

资源枯竭型城市多情景生态系统服务价值评估

陈怀志

(南通大学商学院,江苏 南通 226019)

摘要:以资源枯竭型城市徐州市为研究对象,基于5期土地利用数据,耦合MOP-PLUS模型预测2025年、2030年不同情景下的土地利用格局。基于土地利用预测数据,采用当量因子法量化徐州市生态系统服务价值(ESV)。结果表明:(1)2000—2020年间,总体ESV呈下降趋势,由633.23亿元下降至584.81亿元,但ESV下降幅度逐渐减缓,呈现较好的生态保护态势。(2)空间ESV上呈现高低值交织分布,ESV最优区主要分布在河流、湖泊等水域附近,低值ESV集中在各区县中心,同时9项服务冷热点高度重叠,热点重叠区域主要在生态系统相对完整的山地丘陵和水域,冷点重叠区域主要在建成区。(3)生态系统服务在惯性情景(BAU)、经济优先情景(EP)、生态优先情景(ELP)和可持续发展情景(SDGs)4种情景下的价值从高到低依次为ELP>BAU>SDGs>EP。较EP、ELP情景,BAU情景下的未来ESV空间分布与SDGs情景最为相似,显示出在过去21a间,徐州市采取了兼顾生态、经济的可持续发展政策。但城市建设趋于饱和,未来需要将建设用地面积限制在3135.83 km²以内。(4)提出“两河、两湖、两横三纵、多节点”的生态修复与保护格局,可为未来城市合理规划提供参考。

关键词:生态系统服务价值;多情景模拟;资源枯竭型城市;徐州市

中图分类号:F301.24

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2024.03.006

Multi-scenario assessment of ecosystem service value in resource-exhausted city

Chen Huaizhi

(School of Business, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Taking Xuzhou City, a resource-exhausted city, as the research object, the land use pattern under different scenario in 2025 and 2030 was predicted by coupling the MOP-PLUS model based on 5 periods of land use data. Based on the land use prediction data, the Equivalent Factor Method was used to quantify the ESV ecosystem service value of Xuzhou City. The results showed that (1) the decline of ESV in Xuzhou City gradually slowed down during the period of 2000—2030, presenting a better ecological protection trend. (2) The ESV of Xuzhou City featured a spatially intertwined distribution of high and low values, with a high degree of overlap of nine services. (3) During the past 21 years, in Xuzhou City a sustainable development policy has been adopted that takes into account both ecology and economy, and the nine services have developed in a highly coordinated manner. However, urban construction tends to be saturated, and in the future, it is necessary to keep the construction land area within 3135.83 km².

Key words: Ecosystem service value; Multi-scenario modelling; Resource-exhausted city; Xuzhou City

生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)指人类从生态系统中直接或间接地获得收益的客观体现,包括有形的物品供给和无形的服务供给,是反映区域生态保护态势及生态价值的重要指标^[1-2]。在城镇化初期,依托大量的土地资源财富,城市化水平不断提高。然而,长期以来土地资源的

不合理利用使得生态系统服务压力不断加大,支持、调节服务功能逐渐减少,严重制约了城市发展^[3-4]。因此,探索土地利用变化与ESV之间的关系对于维持生态系统健康和土地资源的可持续利用至关重要^[5]。

在生态系统服务价值评估研究中,Costanza等^[1]

收稿日期:2024-03-31;修回日期:2024-04-10

作者简介:陈怀志(1999—),男,江苏连云港人,硕士研究生。主要从事土地资源管理研究。E-mail:15895783987@163.com

于1997年首次提出ESV评估的“当量因子法”,并将其应用于全球17项生态系统服务经济价值的评估研究中。在此基础上,谢高地等^[5]不断修订该方法,确定了中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量,广泛应用于中国生态系统服务价值研究中^[6]。随着研究的深入,学者们开始将土地利用模拟与ESV评估相结合,模拟未来ESV的变化趋势^[7-8]。模拟的方法可分为2类:数量预测模型和空间预测模型。数量预测模型通过给定方案优化土地利用,从而增加ESV,常用的模型有多准则评价(MCE)^[9]和多目标规划(MOP)^[10],但这种方法不能揭示土地利用和ESV的空间变化。空间预测模型通过生成优化的土地利用空间模式,常用的模型有CA-Markov模型^[11-12]、CLUE-S模型^[13-15]、FLUS模型^[16]和PLUS模型^[17],但依赖于自身的转换规则,缺乏对土地利用结构的数量优化。综合而言,上述模型大多仅局限于定量优化和空间优化中的某一方面,无法实现ESV和土地资源的最优配置^[18-19]。

徐州市作为全国典型的煤炭资源再生型城市,于2012年根据《国务院关于促进资源型城市可持续发展的若干意见》被列入第三批资源枯竭型城市名单^[20]。如今,资源枯竭型城市正面临转型关键点^[21],定量评估以徐州市为代表的资源枯竭型城市生态系统服务价值,可以为资源枯竭型城市未来土地资源的合理利用和城市的转型发展提供数据参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

徐州市地处江苏省西北部、华北平原的东南部,长江三角洲北翼。位于华北平原的东南部,介于东经116°22′—118°40′、北纬33°43′—34°58′。总面积11 258 km²。下辖5个市辖区、3个县、代管2个县级市,总面积11 765 km²,常住人口902.85万人。2021年,地区GDP为8 117.44亿元。

1.2 数据来源

研究数据包括土地利用数据、驱动因素数据和城市统计数据。土地利用数据来自中国科学院地理科学与资源研究所,选取2000年、2005年、2010年、2015年、2020年5期数据,并将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,空间分辨率为30 m。数字高程数据(DEM)来自

地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);GDP、年降水量、年均温度、土壤类型、人口密度数据来自中国科学院资源环境与科学数据中心;各级道路、居民点等矢量数据来自全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>);粮食产量、种植面积来自《江苏省统计年鉴》,粮食价格来自《全国农产品成本收益资料汇编》。空间坐标系均统一,重采样为30 m。

2 研究方法

2.1 多情景设置

2.1.1 MOP-PLUS模型 结合MOP-PLUS模型和相关政策设置惯性情景(Business as Usual,BAU)、经济优先情景(EP)、生态优先情景(ELP)和可持续发展情景(SDGs),结合MOP-PLUS模型模拟预测2025年、2030年土地利用结构。

2.1.2 情景公式及约束条件 耦合MOP-PLUS模型定义3个优化目标:(1) $\max \{f_1(x)\}$,经济效益最大化;(2) $\max \{f_2(x)\}$,生态效益最大化。(3) $\max \{m[f_1(x) + n f_2(x)]\}$,两者兼顾达到最优比例, $m=0.24$, $n=0.76$ 。数学表达如表1所示,限制条件如表2所示。

表1 多目标设计的目标优化公式

目标	数学表达式	描述
经济效益	$f_1(x) = 1.87x_1 + 1.35x_2 + 28.69x_3 + 3.28x_4 + 67.44x_5 + 0x_6$	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的像元数
生态效益	$f_2(x) = 3.62x_1 + 12.9x_2 + 5.357x_3 + 20.8x_4 + 0x_5 + 0.64x_6$	
EP	$\max \{f_1(x)\}$	
ELP	$\max \{f_2(x)\}$	
SDGs	$\max \{m[f_1(x) + n f_2(x)]\}$	

2.2 生态系统服务价值计算

谢高地等^[5]提出的中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表,将生态系统服务分为9类。为了解决地区差异问题,对徐州市ESV当量进行修正计算。具体包括:(1)生物量因子修正;(2)粮食价格修正;(3)植被净初生产力(NPP)、降水量、土壤保持量修正。具体计算式如下:

$$\lambda_1 = \frac{NPP}{NPP_1}; \lambda_2 = \frac{PRE}{PRE_1}; \lambda_3 = \frac{SC}{SC_1}$$

式中, λ_1 代表对于食物生产、原材料、气体调节、气候调节、废物处理、维持生物多样性和娱乐文

表 2 限制条件及描述		
年份	限制条件	描述
2025 年	$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 12\ 287\ 345$	总像元数为 12 287 345
	$7\ 930\ 147 \leq x_1 \leq 8\ 234\ 840$	像素数下限设为 2030 的像元数,上限设为 2020 的像元数
	$x_2 \geq 419\ 247$	不超过 2030 年的 90%
	$x_3 \geq 37\ 182.6$	不超过 2030 年的 90%
	$494\ 063.1 \leq x_4 \leq 547\ 208$	不小于 2030 年的 90%
	$x_5 \geq 2\ 991\ 463$	不少于 2020 年
	$0 \leq x_6 \leq 6\ 764$	维持现状为上限
2030 年	$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 12\ 287\ 345$	总像元数为 12 287 345
	$7\ 767\ 923 \leq x_1 \leq 8\ 234\ 840$	像素数下限设为 2035 的像元数,上限设为 2020 的像元数
	$x_2 \geq 416\ 952$	不少于 2035 年像元数的 90%
	$x_3 \geq 40\ 378.5$	不少于 2035 年像元数的 90%
	$494\ 754.3 \leq x_4 \leq 547\ 208$	不少于 2035 年像元数的 90%
	$x_5 \geq 2\ 991\ 463$	不少于 2020 年
	$0 \leq x_6 \leq 6\ 764$	维持现状为上限

表 3 徐州市单位面积生态系统生态服务价值系数						元/(hm ² ·a)
一级分类	二级分类	林地	草地	耕地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	2 187. 41	2 850. 27	6 628. 53	3 513. 12	132. 57
	原材料生产	19 753. 01	2 386. 27	2 585. 13	2 319. 98	265. 14
调节服务	气体调节	28 635. 24	9 942. 79	4 772. 54	3 380. 55	397. 71
	气候调节	26 978. 11	10 340. 50	6 429. 67	13 654. 77	861. 71
	水文调节	19 981. 23	7 425. 79	3 761. 75	91 698. 69	341. 98
支持服务	废物处理	11 401. 07	8 749. 66	9 213. 65	98 433. 64	1 723. 42
	土壤保持	24 433. 81	13 614. 86	8 934. 75	2 492. 01	1 033. 27
	维持生物多样性	29 894. 66	12 395. 35	6 761. 10	29 430. 66	1 590. 85
文化服务	娱乐文化	13 787. 34	5 766. 82	1 126. 85	29 430. 66	1 590. 85
总计		177 051. 88	73 472. 30	50 213. 97	274 354. 09	7937. 49

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年生态系统服务价值时空演变分析

3.1.1 2000—2020 年生态系统服务价值时间分析

(1)总体 ESV 时间变化。2000—2020 年间,徐州市总体 ESV 呈持续下降趋势,由 633.23 亿元下降至 584.81 亿元(见表 4)。特别是 2005—2010 年间,总体 ESV 下降幅度最大,累计减少 38.26 亿元,下降主要来自于耕地和林地,分别减少 11.47 亿,21.42 亿元,两者之和占累计减少量的 85.96%。2010 年后,总体 ESV 下降幅度显著降低,累计减少 9.60 亿元。其中草地和未利用地 ESV 出现上升趋势,分别累计增长 0.24 亿,0.01 亿元。这一现象表明徐州市矿城关系进一步融合,通过加强土地规划管理,重点关注矿区修复与保护,极大限度保障草地面积,以减缓 ESV 的下降趋势。

化的修正系数; λ_2 代表对于水文调节功能的修正系数; λ_3 代表保持土壤的修正系数。 NPP 与 NPP_1 分别代表徐州市和全国的平均 NPP 值; PRE 和 PRE_1 分别代表徐州市年平均降水量与全国平均降水量; SC 与 SC_1 表示徐州市平均土壤保持量与全国平均土壤保持量。

修正后的 ESV 系数如表 3 所示,生态系统服务功能价值的计算式为

$$ESV_k = \sum_{m=1}^6 V_{km} A_m ; ESV = \sum_{k=1}^9 ESV_k$$

式中, ESV 为研究区内生态系统服务总价值; A_m 为第 m 种土地类型的面积; ESV_k 为第 k 项 ESV ; V_{km} 为第 m 种土地利用类型的第 k 项 ESV 。

(2)单项 ESV 时间变化。2000—2020 年间,徐州市 9 个服务单项 ESV 下降趋势逐渐减缓(见表 5)。2000—2005 年间,各单项服务 ESV 整体呈缓慢下降趋势,其中水文调节和废物处理服务 ESV 下降最大,分别减少 0.15 亿,0.16 亿元。2005—2010 年间,各单项服务 ESV 下降趋势显著增大。其中维持生物多样性、土壤保持、气体调节和气候调节服务的 ESV 下降最大,占总减少量的 58%,主要是因为林地提供调节和支持服务的能力最强,价值系数远高于其他地类,它的下降将严重影响生态系统的平衡稳定。2010—2020 年间,各单项服务 ESV 下降趋势相对减缓,其中气体调节、气候调节和维持生物多样性服务得到显著改善,减少量较 2010—2020 年,分别少下降 4.18 亿,4.13 亿,4.68 亿元,主要是政府重点关注矿区复绿,草地的缓慢增长,在一定程度上避免了 ESV 的大幅度下降。

表 4 2000—2020 年各类土地利用的 <i>ESV</i> 变化情况								
地类	<i>ESV</i>					变化量		
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2020 年
耕地	392.94	392.86	381.39	379.33	372.21	-0.08	-11.47	-9.18
林地	97.19	97.10	75.68	75.48	75.07	-0.09	-21.42	-0.61
草地	6.05	6.06	2.02	2.01	2.26	0.01	-4.04	0.24
水域	137.01	136.63	135.29	134.89	135.23	-0.38	-1.34	-0.06
未利用地	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0	0.01	0.01
总计	633.23	632.67	594.41	591.75	584.81	-0.56	-38.26	-9.60

表 5 2000—2020 年研究区 <i>ESV</i> 变化情况									
一级分类	二级分类	<i>ESV</i>					变化量		
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2020 年
供给服务	食物生产	55.06	55.04	53.09	52.81	51.88	-0.02	-1.95	-1.21
	原材料生产	32.43	32.41	29.29	29.16	28.76	-0.02	-3.12	-0.53
调节服务	气体调节	55.58	55.55	50.43	50.20	49.49	-0.03	-5.12	-0.94
	气候调节	72.80	72.75	67.39	67.07	66.15	-0.04	-5.37	-1.24
	水文调节	86.81	86.67	82.54	82.23	81.79	-0.15	-4.13	-0.75
支持服务	废物处理	128.24	128.08	123.64	123.11	121.93	-0.16	-4.44	-1.71
	土壤保持	85.70	85.67	79.91	79.51	78.24	-0.03	-5.76	-1.67
	维持生物多样性	85.04	84.98	78.99	78.64	77.69	-0.07	-5.98	-1.30
文化服务	娱乐文化	31.57	31.51	29.13	29.03	28.89	-0.05	-2.38	-0.24
总计		633.23	632.67	594.41	591.75	584.81	-0.56	-38.26	-9.60

3.1.2 2000—2020 年生态系统服务价值空间分析

(1) 总体 *ESV* 空间变化分析。图 1 为徐州市 *ESV* 的空间分布。根据自然断点法按价值从小到大

大分为 5 个等级,Ⅰ级(<0.3 亿元)、Ⅱ级(0.3 亿—0.7 亿元)、Ⅲ级(0.7 亿—1.3 亿元)、Ⅳ级(1.3 亿—2.2 亿元)、Ⅴ级(>2.2 亿元)。

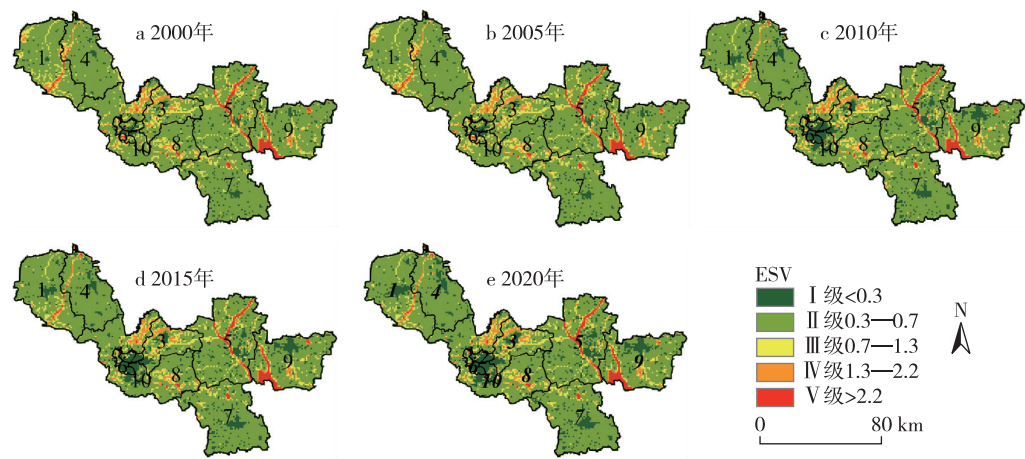


图 1 徐州市 *ESV* 的时空分布(2000—2020 年)

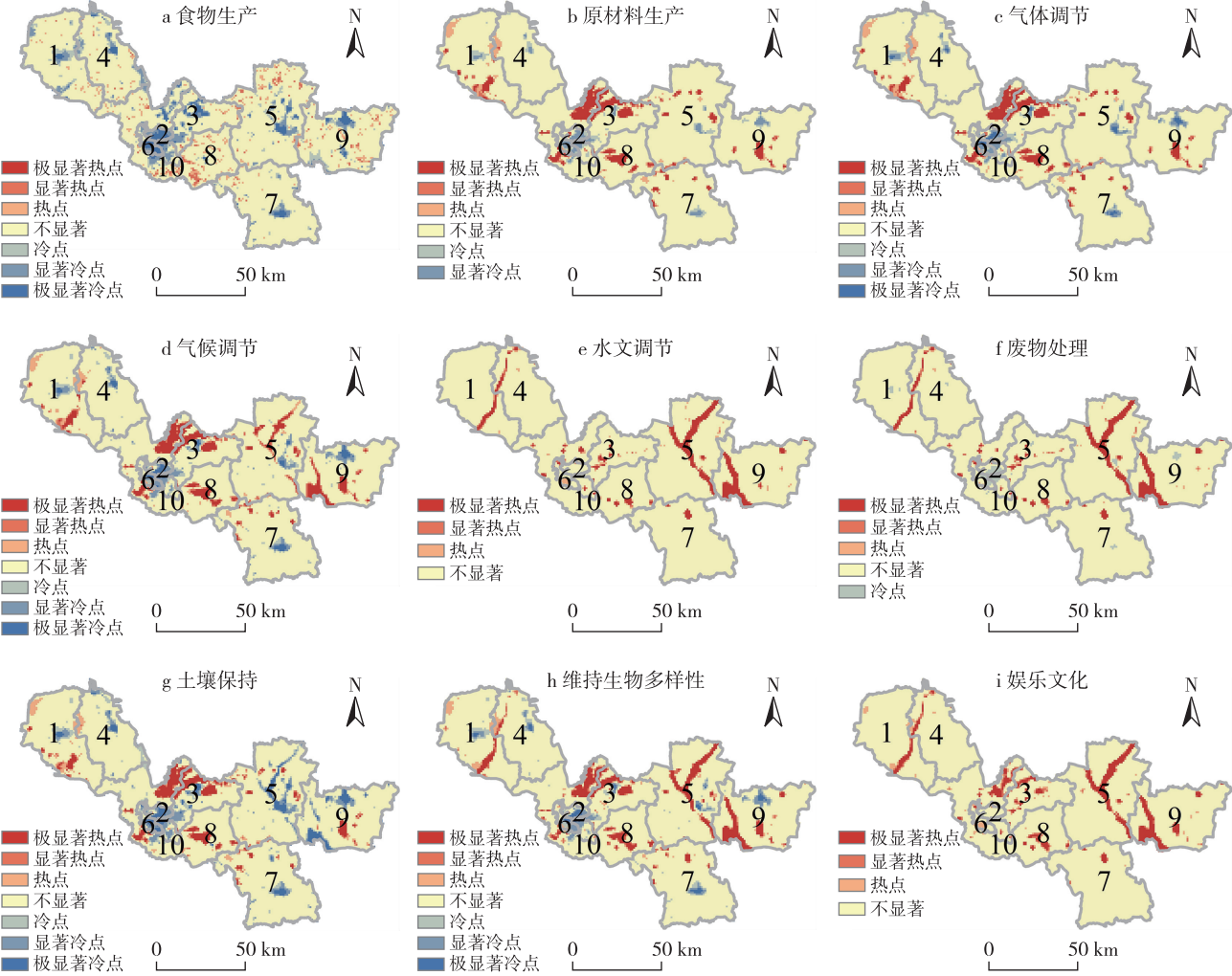
从空间上看,*ESV* 低值区与高值区呈交织带分布。Ⅰ级分布区主要集中在鼓楼区、泉山区、云龙区。这些地区是徐州市经济发展最为迅速,土地集约利用程度最高的区域。频繁的生产生活活动使

得Ⅰ级分布区向外辐射扩张,Ⅱ级分布区逐渐向Ⅰ级分布区转变。Ⅱ级分布区除围绕在Ⅰ级分布区附近外,还广泛分布在丰县、沛县和睢宁县部分地区,总体呈现水平跨度长,分布范围广的特点。Ⅲ

级分布区主要集中在贾汪区和铜山区南部。这部分地区曾是徐州市工矿区分布最广泛的地区,大规模的资源开采活动产生了许多矿坑,而矿坑产生的积水有助于调节区域内的水循环,防止洪水、干旱等极端事件的发生,在一定程度上保障了区域生态系统的平衡稳定。Ⅳ级分布区和Ⅴ级分布区相互融合,主要集中在邳州市和新沂市生态系统相对完整的河流沿岸。

(2) 单项 ESV 冷、热点分析。9 项服务冷热点分布具有高度重叠性,重叠区域主要在建成区及生态系统相对完整的山地丘陵和水域(如图 2)。原材料生产、气体调节、气候调节、土壤保持和维持生物多样性服务的冷热点区域在空间分布上较为相似,

热点区域主要分布于贾汪区和铜山区北部。该区域生态系统相对完整,以山地丘陵和湖泊地貌为主,具备较强的生态稳定性和自我恢复能力。冷点区域主要分布于鼓楼区、泉山区和云龙区,该区域经济发展迅速,空间分布上以商业区和住宅区为主,缺乏相对完整的生态系统。气候调节和维持生物多样性服务的热点区域主要分布在邳州市和新沂市的京杭运河流域,空间上呈现连片状分布。此外,水文调节、废物处理和娱乐文化的热点区域在空间分布上较为相似,热点区域集中于邳州市和新沂市的京杭运河和沂河流域,进一步表明水域在调节生态平衡的重要地位。



注:图中数字区域表示:1.丰县;2.鼓楼区;3.贾汪区;4.沛县;5.邳州市;6.泉山区;7.睢宁县;8.铜山区;9.新沂市;10.云龙区

图 2 徐州市生态系统服务冷、热点空间分布

3.2 2020—2030年生态系统服务价值情景模拟分析

3.2.1 基于 Markov-PLUS 的 BAU 情景 在 BAU 情景下,各项服务功能维持稳定,产业发展和高效集约化用地使得 2025 年,2030 年的整体经济效益较 2020 年分别增加 83.84 亿,170.59 亿元(见表 6)。然而,在城市扩张的影响下,建成区侵占耕地的程度会更大。与 2020 年相比,2025 年,2030 年

建设用地分别增加 133.39,265.87 km²,耕地分别减少 150.85,280.05 km²。建成区及铁路等交通设施持续增加,在一定程度上制约生态系统的自我恢复能力,致使总体 ESV 分别下降 9.38 亿,16.35 亿元。可见,尽管开展了全面的生态转型工作,但城市仍在扩张,建设用地与耕地的冲突,将成为威胁城市生态环境和国家粮食安全的重要方面。

表 6 2020 年、2025 年、2030 年土地利用类型的面积、ESV 和经济效益

年份	指标	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	总计
2020 年	面积/km ²	7 412.52	423.97	30.71	492.91	6.09	2 692.42	11 032.15
	ESV/亿元	372.21	75.07	2.26	135.23	0.05	0.00	584.81
	经济效益/亿元	138.61	5.72	8.81	18.93	0.00	1 815.77	1 987.84
2025 年	面积/km ²	7 261.66	41.968	29.76	489.30	5.93	2 825.82	11 032.15
	ESV/亿元	364.64	74.31	2.19	134.24	0.05	0.00	575.43
	经济效益/亿元	135.79	5.67	8.54	16.05	0.00	1 905.73	2 071.78
2030 年	面积/km ²	7 132.46	417.36	28.94	489.30	5.80	2 958.29	11 032.15
	ESV/亿元	358.15	73.89	2.13	134.24	0.05	0.00	568.46
	经济效益/亿元	133.38	5.63	8.3	16.05	0.00	1 995.07	2 158.43

3.2.2 基于 MOP-PLUS 的多目标优化情景 在 EP 情景下,建设用地扩张面积有所增加,未利用地和水域面积维持稳定,建成区经济效益显著提高,有效弥补了耕地收缩带来的经济损失(见表 7)。与 BAU 情景相比,2025 年,2030 年耕地的经济效益虽然损失了 2.66 亿,1.30 亿元,但建设用地的经济效益增加 110.06 亿,103.35 亿元。这种转变凸显了土地的高效集约利用对于经济增长的积极作用,有效地保障了经济的快速增长,使得整体经济效益净值分别增加 106.65 亿,100.64 亿元。可见,通过优化土地资源配置,提升土地利用效率,可以实现经济的快速增长。

在 ELP 情景下,建设用地扩张有所缓解,优化后的林地、草地 ESV 净值增加,有效弥补了因建设用地扩张而导致的 ESV 损失。较 BAU 情景,2025 年林地、草地和水域 ESV 分别增加 26.23 亿,0.05 亿,0.14 亿元,总体 ESV 净增量为 11.91 亿元。到 2030 年,林地、草地和水域 ESV 分别增加 23.07 亿,0.19 亿,0.14 亿元,总体 ESV 净增量为 15.36 亿元,表明随着时间推移,生态措施的有效实施,将进一步增强生态系统的稳定性。

在 SDGs 情景下,未利用地被进一步开发利用,不仅生态系统服务功能结构维持稳定,而且经济效

益也十分突出,以更少的 ESV 损耗实现更大规模的经济增长。较 BAU 情景,总体 ESV 分别增加 10.16 亿,10.79 亿元,各项服务功能维持稳定,调节和支持服务仍占主导地位。此外,尽管 2025 年,2030 年林地面积减少 15.28,16.63 km²,但整体经济效益增加 105.48 亿,48.18 亿元,表明通过土地利用合理规划,能够在森林资源减少的情况下提高土地利用效率,实现“保护中开发,发展中保护”目标。

3.2.3 不同情景下的生态系统服务价值空间变化 较 BAU 情景,各情景 ESV 总体呈现相似的分布格局,价值等级以 I, II 级分布区为主,以 III, IV, V 级分布区为辅。各情景 ESV 发生变化的区域主要在黑色矩形内部的 I 级分布区(如图 3)。其中,SDGs 情景未来 ESV 空间分布与 BAU 情景最为相似,表明徐州市在过去 21 a 中采取了兼顾生态、经济的可持续发展政策。在 SDGs 情景下,2030 年徐州市的建成区面积为 3 135.83 km²,此时建成区面积应为兼顾生态保护和经济发展的最大土地资源承载力。与 BAU 和 SDGs 情景相比,ELP 和 EP 情景下增加的 I 级分布区主要分布在丰县中部、沛县南部和新沂市中部,表明徐州市主城区建设用地趋于饱和,建设重心转移到丰县、沛县等地。

表 7 2025 和 2030 年不同情景下土地利用类型的面积、ESV 和经济效益

情景	指标	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	总计
BAU(2025 年)	面积/km ²	726 166.44	41 968.26	2 975.67	48 930.21	593.01	282 581.73	1 103 215.32
	ESV/亿元	364.64	74.31	2.19	134.24	0.05	0	575.43
	经济效益/亿元	135.79	5.67	8.54	16.05	0	1 905.73	2 071.78
EP(2025 年)	面积/km ²	711 898.83	40 249.35	2 611.8	48 942.9	530.64	298 981.8	1 103 215.32
	ESV/亿元	357.47	71.26	1.92	134.28	0.04	0	564.97
	经济效益/亿元	133.13	5.43	7.49	16.05	0	2 016.33	2 178.43
ELP(2025 年)	面积/km ²	707 298.67	56 784.51	3 042.18	28 979.53	531.54	296 578.89	1 103 215.32
	ESV/亿元	350.14	100.54	2.24	134.38	0.04	0	587.34
	经济效益/亿元	132.09	7.67	8.73	16.07	0	1 932.69	2 097.25
SDGs(2025 年)	面积/km ²	711 898.83	40 440.69	2 612.79	48 930.21	530.64	298 802.16	1 103 215.32
	ESV/亿元	357.47	71.6	1.92	134.24	0.04	0	565.27
	经济效益/亿元	133.13	5.46	7.5	16.05	0	2 015.12	2 177.26
BAU(2030 年)	面积/km ²	713 246.22	41 735.97	2 894.31	48 930.21	579.51	295 829.1	1 103 215.32
	ESV/亿元	358.15	73.89	2.13	134.24	0.05	0	568.46
	经济效益/亿元	133.38	5.63	8.3	16.05	0	1 995.07	2 158.43
EP(2030 年)	面积/km ²	706 324.05	37 209.37	2 840.92	46 955.95	531.36	311 153.67	1 103 215.32
	ESV/亿元	354.67	65.88	2.09	128.83	0.04	0	551.51
	经济效益/亿元	132.08	5.02	8.15	15.4	0	2 098.42	2 259.07
ELP(2030 年)	面积/km ²	717 298.67	54 761.24	3 152.18	291 153.67	221.54	298 802.16	1 103 215.32
	ESV/亿元	350.14	96.96	2.32	134.38	0.02	0	583.82
	经济效益/亿元	129.11	7.39	9.04	16.07	0	1 963.54	2 125.15
SDGs(2030 年)	面积/km ²	707 298.67	40 305.42	2 567.88	48 930.21	530.64	303 582.5	1 103 215.32
	ESV/亿元	350.14	71.36	1.89	134.24	0.04	0	557.67
	经济效益/亿元	130.39	5.44	7.37	16.05	0	2 047.36	2 206.61

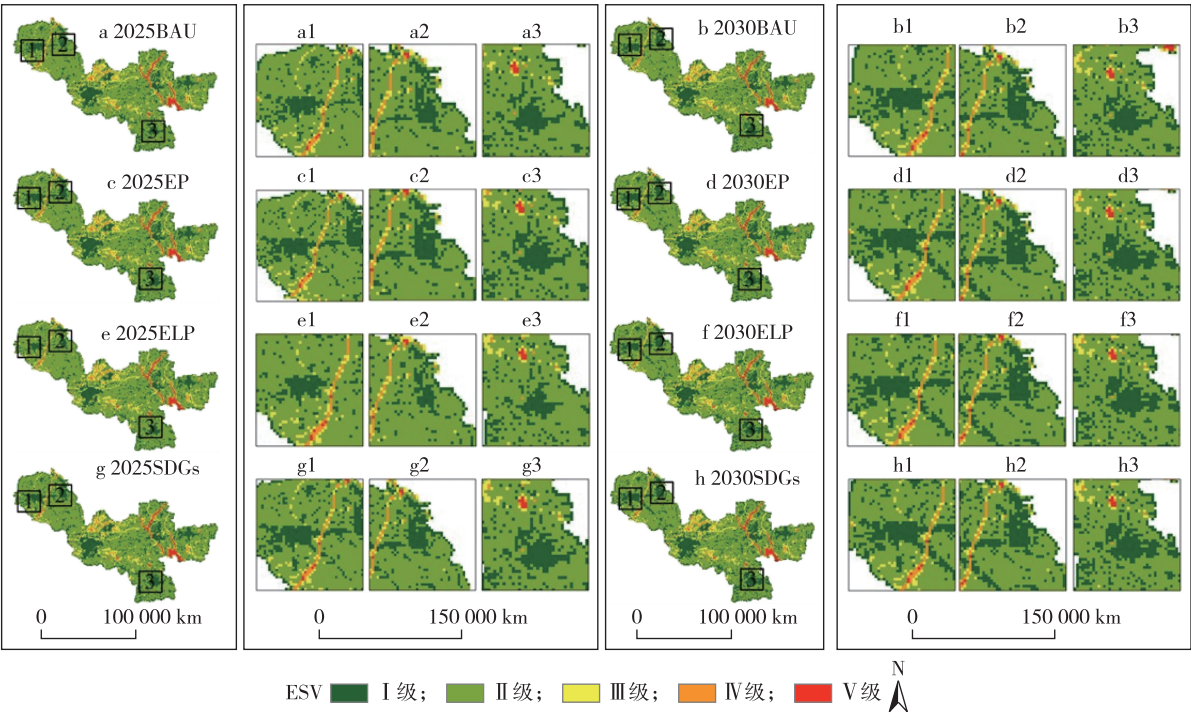


图 3 总体 ESV 空间分布(BAU, ELP, EP, SDGs)

4 讨论

4.1 与前人研究的比较

本文耦合 MOP-PLUS 模型分析了不同开发情景下徐州市的 ESV 时空演变趋势。与前人研究相比,主要有以下 2 个优势:从研究对象来看,以往很少以煤炭资源再生型城市为研究对象,将多情景规划和 ESV 评估结合,全面分析城市各阶段 ESV 的变化趋势;从研究方法来看,以往研究大多集中关注土地利用结构定量优化和土地利用模式空间优化中的某一方面,无法满足不同开发情景对各土地类型的需求,本研究耦合 MOP-PLUS 模型评估 ESV 的方法不仅兼顾了土地利用数量控制和空间布局优化,还考虑到各项服务的空间异质性,可以为资源枯竭型城市寻求最优发展模式提供数据支撑。

4.2 生态修复与保护格局的初步构建

ESV 是反映区域生态保护态势及生态价值的重要指标^[2]。将 ESV 与地方生态基地联系起来,有助于综合治理区域生态环境和提出针对性生态保护措施。因此,本文根据评估结果,提取Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ级分布区及徐州市生态保护基地初步构建徐州市 2025 年,2030 年生态修复与保护格局(如图 4),即“两河、两湖、两横三纵、多节点”,实现环境保护与区域协调发展的目标。

两河是指黄河故道和京杭大运河。两条河流以线状水系和湿地公园与主城区融为一体,提供多样化的生态系统服务,与居民生产生活具有很强的互动关系,是资源枯竭型城市向宜居城市转型的重点。

两湖是指微山湖和骆马湖。显著影响城市水文调节和废物处理功能,起到生态筑底作用,保障区域生态安全。

两横三纵是指 ESV 等级为Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ级的区域。这部分区域具备较好的生态本底,可以作为改善徐州市环境的地区生态基地。

多节点为生态修复保护型区域,分为生态保护区和生态修复区。其中生态保护区指天然林地保护区及水库,生态修复区包括资源开采修复区及农田生态改善区。

5 结论与展望

(1) 2000—2020 年间,徐州市总体 ESV 呈现不同幅度的持续下降趋势,其中 2005—2010 年下降幅

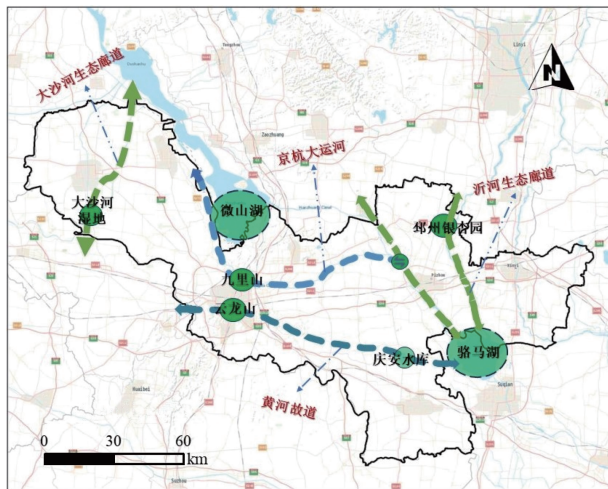


图4 徐州市生态安全格局

度最大,耕地和林地是徐州市总体 ESV 变化的主要驱动力。同时,9 项服务单项 ESV 下降趋势逐渐减缓,呈现良好的生态保护态势。

(2) 2000—2020 年间,徐州市总体 ESV 低值区与高值区在空间上呈交织带分布,价值等级以Ⅰ,Ⅱ级分布区为主,以Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ级分布区为辅。同时 9 项服务冷热点分布具有高度重叠性,主要重叠区域在建成区及生态系统相对完整的山地丘陵和水域,是未来土地利用规划的重点地区。

(3) 模拟结果表明,BAU 情景下的未来 ESV 空间分布与 SDGs 情景最为相似,可见徐州市在过去 21 a 中采取了兼顾生态、经济的可持续发展政策。然而,主城区建设用地面积接近饱和,若要避免 ESV 在未来城市发展过程中大幅度下降,建设用地应限制在 3 135.83 km²以内。

(4) 从加强生态用地保护、限制建设用地过度扩张、协调城市发展、促进区域可持续发展 4 个方面,构建“两河、两湖、两横三纵、多节点”的生态修复与保护格局。

基于土地利用数据,模拟得到 2025 年,2030 年徐州 4 种情景下 ESV 的时空演变规律,但在以下方面仍存在一定局限性:(1) 在土地利用驱动因素的选取上,主要考虑了数据可用性与可获取性,没有充分考虑气候变化、社会经济指标和其他因素的影响。在后续研究若补充相关数据,可以得到更为精确的结果。(2) 在生态系统服务价值评估方面,忽略了城市绿化和生态公园提供的环境价值,未评估建设用地产生的环境价值。在后续的评估研究中,

可以基于高精度的城市土地利用数据得到更为精确的评估结果。

参考文献:

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] CHEN Z, ZHANG X. Value of ecosystem services in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(10): 870-876.
- [3] SHAO Y, YUAN X, MA C, et al. Quantifying the spatial association between land use change and ecosystem services value: A case study in Xi'an, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4449.
- [4] XI Y, THINH X N, LI C. Spatio-temporal variation analysis of landscape pattern response to land use change from 1985 to 2015 in Xuzhou City, China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): 4287.
- [5] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189 - 196.
- [6] AKHTAR M, ZHAO Y, GAO G, et al. Assessment of spatiotemporal variations of ecosystem service values and hotspots in a dryland: A case-study in Pakistan[J]. *Land Degradation and Development*, 2022(9): 33.
- [7] PARKER D C, MANSON S M, JANSEN M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 314-337.
- [8] 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.
- [9] WANG C X, HUANG S Y, WANG J J. Spatio-temporal dynamic evolution and simulation of dike-pond landscape and ecosystem service value based on MCE-CA-Markov: A case study of Shunde, Foshan[J]. *Forests*, 2022, 13(8): 1241.
- [10] 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.
- [11] 刘 园, 任 意, 周 勇, 等. 基于 CA-Markov 的江汉平原生态系统服务价值动态模拟——以湖北省潜江市为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(4): 159-167.
- [12] 王友生, 余新晓, 贺康宁, 等. 基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 330-336, 442.
- [13] 张永民, 赵士洞, VERBURG P H. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(3): 310-318.
- [14] WU C, CHEN B, HUANG X, et al. Effect of land-use change and optimization on the ecosystem service values of Jiangsu Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117(15): 106507.
- [15] 张沐锋, 刘万侠, 王健恩, 等. 基于 CLUE-S 模型的石马河流域东莞段生态系统服务价值变化情景模拟[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 152-160.
- [16] 苏建聪, 唐 斌, 刘 杨, 等. 基于 FLUS 模型的巴中市多情景土地利用变化模拟及其生态系统服务价值评估[J]. *环境生态学*, 2023, 5(11): 17-25.
- [17] 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.
- [18] LIU Y B, HOU X Y, LI X W, et al. Assessing and predicting changes in ecosystem service values based on land use/cover change in the Bohai Rim coastal zone[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106004.
- [19] HAN J, HU Z, WANG P, et al. Spatio-temporal evolution and optimization analysis of ecosystem service value—A case study of coal resource-based city group in Shandong, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132602.
- [20] 刘云刚. 中国资源型城市界定方法的再考察[J]. *经济地理*, 2006(6): 940-944.
- [21] QIAN X Y, WANG D, WANG J, et al. Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China[J]. *Resources Policy*, 2019, 74: 101447.