性强等优点被广泛应用于多尺度、多特征和多对象的ESV研究<sup>[6,9]</sup>。谢高地等<sup>[10]</sup>在Costanza等<sup>[11]</sup>开展的全球ESV核算的基础上,构建了符合中国实际的ESV评估体系。基于该评估体系,学者们围绕着ESV对土地利用变化的响应机制开展了系统性研究<sup>[12-14]</sup>,且探索不同土地利用情景下的ESV时空演变特征已成为生态系统服务研究领域的热点之一<sup>[15]</sup>。对于土地利用情景模拟,常用的预测模型包括CA-Markov<sup>[16]</sup>、FLUS<sup>[17]</sup>、CLUE-S<sup>[2]</sup>模型等。由梁迅等<sup>[18]</sup>提出的PLUS模型通过改进分析策略,弥补了传统模型在转化规则挖掘和景观格局动态模拟方面的不足<sup>[19-20]</sup>,可更好地模拟多类土地利用斑块级变化<sup>[18]</sup>,在跨省际全流域的大尺度和多地类土地利用

模拟方面效果显著<sup>[21-22]</sup>,并广泛应用于土地利用变化模拟<sup>[23]</sup>、ESV预测等<sup>[24]</sup>方面。然而,现有生态系统服务价值预测研究多集中于流域和行政区尺度<sup>[6,25]</sup>,对经济区、城市群等跨行政区单元的研究相对较少,难以满足新时代全域空间治理的新需求。省际交界地区是涉及多个省级行政区的特殊地理空间<sup>[26]</sup>,该区域内行政区之间有效合作较难,生态环境保护问题较为突出<sup>[27]</sup>,目前针对这类区域的ESV预测研究很少。因此,本文以淮海经济区这一典型省际交界地区为研究区域,采用PLUS模型开展ESV预测研究。

淮海经济区地处苏鲁豫皖4省交界地带,是中国典型的省际交界区域<sup>[28]</sup>。该地区人口多,耕地资源丰富,是中国重要农产品生产基地和粮仓。近年来随着该地区人口增长和经济快速发展,土地资源特别是建设用地的需求量越来越大,导致城市蔓延和土地过度非农化<sup>[29]</sup>,威胁着区域生态安全,因此,进行淮海经济区土地利用及ESV预测,对该区域土地生态系统可持续发展十分必要。鉴于此,本研究以淮海经济区为研究区域,基于2000,2010和2020年3期土地利用数据,采用PLUS模型和当量因子法,预测不同情景下研究区2030年土地利用变化,并评估其ESV,以期为中国省际交界地区生态经济统筹建设和区域可持续发展提供科学参考和决策依据。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

淮海经济区地处黄淮海平原边缘,以徐州市为

中心,西临中原经济区,南接长三角,是中国东部、中部和西部经济带的重要桥梁。根据国家发展和改革委员会印发的《淮河生态经济带发展规划》,淮海经济区包括山东省4个市(济宁、枣庄、临沂、菏泽)、河南省1个市(商丘)、安徽省2个市(淮北、宿州)、江苏省3个市(徐州、连云港、宿迁),土地总面积达95 555.02 km<sup>2</sup>,其地势西北高东南低,地形以平原为主,土壤肥沃、水热资源丰富,是中国粮食主产区之一。近年来,淮海经济区经济实力稳步提升,但仍是东部地区经济发展的洼地,区域内社会经济发展进程以及生态环境保护与治理状况等方面均存在较大差异。

## 1.2 数据来源

本研究数据主要包括土地利用数据、气候环境数据、交通区位数据、DEM数据、NPP数据及社会经济数据。其中,研究区2000,2010和2020年土地利用数据来源于中国科学院资源环境与数据科学中心(<http://resdc.cn/>),分辨率为30 m×30 m,源数据为美国陆地卫星Landsat遥感影像。气候环境数据包括气温和降水空间分布数据,来源于中国科学院资源环境与数据科学中心。交通区位数据包括研究区河流、道路、市政府和县政府矢量数据,来源于OpenStreetMap网站(<https://www.openstreetmap.org/>)。DEM数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。NPP数据来源于全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=1212>)。社会经济数据包括人口、GDP空间分布数据和粮食产量、播种面积、GDP及粮食价格数据,分别来源于中国科学院资源环境与数据科学中心、淮海经济区4省和中国2001,2011和2021年统计年鉴以及《全国农产品成本收益资料汇编》。基于ArcGIS软件,对土地利用和驱动因子数据进行裁剪和统一坐标系处理,空间分辨率重采样为30 m,保证行列数和空间精度一致。通过数据预处理得到高程、坡度、到铁路的距离、到高速公路的距离、到一级、二级和三级道路的距离、到火车站的距离、到市政府的距离、到区县政府距离、到主要河流的距离、气温、降水、人口和GDP等15个驱动因子,以满足土地利用变化模拟的需求。

## 2 研究方法

### 2.1 PLUS模型

PLUS模型是基于元胞自动机(CA)的土地利用变化模拟模型,其通过转化分析和格局分析战略<sup>[18]</sup>,能够克服以往的CA模型在解析土地利用变化驱动因素及模拟各类土地利用类型时空尺度斑块演变方

面的局限性<sup>[18]</sup>,具体模型详见文献[18]。为验证模型有效性,以研究区2010年土地利用数据为基础,基于2000—2010年土地利用扩张概率,对2020年的土地利用格局进行模拟,并与其真实土地利用情况进行比较,为弥补混淆矩阵对土地利用变化模拟精度评估的不足<sup>[30]</sup>,本研究同时用kappa和FOM系数评估模拟精度。为满足不同的发展情景需求,结合现有研究成果<sup>[17]</sup>及研究区特征,设置自然发展、经济发展、生态保护和统筹发展4种情景对2030年土地利用进行模拟。其中,自然发展情景根据2010—2020年的土地利用转移概率及转移矩阵,模拟2030年土地利用格局;经济发展情景考虑到新冠疫情后经济发展缓慢,将耕地、林地、草地、水域、未利用地向建设用地的转移概率增加35%,建设用地向除耕地外的土地利用概率降低30%;生态保护情景将林地、草地向建设用地的转移概率降低40%,耕地向建设用地的转移概率降低20%,建设用地、耕地向林地、草地、水域的转移概率增加20%;统筹发展情景综合考虑前述3种情景,将耕地、草地、未利用地向建设用地的概率增加30%,建设用地向林地、水域转移概率增加20%。

### 2.2 生态系统服务价值核算

本研究以Costanza等<sup>[11]</sup>的研究成果与谢高地等<sup>[10]</sup>对中国ESV评估的当量因子表为基础,结合研究区实际,利用净初级生产力(NPP)、粮食产量和社会发展对ESV进行修正,具体计算公式为:

$$ESV = \sum_{i=1}^n (L_i \cdot R_i \cdot C) \quad (1)$$

式中: $L_i$ 为不同土地利用类型的面积(hm<sup>2</sup>); $R_i$ 为不同土地利用类型单位面积生态系统服务价值(元/hm<sup>2</sup>); $C$ 为修正系数; $n$ 为研究区土地利用类型的数量。

$$C = N \cdot G \cdot B_p \quad (2)$$

$$N = \frac{NPP_Y}{NPP_C} \quad (3)$$

式中: $N$ 为NPP比值; $NPP_Y$ , $NPP_C$ 分别表示研究区NPP和全国NPP[g/(m<sup>2</sup>·a)]。

$$G = \frac{P_Y}{P_C} \quad (4)$$

式中: $G$ 为粮食作物单产比值; $P_Y$ , $P_C$ 分别表示研究区和全国粮食作物单产(kg/hm<sup>2</sup>)。

$$B_p = \frac{GDP_{AY}}{GDP_{AC}} \quad (5)$$

式中: $B_p$ 为人均GDP比值; $GDP_{AY}$ , $GDP_{AC}$ 分别为研究区人均GDP和中国人均GDP(万元/人)。

为了突出地类变化对ESV的影响,本研究对不

同年份的 ESV 均采用修正系数的多年平均值进行修正,修正后研究区单位土地面积 ESV 系数详见表 1。

由于建设用地 ESV 难以量化,参考以往研究<sup>[10,31-32]</sup>经验,设建设用地 ESV 系数为 0。

表 1 淮海经济区生态系统单位面积 ESV 系数  
Table 1 Ecosystem value coefficient per unit area of ecosystem in Huaihai economic zone 元/hm<sup>2</sup>

一级服务功能	二级服务功能	单位面积 ESV 系数				
		耕地	林地	草地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	828.75	235.62	287.32	684.00	2.07
	原料生产	320.58	538.45	423.42	239.80	6.20
	水资源供给	-316.49	279.65	234.39	6 758.80	4.13
调节服务	气体调节	658.04	1 779.12	1 489.53	830.43	36.59
	气候调节	350.24	5 324.99	3 939.31	2 219.29	20.67
	净化环境	98.76	1 526.53	1 300.50	4 752.78	133.33
	水文调节	552.04	2 946.03	2 888.32	82 413.97	64.18
支持服务	土壤保持	797.50	2 166.15	1 814.65	1 004.84	40.72
	维持养分循环	116.75	166.09	136.10	76.38	2.07
	生物多样性	127.00	1 970.71	1 648.31	2 942.81	38.66
文化服务	美学景观	57.74	864.45	725.86	2 046.44	17.26

### 2.3 生态系统服务价值区位熵

区位熵能反映某地区某行业的集聚水平,还可呈现区域规模差异<sup>[33]</sup>。本文采用生态系统服务价值区位熵分析研究区内城市与其所属省的生态系统服务价值水平。生态系统服务价值区位熵是指某一区域内某地区生态系统服务价值占该区域生态系统服务价值的比重与该地区土地总面积占该区域土地总面积的比重之比,其计算公式为:

$$Q_{ij} = \frac{E_{xy}/E_x}{L_{xy}/L_x} \quad (6)$$

式中: $Q_{xy}$ 代表 $x$ 年 $y$ 市生态系统服务价值区位熵; $E_{xy}, E_x$ 分别代表 $x$ 年 $y$ 市及其所属省的生态系统服务价值(亿元); $L_{xy}, L_x$ 分别代表 $i$ 年 $j$ 市及其所属省的土地总面积(hm<sup>2</sup>)。若 $Q_{xy} > 1$ ,说明该市生态系统服务价值高于其所属省平均水平;若 $Q_{xy} < 1$ ,则说明该市生态系统服务价值低于其所属省平均水平。

### 2.4 敏感性分析

为验证 ESV 系数的准确性,采用敏感性指数判断 ESV 对当量系数的敏感程度<sup>[32]</sup>。为更加细致地呈现结果,将耕地和水域 ESV 系数上下调整 75% 和 25%,林地、草地和未利用地 ESV 系数上下调整 50%,计算公式为:

$$C_s = \left| \frac{(ESV_n - ESV_m)/ESV_m}{(V_{i,n} - V_{i,m})/V_{i,m}} \right| \quad (7)$$

式中: $C_s$ 表示某一地类的敏感性指数; $ESV_m, ESV_n$ 分别表示调整前、后的生态系统服务价值(亿元); $V_{i,m}, V_{i,n}$ 分别表示第 $i$ 个地类调整前、后的 ESV 系数。 $C_s > 1$ 时,表示 ESV 对该地类 ESV 系数具有弹

性, $C_s < 1$ 时,表示 ESV 对该地类 ESV 系数缺乏弹性,结果合理<sup>[32]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化特征

总体来看(表 2),研究时段内各年度耕地均占土地总面积的 65% 以上,其中河南省和安徽省城市的耕地比重均超过 75%。建设用地比重也均超过了总面积的 15%,其中江苏城市的建设用地所占比例最大。此外,河南省城市的林地、草地比重比其他省份低。从动态变化情况看,2000—2020 年,研究区土地利用结构变化明显,耕地、林地、草地面积减小,水域和建设用地面积增加。研究区内不同省份所辖区域各地类相互转换频繁,但耕地与建设用地的增减是研究区最主要的地类变化类型。2000—2010 年,耕地转出面积为 4 841.90 km<sup>2</sup>,为转出面积最多的地类,其中转为建设用地占 89%,而耕地转入面积也达 4 140.95 km<sup>2</sup>。建设用地是转入最多的土地利用类型,共转入 4 709.46 km<sup>2</sup>,其主要来源是耕地。林地和草地都有一定面积的转入和转出,总面积变化幅度较小。2010—2020 年,土地利用变化幅度比前一时段极大减小,其中耕地转出面积为 1 537.68 km<sup>2</sup>,仍为转出最多的地类,且其中 91% 转为建设用地,而耕地转入面积仅 268.9 km<sup>2</sup>。建设用地仍然是转入最多的地类,共转入 1 486.17 km<sup>2</sup>,且主要来源于耕地。

### 3.2 土地利用变化情景模拟结果

利用 2010 年土地利用数据模拟 2020 年土地利用空间格局。结果表明,相较于研究区 2020 年实际土地利用现状,PLUS 模型的总体预测精度为 0.97,

kappa 系数为 0.93, FOM 值为 0.05, 根据现有研究<sup>[34-35]</sup>, PLUS 模型对研究区土地利用变化模拟效果较好。基于此, 通过 PLUS 模型将土地利用数量分配到研究区不同省份, 对其 2030 年自然发展、经济发展、生态保护和统筹发展 4 种情景下土地利用变化进行模拟, 结果如图 1 及表 3 所示。在自然发展情景下, 研究区耕地整体减少, 林地、草地面积也略有减少, 而建设用地扩张迅速, 水域、未利用地略有增加(图 1b 和表 3)。不同省份的各地类的变化趋势与整体基本一致。在近 20 a 研究区土地利用变化规律的主导下, 耕地和林地分别减少 1 225.86 和 18.00 km<sup>2</sup>, 建设用地增加 1 017.96 km<sup>2</sup>, 与 2010—2020 年相比, 农林用地收缩幅度基本持平, 建设用地扩张幅度较 2000—2010 年略有减少。在经济情景下, 研究区以经济发展优先, 建设用地面积不断扩张。耕地、林地、草地减少幅度和建设用地扩张幅度在自然发展情景的基础上进一步扩大(图 1c 和表 3)。其中, 耕

地、林地和草地分别减少 1 666.56, 24.77 和 20.99 km<sup>2</sup>, 建设用地增加 1 596.47 km<sup>2</sup>, 河南省城市的建设用地增加幅度最大。在该情景下, 耕地、林地和草地不断向建设用地转移, 生态环境将受到不利影响。在生态保护情景下, 因对林地、草地等生态用地的转出进行限制, 土地利用格局呈现耕地减少, 建设用地、林地、草地和水域增长, 未利用地略有下降的变化趋势(图 1d 和表 3), 耕地收缩幅度与自然发展情景相比略小, 林地和草地呈增长趋势, 建设用地扩张幅度依次小于自然发展情景、统筹发展情景和经济发展情景, 各地类向建设用地转化的速率减缓, 生态环境将得到明显改善。在统筹发展情景下, 耕地、林地、草地的减少以及建设用地的增加均介于经济发展情景和生态保护情景之间, 不同省份各地类的变化趋势与整体基本一致(图 1e 和表 3)。耕地、林地、草地收缩幅度相对减缓, 说明在发展经济的同时, 生态环境将得到一定的改善。

表 2 淮海经济区 2000—2020 年不同土地利用类型面积  
Table 2 Area of different land-use types in Huaihai economic zone from 2000 to 2020

土地利用类型	2000年		2010年		2020年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
耕地	67 592.84	70.74	66 892.32	69.99	65 623.54	68.66
林地	3 189.53	3.34	2 784.23	2.91	2 766.09	2.89
草地	4 741.22	4.96	3 149.27	3.30	3 140.17	3.29
水域	4 693.81	4.91	4 806.93	5.03	5 021.21	5.25
建设用地	15 144.54	15.85	17 810.82	18.64	18 879.18	19.75
未利用地	194.37	0.20	128.72	0.13	141.94	0.15

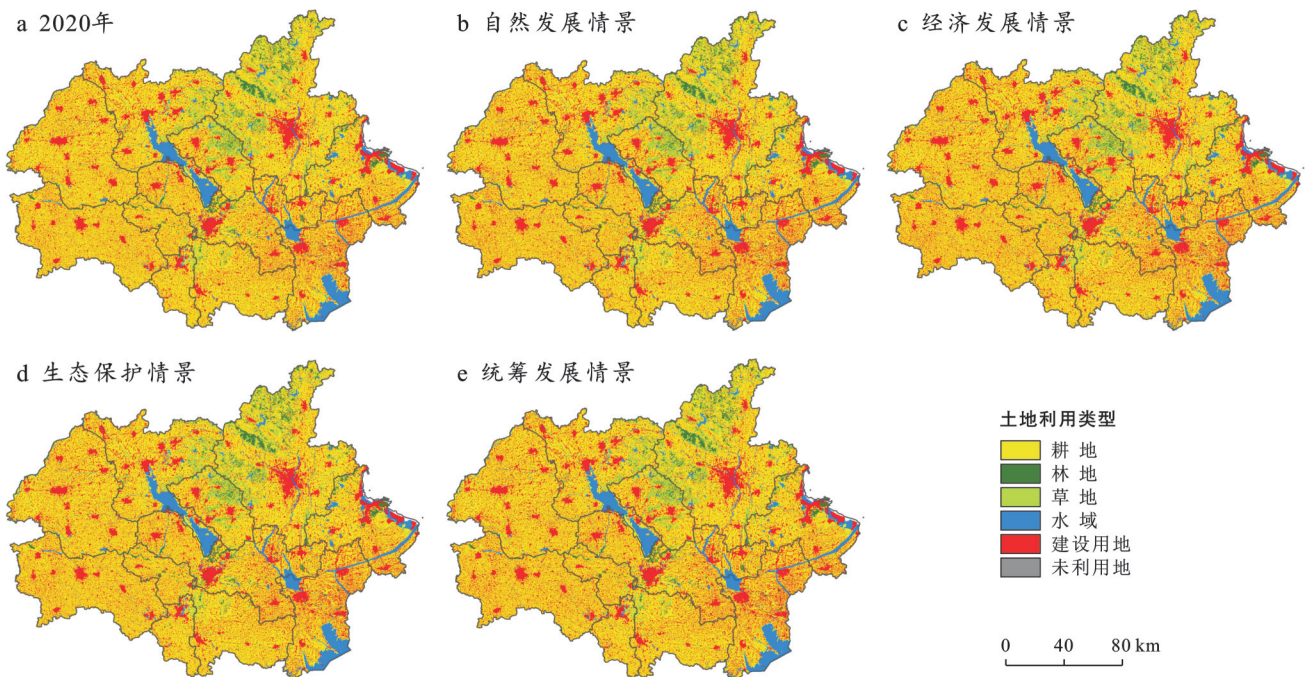


图 1 不同情景下 2030 年淮海经济区土地利用格局模拟结果

Fig.1 Simulation results of land-use patterns in Huaihai economic zone in 2030 under different scenarios

表 3 2030 年不同情景下淮海经济区各省份土地利用类型面积及其比例统计结果

Table 3 Area and ratio of land-use types in Huaihai economic zone under different scenarios in 2030

情景	省份	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地	
		面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %
2020 年	山东	30 442.17	67.46	1 750.52	3.88	2 654.27	5.88	2 264.22	5.02	7 895.86	17.50	121.34	0.27
	江苏	17 088.46	63.14	748.74	2.77	125.49	0.46	2 547.46	9.41	6 537.94	24.16	17.05	0.06
	河南	8 347.40	77.98	39.69	0.37	30.50	0.28	99.94	0.93	2 187.18	20.43	0.43	0.00
	安徽	9 745.50	76.90	227.13	1.79	329.90	2.60	109.59	0.86	2 258.20	17.82	3.11	0.02
	总和	65 623.54	68.66	2 766.09	2.89	3 140.17	3.29	5 021.21	5.25	18 879.18	19.75	141.94	0.15
2030 年 自然发展情景	山东	29 957.80	66.38	1 746.69	3.87	2 648.68	5.87	2 385.35	5.29	8 286.75	18.36	103.11	0.23
	江苏	16 727.94	61.81	737.71	2.73	124.16	0.46	2 614.02	9.66	6 815.61	25.18	45.72	0.17
	河南	8 095.86	75.63	39.34	0.37	30.45	0.28	121.24	1.13	2 416.74	22.58	1.53	0.01
	安徽	9 616.07	75.88	224.36	1.77	328.61	2.59	121.39	0.96	2 378.04	18.76	4.95	0.04
	总和	64 397.68	67.38	2 748.09	2.88	3 131.88	3.28	5 242.01	5.48	19 897.14	20.82	155.31	0.16
2030 年 经济发展情景	山东	29 795.68	66.02	1 746.08	3.87	2 640.17	5.85	2 341.69	5.19	8 510.72	18.86	94.04	0.21
	江苏	16 626.94	61.43	732.89	2.71	122.06	0.45	2 592.26	9.58	6 974.90	25.77	16.11	0.06
	河南	7 978.34	74.53	39.19	0.37	30.34	0.28	114.18	1.07	2 542.68	23.75	0.41	0.00
	安徽	9 556.01	75.40	223.16	1.76	326.60	2.58	117.22	0.92	2 447.35	19.31	3.09	0.02
	总和	63 956.98	66.92	2 741.32	2.87	3 119.18	3.26	5 165.35	5.40	20 475.65	21.42	113.65	0.12
2030 年 生态保护情景	山东	30 013.38	66.51	1 792.98	3.97	2 664.77	5.90	2 415.54	5.35	8 155.74	18.07	85.98	0.19
	江苏	16 822.54	62.16	753.34	2.78	122.92	0.45	2 628.96	9.71	6 719.19	24.83	18.20	0.07
	河南	8 161.69	76.24	40.63	0.38	30.59	0.29	125.49	1.17	2 346.09	21.92	0.67	0.01
	安徽	9 650.59	76.15	228.21	1.80	330.74	2.61	123.64	0.98	2 336.72	18.44	3.52	0.03
	总和	64 648.20	67.64	2 815.15	2.95	3 149.03	3.29	5 293.62	5.54	19 557.74	20.46	108.37	0.11
2030 年 统筹发展情景	山东	29 808.15	66.05	1 747.68	3.87	2 642.62	5.86	2 409.77	5.34	8 433.23	18.69	86.93	0.19
	江苏	16 644.30	61.50	737.22	2.72	122.67	0.45	2 626.55	9.70	6 918.65	25.56	15.76	0.06
	河南	8 008.41	74.81	39.32	0.37	30.39	0.28	125.01	1.17	2 501.63	23.37	0.40	0.00
	安徽	9 571.73	75.53	224.10	1.77	327.29	2.58	123.37	0.97	2 423.86	19.13	3.07	0.02
	总和	64 032.59	67.00	2 748.31	2.88	3 122.97	3.27	5 284.70	5.53	20 277.38	21.22	106.16	0.11

### 3.3 生态系统服务价值变化

基于 2000, 2010 和 2020 年土地利用数据和 2030 年土地利用变化情景模拟结果, 利用前述 ESV 评估方法得到研究区 2000, 2010 和 2020 年、2030 年各省不同地类及总体 ESV(表 4), 并采用自然断点法将 ESV 划分为低值区(0~0.6 亿元)、较低值区(0.6~1.5 亿元)、中值区(1.5~3 亿元)、较高值区(3~5.3 亿元)、高值区(5.3~9 亿元)5 个等级, 进一步分析研究区 ESV 空间分布特征(图 2)。

由表 4 可知, 2000, 2010 和 2020 年研究区 ESV 分别为 858.16, 836.48 和 853.73 亿元, 呈现先降后升趋势。2000—2010 年林地和草地 ESV 降幅较大, 分别下降了 7.22 和 23.70 亿元。其中山东省城市的林地和草地 ESV 降幅最大, 导致研究区整体 ESV 降低了 21.68 亿元。2010—2020 年耕地、林地和草地 ESV 略

有下降, 但水域 ESV 上升幅度较大, 其中河南省城市的水域 ESV 上升幅度最大, 以致研究区 ESV 增加了 17.25 亿元。

采用 ESV 区位熵对比分析 2000—2020 年研究区内城市与其所属省的 ESV(表 5)。结果显示, 研究区内绝大部分城市 ESV 区位熵都小于 1, 且逐年减少。这说明绝大部分城市 ESV 低于其所属省平均水平, 位于所属省 ESV 较低区域, 生态环境改善速度相对较慢, 这归因于这些城市位于各省的边缘位置, 经济发展相对滞后的同时, 城市间也处于行政分割而缺乏有效合作的状态。2030 年研究区自然发展、经济发展、生态保护、统筹发展 4 种情景下 ESV 分别为 871.84, 861.97, 879.54 和 874.83 亿元。自然发展情景下, 耕地、林地和草地减少的 ESV 小于水域和未利用地增加的 ESV, 导致 2030 年研究区 ESV 较 2020 年

增加 18.11 亿元。经济发展情景下,研究区 2030 年 ESV 较 2020 年增加 8.24 亿元,较生态保护情景少 17.57 亿元,表明大力发展经济会牺牲一部分生态效益。此情景允许建设用地向外扩展并大量占用其他地类,耕地、林地、草地和未利用地 ESV 呈不同幅度减少。生态保护情景下,2030 年研究区 ESV 大幅上

升,较 2020 年增加 25.82 亿元,林地、草地和水域增加的 ESV 远大于耕地和未利用地减少的 ESV,生态效益提升明显。统筹发展情景下,2030 年研究区 ESV 较 2020 年增加了 21.10 亿元,介于经济发展和生态保护情景之间,该情景综合了其他情景发展的主要特征,对经济与生态发展进行了权衡。

表 4 淮海经济区各类用地生态系统服务价值(ESV)及比例

Table 4 Ecosystem service value and proportion of various land-use types in Huaihai economic zone

情景	耕地		林地		草地		水域		未利用地		ESV 总量/亿元
	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	
2000 年	242.72	28.28	56.77	6.61	70.59	8.23	488.01	56.87	0.07	0.01	858.16
2010 年	240.20	28.72	49.55	5.92	46.89	5.61	499.78	59.75	0.05	0.01	836.48
2020 年	235.65	27.60	49.23	5.77	46.75	5.48	522.05	61.15	0.05	0.01	853.73
2030 年自然发展情景	231.25	26.52	48.91	5.61	46.63	5.35	545.01	62.51	0.05	0.01	871.84
2030 年经济发展情景	229.66	26.64	48.79	5.66	46.43	5.39	537.04	62.30	0.04	0.00	861.97
2030 年生态保护情景	232.14	26.39	50.10	5.70	46.88	5.33	550.38	62.58	0.04	0.00	879.54
2030 年统筹发展情景	229.93	26.28	48.92	5.59	46.49	5.31	549.45	62.81	0.04	0.00	874.83

表 5 淮海经济区各城市 2000—2020 年生态系统服务价值(ESV)区位熵

Table 5 Location entropy of ecological system service value at various cities in Huaihai economic zone from 2000 to 2020

省份	城市	ESV 区位熵		
		2000 年	2010 年	2020 年
安徽	淮北	0.43	0.42	0.41
	宿州	0.34	0.34	0.34
河南	商丘	0.49	0.45	0.45
	连云港	0.57	0.55	0.67
江苏	宿迁	1.13	1.08	1.08
	徐州	0.49	0.44	0.44
山东	菏泽	0.54	0.48	0.44
	济宁	1.77	1.67	1.49
	临沂	1.02	0.84	0.75
	枣庄	0.88	0.75	0.68

从空间分布来看(图 2),2000—2030 年研究区的 ESV 分布特征与土地利用格局基本一致。ESV 高值区集中于研究区的江河湖泊地带,中值区集中在较高值区周围,呈分散状态,低值区与较低值区则集中于研究区的各城市的中心,此区域以建设用地为主,这表明 ESV 与建设用地的增加存在显著的负相关性,且易受人类活动影响。2000—2010 年,ESV 中值区、较高值区和高值区明显减少,低值区和较低值区相应增加,究其原因,主要与该区域建设用地向外扩张以及发展经济有关。2010—2020 年,较高值区和

高值区略有增加,表明 10 a 间研究区在发展经济的同时,开展的生态治理工作取得了一定成果。2030 年自然发展情景下,研究区 ESV 低值区向外扩张,主要是自然发展趋势下城镇扩张导致。经济发展情景下,低值区明显向外扩张,其中山东省城市扩张最为明显,主要是土地利用类型倾向于向经济产出更多的地类转换。生态保护情景下,研究区 ESV 高值区明显增多,主要是因为限制了其他用地扩张对林地、草地和水域的侵占。统筹发展情景下,研究区 ESV 高值区增多,低值区扩张幅度较经济发展情景减少,是由于该情景在满足经济发展的同时加强对生态的保护。

### 3.4 生态系统服务价值敏感性分析

通过敏感性分析对研究区 ESV 进行检验,得到 2000—2030 年不同情景下各地类的敏感性指数(表 6)。各地类的敏感性指数均小于 1,说明研究区 ESV 对 ESV 系数缺乏弹性,证明研究结果合理<sup>[31]</sup>。

表 6 淮海经济区各类用地敏感性指数  
Table 6 Sensitivity index of various land-use types in Huaihai economic zone

情景	敏感性指数				
	耕地	林地	草地	水域	未利用地
2000 年	0.283	0.066	0.082	0.569	8.287 3E-05
2010 年	0.287	0.059	0.056	0.597	5.630 5E-05
2020 年	0.276	0.058	0.055	0.611	6.083 2E-05
2030 年自然发展情景	0.265	0.056	0.053	0.625	6.517 9E-05
2030 年经济发展情景	0.266	0.057	0.054	0.623	4.824 2E-05
2030 年生态保护情景	0.264	0.057	0.053	0.626	4.508 1E-05
2030 年统筹发展情景	0.263	0.056	0.053	0.628	4.440 0E-05

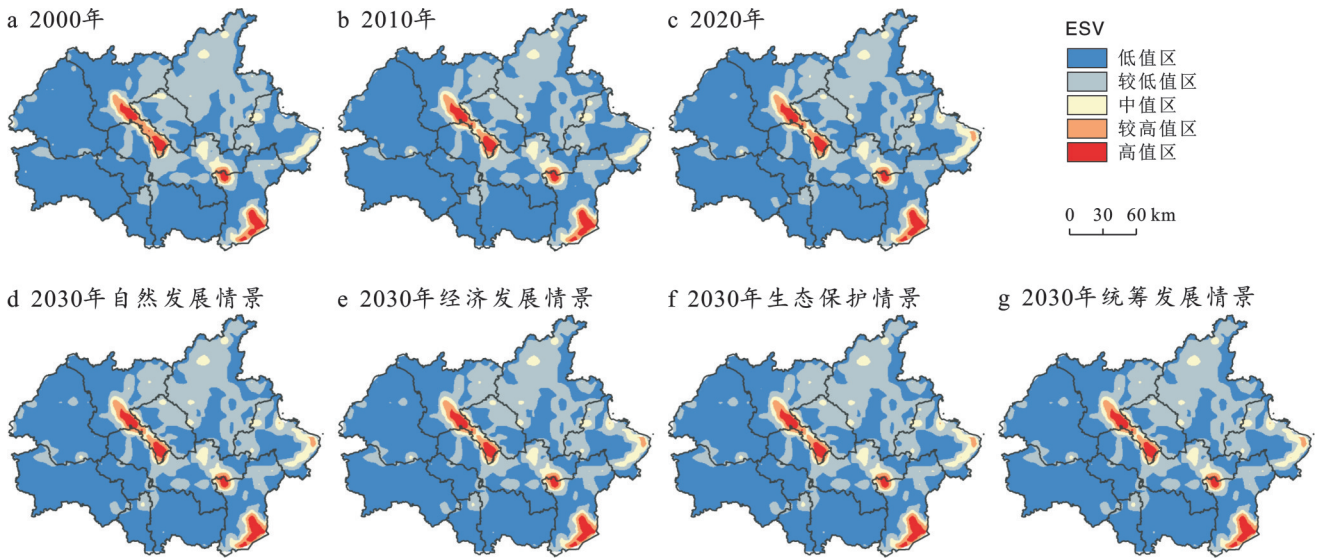


图2 淮海经济区2000—2030年ESV空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem service value in Huaihai economic zone from 2000 to 2030

## 4 讨论

省际交界地区是中国特殊地理空间,本研究以典型省际交界地区淮海经济区为研究对象进行土地利用及生态系统服务价值预测研究,以期为中国省际交界地区生态经济统筹建设和区域可持续发展提供科学参考和决策依据。研究发现,研究区2000—2020年耕地占土地总面积的比重均在65%以上,而建设用地所占比例均超过15%,其中江苏城市的建设用地占比最大。河南省城市的林地、草地比例最低。研究时段内土地利用结构变化明显,耕地、林地、草地面积减小,水域和建设用地面积增加。在此期间,生态系统服务价值呈现先降后升趋势,主要是由于2000—2010年山东省城市的林地和草地ESV大幅下降,而2010—2020年河南省城市的水域ESV大幅上升,表明土地利用是影响生态系统服务价值的主要因素。通过计算ESV区位熵发现研究区生态环境改善速度相对较慢,归因于城市间由于行政分割而缺乏有效合作。研究区2030年4种情景下土地利用类型不同程度改变,但生态系统服务价值整体提升,其中自然发展情景使得生态效益得以延续,说明了生态治理成效的滞后性。经济发展情景较生态保护情景有所减少,表明大力发展经济会牺牲一部分生态效益。生态保护情景生态系统服务价值较2020年大幅增加,生态效益提升明显。统筹发展情景生态系统服务价值介于经济发展和生态保护情景之间,该情景综合了其他情景发展的主要特征,对经济与生态发展进行了权衡。未来研究区应注重生态经济协调发展,各城市间加强合作,充分发挥经济区

的协调作用,促进该区域生态系统的可持续发展。但在本研究中,利用PLUS模型进行土地利用多情景模拟时,参数及情景设置存在一定主观性;ESV计算虽基于NPP、粮食产量和社会发展进行了修正,但仍不够完善,未来研究应综合考虑多种因素,完善改进ESV评估方法,增强ESV测算的准确性。

## 5 结论

(1) 淮海经济区主要土地利用类型为耕地,其次为建设用地、水域、草地。2000—2020年,研究区的土地利用变化呈现出明显的变动,耕地、林地、草地的面积减小,水域和建设用地的面积增加,耕地与建设用地之间的转移最为密切,耕地转出面积为 $6\,127.58\text{ km}^2$ ,其中89.76%转为建设用地。

(2) 淮海经济区2030年土地利用不同情景模拟结果各异。自然发展情景下,耕地、林地、草地面积减少,建设用地、水域、未利用地面积增加;经济发展情景下,各地类的变化幅度比自然发展情景更大,耕地、林地和草地不断向建设用地转化,生态环境将受不利影响;生态保护情景下,土地利用格局呈现耕地减少,建设用地、林地、草地和水域增加,未利用地略有下降的演变趋势,生态环境将得到明显的改善;统筹发展情景下,各地类面积基本介于经济发展和生态保护情景之间。

(3) 淮海经济区2000,2010和2020年ESV分别为 $8.58 \times 10^{10}$ , $8.36 \times 10^{10}$ , $8.54 \times 10^{10}$ 元,呈现先降后升趋势。2030年自然发展、经济发展、生态保护、统筹发展4种情景下ESV分别为 $8.72 \times 10^{10}$ , $8.62 \times 10^{10}$ , $8.80 \times 10^{10}$ 和 $8.75 \times 10^{10}$ 元,4种情景的ESV较2020年

均有不同幅度的增加。研究区的ESV分布特征与土地利用格局基本一致,高值区主要分布在研究区的江河湖泊地带,中值区集中在较高值区周围,呈分散状态,低值区与较低值区则集中于研究区的各城市中心。

(4) 淮海经济区绝大部分城市ESV低于其所属省平均水平,生态环境改善相对较慢,这归因于这些城市间处于行政分割而缺乏有效合作的状态。因此,要建立健全省际交界区域城市间合作发展机制,充分发挥经济区的协调作用,实现行政区和经济区的优势互动,从而促进该区域生态系统的可持续发展。

### 参考文献(References)

- [1] 冉璇,李渊,郭宇龙,等.基于InVEST模型的钱江源国家公园生态系统服务评估及权衡协同关系研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(9):1932-1948.  
Ran Xuan, Li Yuan, Guo Yulong, et al. Ecosystem services assessment and trade-off synergy relationships in Qianjiangyuan National Park based on InVEST model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(9):1932-1948.
- [2] 耿鑫,胡实,肖玉,等.基于生态系统服务价值的东北农牧交错区土地利用格局优化与评价[J].自然资源学报,2022,37(7):1799-1814.  
Geng Xin, Hu Shi, Xiao Yu, et al. Land use pattern optimization and evaluation based on ESV of agro-pastoral ecotone in Northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(7):1799-1814.
- [3] 林菲,池泽龙,杨伟,等.1980—2020年汾河流域生态系统服务价值的时空变化[J].水土保持通报,2022,42(2):322-329.  
Lin Fei, Chi Zelong, Yang Wei, et al. Spatial and temporal changes of ecosystem service value in Fenhe River Basin from 1980 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):322-329.
- [4] 华文剑,陈海山,李兴.中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J].地球科学进展,2014,29(9):1025-1036.  
Hua Wenjian, Chen Haishan, Li Xing. Review of land use and land cover change in China and associated climatic effects [J]. Advances in Earth Science, 2014,29(9):1025-1036.
- [5] 滕皎,李慧,赵彩云,等.基于土地利用变化的长江上游生态系统服务价值核算及预测模拟[J].西北林学院学报,2024,39(2):274-284.  
Teng Jiao, Li Hui, Zhao Caiyun, et al. Accounting and predicting simulation of the ecosystem service value in the upper reaches of the Yangtze River based on land use change [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(2):274-284.
- [6] Li Wei, Chen Xi, Zheng Jianghua, et al. A multi-scenario simulation and dynamic assessment of the ecosystem service values in key ecological functional areas: A case study of the Sichuan Province, China [J]. Land, 2024,13(4):468.
- [7] 蔡晨茵,赵立科,徐慧,等.基于功能价值法的河流生态系统服务价值优化综合评估[J].水电能源科学,2023,41(9):44-47.  
Cai Chenyin, Zhao Like, Xu Hui, et al. Optimization and comprehensive evaluation of river ecosystem service value based on functional value method [J]. Water Resources and Power, 2023,41(9):44-47.
- [8] 景晓栋,田贵良,班晴晴,等.基于文献计量的21世纪以来我国生态系统服务研究现状及发展趋势[J].生态学报,2023,43(17):7341-7351.  
Jing Xiaodong, Tian Guiliang, Ban Qingqing, et al. Research status and development trend of ecosystem services in China since the 21st century based on bibliometrics [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(17):7341-7351.
- [9] Wang Zongming, Mao Dehua, Li Lin, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992 - 2012 in the Sanjiang Plain of China [J]. Science of The Total Environment, 2015,514:119-130.
- [10] 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 Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, 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.
- [11] 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.
- [12] 王耕,张芙蓉.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 Geng, Zhang Furong. 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.
- [13] Cao Yuhong, Cao Yuandan, Chen Zhiyu, et al. Ecosystem service value evolution and security pattern optimization in Huaihai economic zone [J]. Journal of Resources and Ecology, 2022,13(6):977-985.
- [14] Tao Jieyi, Lu Yuqi, Ge Dazhuan, et al. The spatial pattern of agricultural ecosystem services from the production-living-ecology perspective: A case study of the Huaihai Economic Zone, China [J]. Land Use Policy, 2022,122:106355.
- [15] 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.
- Wang Dan, Lan Anjun, Fan Zemeng, 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.
- [16] Zhang Xuesong, Ren Wei, Peng Hongjie. Urban land use change simulation and spatial responses of ecosystem service value under multiple scenarios: A case study of Wuhan, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109526.
- [17] 刘志勇, 方朝阳, 蔡振饶, 等. 多情景下鄱阳湖滨湖区生态系统服务价值预测[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 218-227.
- Liu Zhiyong, Fang Chaoyang, Cai Zhenrao, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ESV for Poyang Lake lakeside area [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(7): 218-227.
- [18] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [19] Wang Ziyao, Li Xin, Mao Yueting, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108499.
- [20] 张启扬, 刘仁志, 栾朝旭. 基于 PLUS 模型的典型农牧交错带土地利用驱动力分析与多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 368-378.
- Zhang Qiyang, Liu Renzhi, Luan Chaoxu. Analysis of driving force and multi-scenario simulation of land use in a typical agro-pastoral ecotone based on the PLUS model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 368-378.
- [21] 李安林, 周艳, 唐丽毅, 等. 怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估: 基于 PLUS 模型的多情景分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(1): 140-149.
- Li Anlin, Zhou Yan, Tang Liyi, et al. Land use simulation and ecosystem services values evaluation in Nujiang prefecture: A multiple-scenario analysis based on plus model [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(1): 140-149.
- [22] 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.
- Niu Tongli, Xiong Lihua, Chen Jie, 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.
- [23] 杨伶, 王金龙, 周文强. 基于多情景模拟的洞庭湖流域 LUCC 与生境质量耦合演变分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(2): 863-873.
- Yang Ling, Wang Jinlong, Zhou Wenqiang. Coupling evolution analysis of LUCC and habitat quality in Dongting Lake basin based on multi-scenario simulation [J]. China Environmental Science, 2023, 43(2): 863-873.
- [24] Jia Changgeng, Fan Yu, Wei Chaoxiang, et al. Identifying internal distributions and multi-scenario simulation of ecosystem service value in Liaohe basin based on geo-detector and PLUS model [J]. Wetlands, 2023, 44(1): 7.
- [25] 金一诺, 黄银洲, 尤凤, 等. 基于 Markov-PLUS 模型的石羊河流域土地利用及生态系统服务价值模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(5): 130-139.
- Jin Yinuo, Huang Yinzhou, You Feng, et al. Simulation of land use and ecosystem service value in Shiyang River basin based on Markov-PLUS model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(5): 130-139.
- [26] 崔继昌, 方斌, 陈添悦. 省际交界地区城市生态效率时空演变研究: 以淮海经济区为例[J]. 城市问题, 2020(9): 4-12.
- Cui Jichang, Fang Bin, Chen Tianyue. Study on spatio-temporal evolution of urban ecological efficiency in inter-provincial border area: Taking Huaihai economic zone as an example [J]. Urban Problems, 2020(9): 4-12.
- [27] 滕飞, 申红艳. 基于多区域中心城市的省际交界地区区域合作研究[J]. 中国软科学, 2017(6): 81-88.
- Teng Fei, Shen Hongyan. Study on regional cooperation in inter-provincial border area with multiple regional center cities [J]. China Soft Science, 2017(6): 81-88.
- [28] 仇方道, 刘继斌, 陈然, 等. 淮海经济区工业增长与碳排放异速关系演化及协同机制[J]. 资源科学, 2024, 46(1): 69-84.
- Qiu Fangdao, Liu Jibin, Chen Ran, et al. Evolution of the asynchronous relationship between interprovincial industrial growth and carbon emissions and its coordination mechanism: A case study of the Huaihai economic zone [J]. Resources Science, 2024, 46(1): 69-84.
- [29] 解天琪, 李龙, 陈鑫, 等. 基于土地利用的淮海经济区碳储量估算与预测[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(1): 131-142.
- Xie Tianqi, Li Long, Chen Xin, et al. Estimation and prediction of carbon storage based on land use in the Huaihai economic zone [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(1): 131-142.