

基于多源数据的黄河三角洲乡村聚落演化对区域碳储量的影响

刘建涛¹, 郭佳敏¹, 孟飞¹, 尹高飞², 冯权泷³

1. 山东建筑大学 测绘地理信息学院, 济南 250101;

2. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756;

3. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193

摘要: 改革开放以来, 随着中国工业化与城市化进程的持续推进, 农村地区普遍出现以“人减地增”为特征的乡村聚落无序扩张与空心化现象, 这给当地土地资源的合理利用、生态环境安全、粮食安全等带来了挑战。然而现有的研究多聚焦于乡村聚落的空间格局演化及其驱动机制, 对乡村聚落有序退出情景下所引发的碳储量变化仍缺乏深入探讨。黄河三角洲作为中国生态经济与农业发展的战略核心区, 在环境保护政策、人口变化以及城市演化等多重因素的共同作用下, 其乡村聚落格局发生了显著变化。鉴于此, 本文以黄河三角洲核心区——山东省东营市为研究区, 基于多源遥感数据及驱动因子数据, 利用InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) 模型分析了1987年—2023年乡村聚落变化对区域碳储量的影响, 而后又耦合PLUS (Patch-generating Land Use Simulation) 模型模拟并评估了2040年乡村聚落有序退出情景下区域碳储量的变化特征。研究表明: (1) 1987年—2023年, 尽管东营市农村人口不断减少, 但乡村聚落面积总体呈现出增加趋势, 累计侵占其他地类面积达223.233 km², 其中以侵占耕地为主导; (2) 1987年—2023年, 乡村聚落的扩张导致区域碳储量减少0.555×10⁶ t, 其中侵占耕地所引起的碳储量损失最多, 为0.257×10⁶ t, 占碳储量总损失的46.31%; (3) 模拟结果表明, 未来情景下乡村聚落有序退出的面积可达106.275 m², 可为东营市带来约0.250×10⁶ t的碳储量增加, 其中以耕地面积增加为主导的碳储量增量为0.163×10⁶ t, 约占乡村聚落有序退出情景下碳储量增量的65.20%。总体而言, 乡村聚落的有序退出有助于推动闲置土地向生态用地或耕地转化, 从而增强区域碳汇能力, 该过程可为黄河三角洲生态环境的保护和粮食安全提供科学支撑。

关键词: 碳储量, 乡村聚落演化, 黄河三角洲, InVEST模型, PLUS模型

中图分类号: P2

引用格式: 刘建涛, 郭佳敏, 孟飞, 尹高飞, 冯权泷. 2026. 基于多源数据的黄河三角洲乡村聚落演化对区域碳储量的影响. 遥感学报, 30(6): 1696–1712

Liu J T, Guo J M, Meng F, Yin G F and Feng Q L. 2026. Impacts of rural settlement evolution on regional carbon storage in the Yellow River Delta based on multisource data. National Remote Sensing Bulletin, 30(6): 1696–1712 [DOI: 10.11834/jrs.20265543]

1 引言

改革开放以来, 随着中国工业化与城市化进程的持续推进, 大量农村劳动力涌入城市, 形成了规模庞大的“民工潮”(王凤山, 1994)。但受城乡二元户籍制度、经济条件、乡土情结等因素的影响, 多数外出人口仍保留农村户籍及其它基

地使用权(于伟等, 2016; 黄江泉和李晓敏, 2014), 致使乡村地区普遍出现“人走房空”的空心化现象, 具体表现为农村常住人口数量持续下降而乡村聚落的面积不减反增, 形成典型的“人减地增”格局(刘彦随等, 2009)。在闲置乡村聚落缺乏合理有效退出机制的情形下, 乡村聚落的无序扩张只会持续侵蚀周边耕地、林地、草地等

收稿日期: 2025-12-31; 预印本: 2026-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42171113, 42571383)

第一作者简介: 刘建涛, 研究方向为城市遥感、生态遥感及多源数据融合等。E-mail: liujian tao18@sdjzu.edu.cn

通信作者简介: 冯权泷, 研究方向为机器、深度学习及在农业遥感中的应用。E-mail: fengql@cau.edu.cn

生态用地,破坏原有的生态格局,并对区域碳库的稳定性产生不利影响(黄子豪等,2025;何利杰等,2025;张雪莹等,2025)。因此,系统性评估乡村聚落有序退出情景下区域碳储量的变化具有重要的现实意义。

围绕乡村聚落问题,国内外学者已开展了大量的研究。乡村聚落不仅是劳动人民从事生产和生活的聚集场所,也是乡村综合体的重要组成部分(杨凯悦等,2020)。早在1841年,约翰·格奥尔格·科尔(Johann Georg Kohl)就指出交通条件与地形因素对乡村聚落形成与分布的影响,这为后续乡村聚落的研究奠定了基础(王丹和刘祖云,2019)。相比之下,国内关于乡村聚落的研究则起步较晚,目前主要集中在以下4个方面:(1)乡村聚落类型的划分,通过聚类分析等方法揭示不同自然环境和生产方式下乡村聚落的类型特征(刘杉等,2025;沟睿,2025);(2)不同尺度下乡村聚落时空格局及演变分析,揭示其扩张、收缩及重组并存的复杂过程(谭雪兰等,2025;秦羽等,2025);(3)基于地理模型定量分析自然条件、社会经济因素、政策及区位条件对乡村聚落演变的影响机制(刘苏文等,2025;楼雨晨等,2025;刘愿理等,2024);(4)特定区域乡村聚落空间优化与发展趋势研究(刘继斌等,2025;周吉喆等,2023)。总体而言,现有研究关注的主要是乡村聚落空间形态的变化及其调控策略,对乡村聚落演变所引发的生态效应关注相对不足,尚缺乏从生态系统服务视角开展的系统量化分析。

近代黄河三角洲区域作为中国最年轻的冲积平原之一,地貌演化速度快、生态系统脆弱,同时又是黄河下游重要的生态屏障,其乡村聚落演变受到黄河河道变迁、土地政策调整、地貌发育等多重因素的共同影响(Liu等,2024;Ye等,2025)。近年来,在城镇化推进与产业发展的共同作用下,部分区域乡村聚落呈扩张与空心化并存态势(Wang和Zhang,2021;Fu等,2024)。然而,现有研究多是聚焦于乡村聚落空间格局及社会经济驱动机制方面(高梦瑶和李翹,2023;Liu等,2025),对其生态效应,尤其是对区域碳储量的影响关注尚且不足。随着“双碳”目标

的提出,碳储量研究逐渐成为土地利用变化及生态系统服务评价的重要研究方向。当前研究多基于碳密度法或InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型(张贤等,2025;邵尔辉等,2024),对土地利用在转化过程中区域碳储量的变化进行定量评估,研究尺度已由国家(张贤等,2025)、省域(刘佳楠等,2025;郭龙等,2025)、市域(邵尔辉等,2024)扩展至流域(杨洁等,2021;杨智楷等,2025)、城市群(万海峰等,2024)、都市圈(邢笑天等,2025)层级,研究范围涵盖了黄河流域、长江经济带(何利杰等,2025)、典型生态脆弱区以及快速发展的城市区等,研究内容也由单一的碳储量估算(任玺锦等,2021)逐渐向情景模拟与多模型耦合分析延伸(张贤等,2025)。但多数碳储量的研究通常将乡村聚落并入城市建设用地中(刘继斌等,2025;张贤等,2025),忽视了乡村聚落独特的扩张、废弃或退出过程对区域碳储量的影响。这可能导致对乡村聚落演变所带来的区域碳储量的影响存在低估或者误判。

综上所述,尽管现有的研究在乡村聚落演变特征及驱动机制方面取得了丰富成果,但针对黄河三角洲典型生态脆弱区乡村聚落演变,特别是其在有序退出情景下对区域碳储量影响的定量研究,仍相对不足。基于此,本文以黄河三角洲核心区——山东省东营市为研究区,利用机器学习算法提取1987年—2023年的多期土地利用数据,然后再结合收集的多源驱动因子数据,通过InVEST模型定量评估乡村聚落演变对区域碳储量的影响,并耦合PLUS(Patch-generating Land Use Simulation)模型模拟2040年乡村聚落有序退出情景下对区域碳储量的影响,以期黄河三角洲未来国土空间规划优化以及区域“双碳”目标的实现提供科学依据。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

近代黄河三角洲以垦利区胜坨镇为顶点,北起套尔河口,南至支脉河口,总面积约为5400 km²,其中约93%的面积位于山东省东营市(Liu等,

2025)。东营市地处黄河入海口，是近代黄河三角洲的中心城市，具有独特的地理意义。因此，本文以东营市为研究区（图1），重点分析东营市乡村聚落演变对区域碳储量的影响。东营市（36°55'N—38°10'N，118°07'E—119°10'E）位于山东省北部，下辖有东营区、河口区、垦利区、利津县、广饶县，东北濒临渤海，西接滨州，南靠淄博市和潍坊市，总面积约为8243 km²。东营市属暖温带半湿润大陆性季风气候，年平均气温为12.8℃，年降水量为550—600 mm（路琦等，2023），其地势总体呈现西南高、东北低的态势（房子钰等，2025）。近年来，随着工业化与城市化进程的持续加速，东营市农村人口持续向城市转移，但乡村聚落的面积却呈现出扩张趋势，形成了典型的“人减地增”现象。在粮食安全与生态保护的双重约束下，系统评估乡村聚落演变对区域碳储量的影响，对优化国土空间格局与提升土地利用效率具有重要的现实意义。

2.2 数据来源

本文所使用的数据包括土地利用数据和驱动因子数据两大类。土地利用数据涵盖多个年份，具体包括1987年、1992年、1995年、1998年、2002年、2004年、2008年、2010年、2016年、2023年。其中，1987年—2016年的土地利用数据来源于刘建涛（2018）的博士论文，其原始遥感影像数据均来自美国地质调查局USGS（United States Geological Survey，<https://www.usgs.gov> [2025-12-31]），主要采用Landsat系列卫星（Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+和Landsat 8 OLI）数据。2023年的土地利用数据同样基于USGS平台获取的Landsat 9遥感影像，并采用随机森林算法进行分类（冯权

洸等，2022）。分类标准依据《土地利用现状分类标准》（GB/T 21010—2017），将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、城镇建设用、乡村聚落、未利用地共7类。其中，每类分别选取了500个样本用于训练，300个样本用于精度验证，随机森林模型参数设置为500颗决策树和3个随机特征（Niu等，2025；Chen等，2022）。分类效果如图2所示。驱动因子数据包括气温、降水量、潜在蒸散发、数字高程模型DEM（Digital Elevation Model）、坡度、坡向、土壤类型、国内生产总值GDP（Gross Domestic Product）、人口密度、夜光数据、距道路的距离、水系数据。所有的数据均通过预处理到统一的范围、坐标系、分辨率。驱动因子数据的具体信息如表1所示。

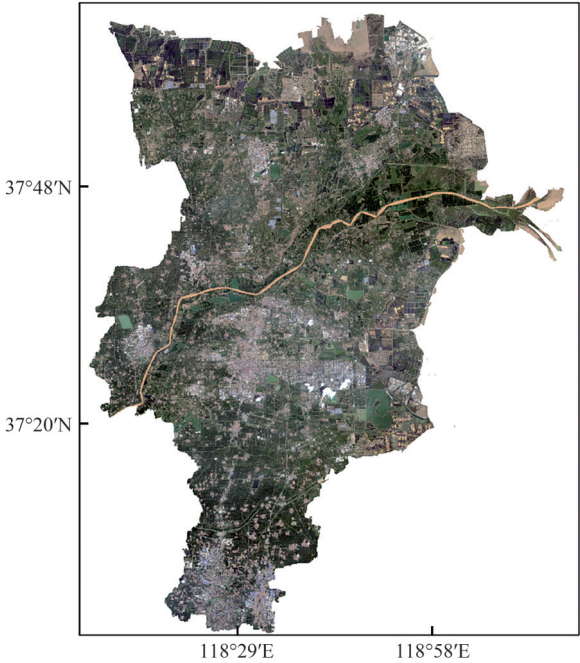
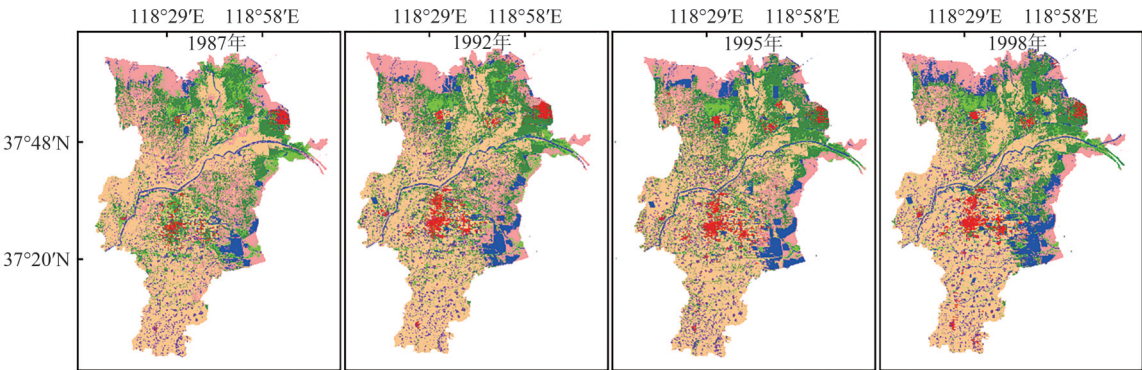


图1 研究区概况
Fig. 1 Overview of the study area



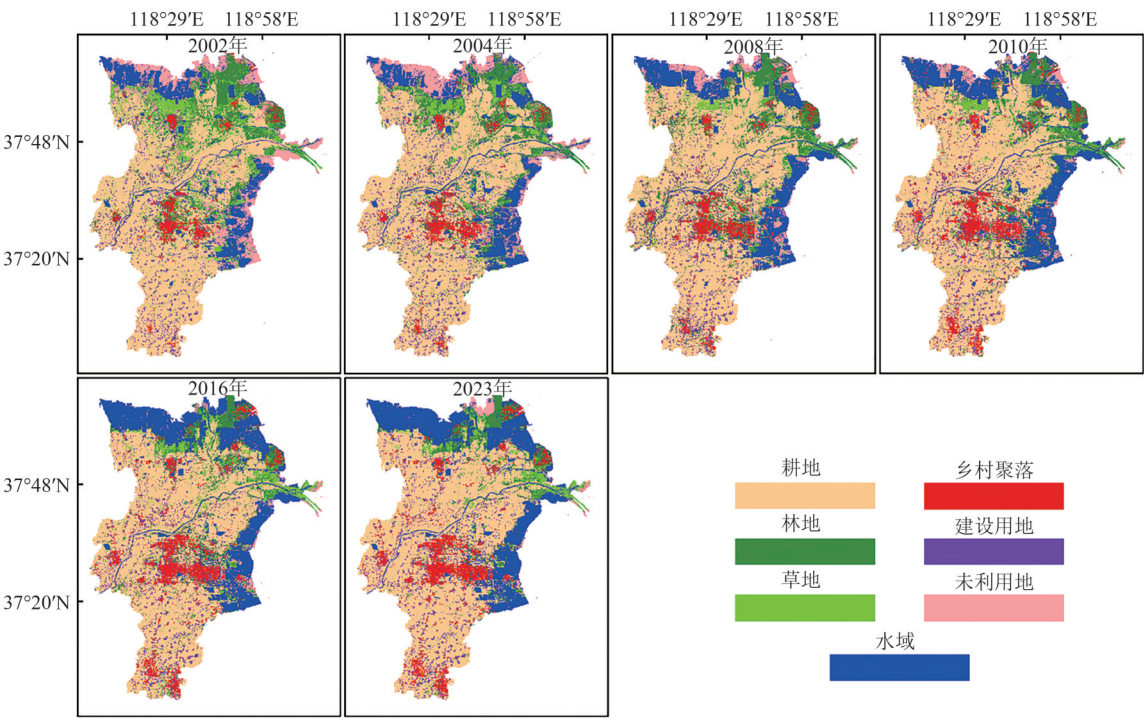


图2 东营市历年土地利用类型
Fig. 2 Land use types of Dongying City over the years

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据名称	分辨率	来源
年平均气温	1 km	https://data.tpdc.ac.cn/
年平均降水量	1 km	—
年潜在蒸散发	1 km	—
夜间灯光	1 km	—
DEM	30 m	https://www.gscloud.cn/
坡度	30 m	通过高程提取
坡向	30 m	—
土壤类型	1 km	https://www.fao.org/
GDP	1 km	https://www.resdc.cn/
人口密度	1 km	—
距一级道路的距离	1:100 万	https://www.web-map.cn
距二级道路的距离	1:100 万	—
距三级道路的距离	1:100 万	—
水系	1:100 万	—

3 研究方法

3.1 InVEST 模型碳储量模块

InVEST 模型由斯坦福大学自然资本项目开发 (Sharp 等, 2020), 是目前国际上广泛应用的生态系统服务评估模型之一, 已被大量研究用于评

估土地利用变化对生态系统服务功能的影响 (Kareiva 等, 2011; Nelson 等, 2009)。其碳存储与封存 (Carbon Storage and Sequestration) 模块通过对生态系统中的多个碳库进行综合计算来估算区域碳储量, 该模块将每种土地利用类型划分为地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度、死亡有机物碳密度 4 个基本碳库 (郭龙 等, 2025; 杨洁 等, 2021)。各类土地利用类型的碳密度由上述 4 类基本碳库求和得到, 如式 (1) 所示:

$$C_i = C_{i, above} + C_{i, below} + C_{i, soil} + C_{i, dead} \tag{1}$$

式中, C_i 为第 i 类土地利用类型所对应的碳密度, 单位为 kg/m^2 ; $C_{i, above}$ 、 $C_{i, below}$ 、 $C_{i, soil}$ 、 $C_{i, dead}$ 为第 i 类土地利用类型所对应的地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度、死亡有机物碳密度, 单位均为 kg/m^2 。

每种土地类型的碳密度乘以该土地利用类型的总面积 (km^2) 再求和即可获得区域总碳储量 (t)。如式 (2) 所示:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i A_i \tag{2}$$

式中, C_{total} 为研究区的总碳储量, A_i 为 i 类土地利用类型的总面积。本文中将土地利用类型分为了 7 类, 所以 $i=7$ 。

3.2 碳密度修正

在利用 InVEST 模型开展区域碳储量评估时，不同土地利用类型的碳密度参数是影响结果精度的关键因素。本文所采用的碳密度数据优先选取与东营市相关的区域研究成果，个别缺失值则参考国内其他可靠文献（范强 等，2025；黄玫 等，2006；Geng 等，2025）。需要指出的是，上述碳储量参数并非来源于东营市的实地监测数据。由于即便在同一省域内，不同地区在气候条件、土壤类型、植被结构、人类活动等方面仍可能存在差异，因此碳密度参数也会呈现相应的区域性偏差（杨洁 等，2021）。东营市作为黄河三角洲典型区域，植被生长受盐碱化程度及其土地管理方式影响明显，碳密度水平可能与山东省平均值存在偏差。因此，为提高碳储量评估结果的科学性和区域适用性，有必要对引用的碳密度参数进行修正。通过系统梳理相关研究，本文选取了通用性较强的气候因子修正方法对碳密度进行校正。其中，考虑到降水量对土壤碳含量和植被生物量具有显著影响，在修正土壤碳密度和生物量碳密度时采用了 Alam 等（2013）提出的降水修正模型，见式（3）和式（4）；同时，由于气温与植被生物量变化关系密切，在生物碳储量修正中参考了 Giardina 和 Ryan（2000）以及陈光水等（2007）提出的温度校正模型，见式（5）。需要指出的是，目前对土壤碳密度与气温之间关系表达的研究仍

较为有限，因此本文在土壤碳库进行修正时主要考虑降水因子的影响，未引入温度因子（杨洁 等，2021）。

$$C_{SP} = 3.3968 \times MAP + 3996.1 \tag{3}$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.0054 \times MAP} \tag{4}$$

$$C_{BT} = 28 \times MAT + 398 \tag{5}$$

$$K_s = \frac{C'_{SP}}{C''_{SP}} \tag{6}$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} = \frac{C'_{BP}}{C''_{BP}} \times \frac{C'_{BT}}{C''_{BT}} \tag{7}$$

式中， C_{SP} 、 C_{BP} 分别表示经降水量修正后的土壤碳密度与生物量碳密度（单位：t/hm²）； C_{BT} 表示经气温修正的生物量碳密度（单位：t/hm²）；MAP 表示年平均降水量（单位：mm），山东省与东营市年平均降水量分别为 694.19 mm、605.65 mm；MAT 表示年平均气温（单位：℃），山东省和东营市年平均气温分别为 13.67℃、13.68℃； K_{BP} 、 K_{BT} 分别表示对生物量碳密度进行修正的降水因子与气温因子； C'_{BP} 、 C''_{BP} 分别表示通过东营市与山东省年均降水量得到的生物碳密度， C'_{BT} 、 C''_{BT} 分别表示通过东营市与山东省年平均气温得到的生物碳密度； C'_{SP} 、 C''_{SP} 分别表示通过东营市与山东省年均降水量得到的土壤碳密度； K_B 、 K_s 分别表示东营市生物碳密度与土壤碳密度的修正系数。根据山东省年降水量与年均气温修正后的东营市不同土地利用类型的碳密度如表 2 所示。

表 2 年降水量和年平均气温修正后的东营市不同土地利用类型的碳密度

Table 2 Carbon density values for different land use types in Dongying City after adjusting for annual precipitation and annual average temperature

土地利用类型	地上生物碳密度/(t·hm ⁻²)	地下生物碳密度/(t·hm ⁻²)	土壤碳密度/(t·hm ⁻²)	死亡有机物碳密度/(t·hm ⁻²)
耕地	2.01	0.38	88.5	0.2
林地	17.41	4.62	121.27	1.74
草地	0.77	4.02	94.98	0.8
水域	0.42	0.08	77.26	0.4
城镇建设用地	0	0	69.54	0
乡村聚落	0	0	69.54	0
未利用地	0.42	0.08	71.07	0.4

3.3 PLUS 模型

PLUS 模型是由中国地质大学（武汉）高性能空间计算与智能实验室开发，是一种由土地扩张分析策略 LEAS（Land Expansion Analysis Strategy）与多类型随机种子 CARS（Cellular Automata based

on multiple Random Seeds）组成的土地利用模拟模型。该模型可以基于历史土地利用变化识别扩张驱动因素，并在元胞自动机 CA（Cellular Automata）框架下模拟不同情景下的土地利用演变过程（郭龙 等，2025；雒舒琪 等，2023）。

在本研究中，首先利用东营市2008年和2016年两期土地利用数据，结合14个驱动因子，在PLUS模型中计算各类土地利用类型的发展（转换）概率。然后以2016年土地利用格局为基准，通过CA模块模拟得到2023年土地利用格局，并与实际

2023年土地利用数据进行对比（图3），精度评估结果如表3所示。结果表明，PLUS模型在东营市土地利用变化的空间再现上具有较高的准确性和可靠性，可作为未来土地利用情景模拟的基础。

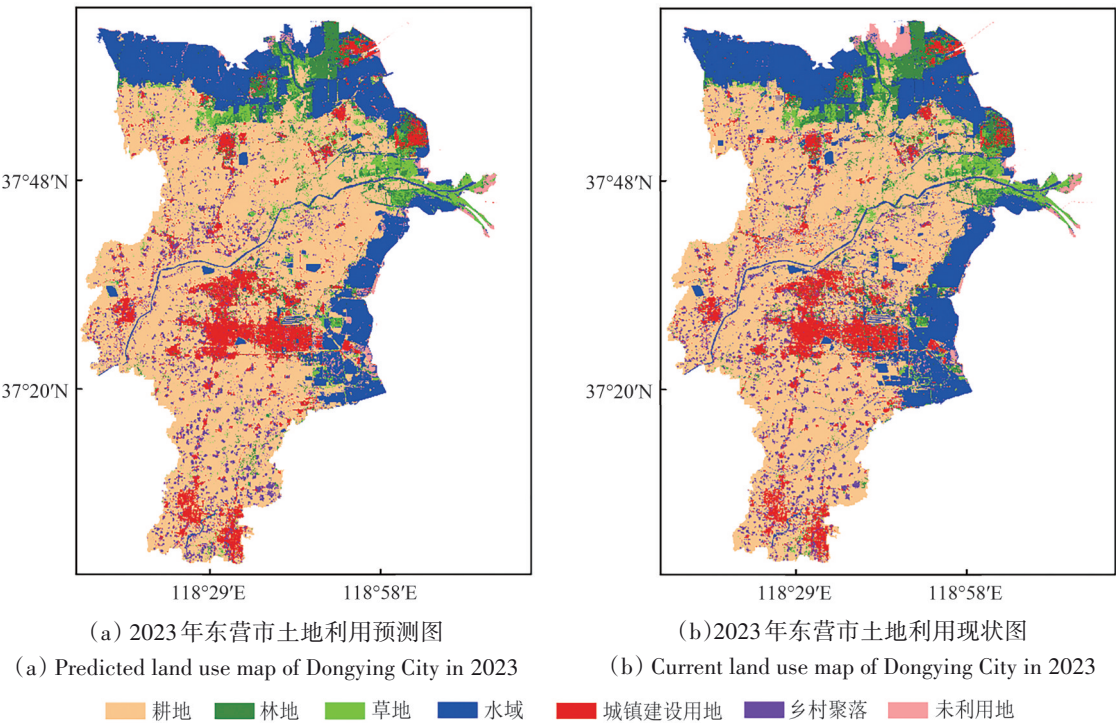


图3 2023年东营市土地利用预测图与现状图

Fig. 3 Predicted and current land use maps of Dongying City in 2023

表3 2023年东营市土地利用现状与预测效果精度评价

参数	土地利用类型						
	耕地	林地	草地	水域	城镇建设用地	乡村聚落	未利用地
实际值/km ²	3963.909	457.749	250.868	1463.907	626.948	357.932	124.281
预测值/km ²	4101.25	418.275	264.208	1293.751	689.857	349.827	128.426
相对误差/%	-3.46	8.62	-5.32	11.62	-10.03	2.26	-3.34
总体精度/%	88.90						
Kappa系数	0.827						

在此基础上，本研究构建了一个“乡村聚落有序退出”的情景。在自然发展情景下，各土地利用类型的转移权重遵循PLUS模型中基于历史演变趋势与邻域扩展特征的设定原则，尽量减少人为干预。其中，耕地、林地、草地、水域、城镇建设用地、乡村聚落及未利用地的转移权重分别设定为0.03、0.19、0.03、0.19、0.06、0.01和0.10。结合国家及山东省国土空间规划中“有序盘

活农村闲置建设用地”以及生态保护与耕地保护并重的政策导向，本文在上述权重的基础上，对乡村聚落退出后的土地利用转化进行了情景化调整。相较于自然发展情景，显著提升了乡村聚落向水域（由0.19提高至0.43）和耕地（由0.03提高至0.39）的转移权重，以体现湿地生态修复优先及耕地保护红线约束；相应降低了乡村聚落向林地和草地的转移权重（分别由0.19和0.03调整

为0.07和0.02),以避免在自然条件受限的黄河三角洲地区对林草扩张做出理想化假设;同时保留向城镇建设用地的转移概率(0.06),以反映部分区域仍存在的合理建设需求。通过多轮调试,最终确定将2040年乡村聚落在有序退出情景下耕地、

林地、草地、水域、城镇建设用地、乡村聚落及未利用地的转移权重分别设置为0.39、0.07、0.02、0.43、0.06、0.02和0.01。2040年土地利用预测效果图如图4所示。

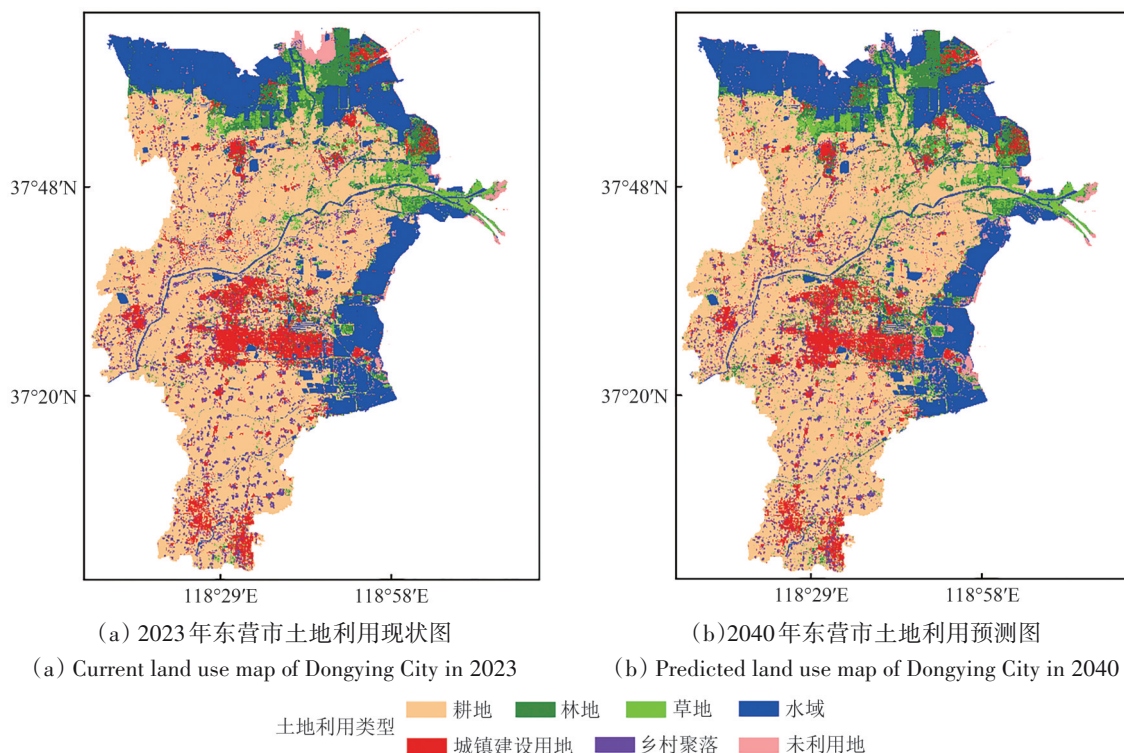


图4 2023年东营市土地利用现状和2040年东营市土地利用预测图

Fig. 4 Current land use map in 2023 and predicted land use map in 2040 of Dongying City

4 结果与分析

4.1 乡村聚落面积变化对碳储量的影响分析

4.1.1 乡村聚落面积变化的时空特征

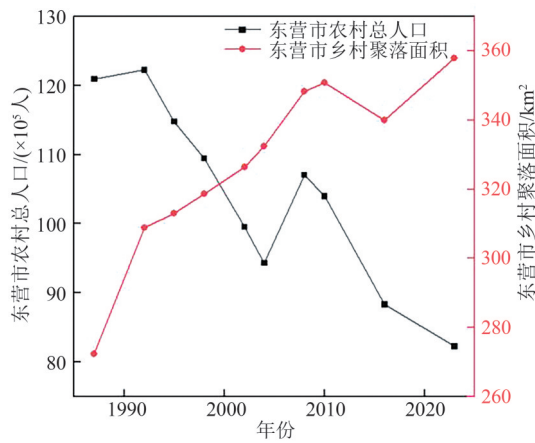
如图5所示,1987年—2023年东营市乡村聚落演变呈现出典型的“地增人减”特征。1987年—2023年东营市人口由120.93万人减少至82.3万人,降幅为31.94%。而乡村聚落的总用地面积从1987年的272.425 km²增加至2023年的357.935 km²,增幅高达31.39%。分县区来看,各县区农村人口均呈现出下降的趋势,其中东营区与广饶县降幅最为显著,分别为54.05%、31.19%;但两地乡村聚落的用地面积仍分别增加31.54%和8.09%。进一步分析发现,垦利区乡村聚落扩张与人口减少

的矛盾最为突出,其乡村聚落面积由1987年的36.743 km²增加至2023年的72.662 km²,增幅达到97.76%,而同时期的人口却由18.5万人减少到至14.46万人。上述结果表明,东营市农村地区普遍存在乡村聚落无序扩张与人口减少并存的现象,反映出人地关系协调不足与土地利用效率低下的问题。

为了进一步揭示乡村聚落在扩张的过程中对于其他土地利用类型的侵占特征,本文基于1987年—2023年土地利用转移矩阵对东营市乡村聚落侵占其他地类的面积及其比例进行了统计分析(图6)。结果表明,在研究期内,乡村聚落共侵占其他土地利用类型223.233 km²,其中以侵占耕地为主,侵占面积为119.040 km²,占总侵占面积的53.32%。其次侵占未利用地43.326 km²、侵占林地33.317 km²、

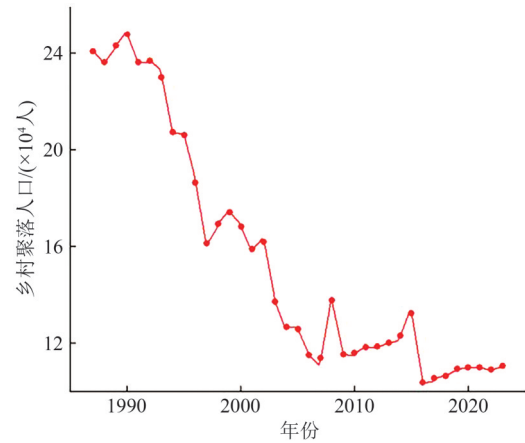
侵占草地 12.418 km²、侵占城镇建设用地 10.528 km²，分别占比为 19.41%、14.48%、5.56%、4.72%。水

域侵占的面积最少，仅为 5.604 km²，占总侵占面积的 2.51%。



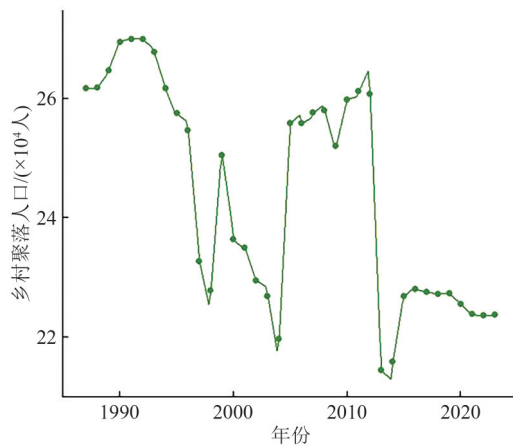
(a) 东营市乡村聚落面积及人口变化

(a) Changes in rural settlement area and population in Dongying City



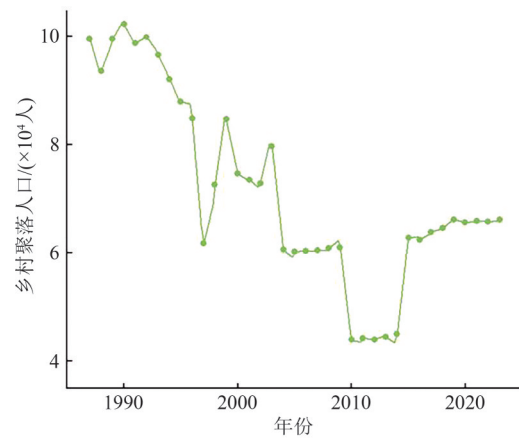
(b) 东营区人口变化

(b) Population change in Dongying District



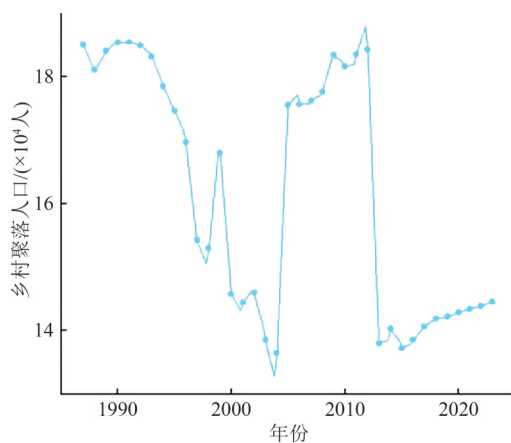
(c) 利津县人口变化

(c) Population change in Lijin County



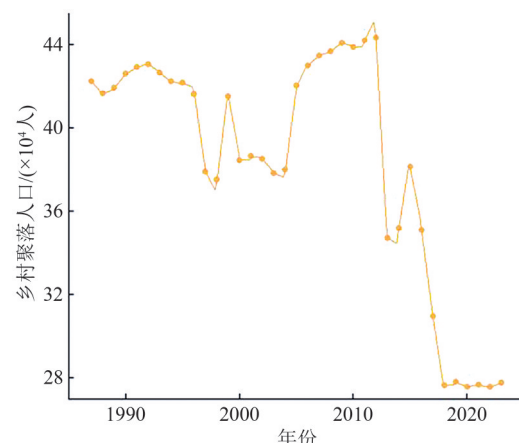
(d) 河口区人口变化

(d) Population change in Hekou District



(e) 垦利区人口变化

(e) Population change in Kenli District



(f) 广饶县人口变化

(f) Population change in Guangrao County

图5 1987年—2023年东营市乡村聚落面积及人口变化趋势

Fig. 5 Trends in rural settlement area and population in Dongying City, 1987—2023

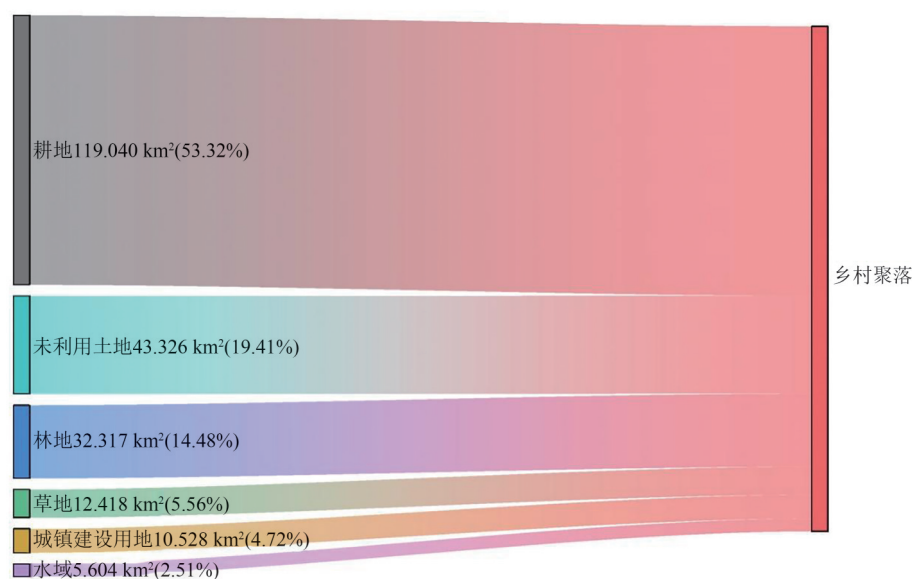


图6 1987年—2023年东营市乡村聚落侵占其他地类桑基图

Fig. 6 Mulberry-based diagram of rural settlements in Dongying City encroaching on other land types, 1987—2023

此外,结合各县区乡村聚落侵占其他土地利用类型空间分布特征(图7)与面积统计(表4)可知,乡村聚落扩张在不同县区之间具有显著差异。总体上,在垦利区乡村聚落侵占其他地类的面积最多,为54.377 km²,约占总侵占面积的24.36%。从具体的类来看,耕地侵占主要集中在利津县与广饶县,侵占面积分别为32.418 km²、38.955 km²;林地侵占主要集中在河口区与垦利区,侵占面积分别为10.254 km²、9.320 km²;草地侵占面积相对较少,主要发生在东营区、垦利区、利津县、河口区的东南部、广饶县的北部;水域侵占呈现出零星分布,主要发生在垦利区、广饶县、东营区,侵占面积分别为1.556 km²、1.205 km²、2.101 km²;城镇建设用地侵占主要集中在垦利区与东营区的城市聚集区,侵占面积为3.313 km²、4.670 km²;未利用地侵占则在垦利区表现的最为显著,侵占面积为15.023 km²。

总体而言,自1987年以来,东营市乡村地区普遍存在着明显的人地关系空间失衡与乡村聚落利用率低下的问题。乡村聚落用地的持续扩张,这一现象在垦利区表现的最为显著。从侵占的土地类型看,乡村聚落的扩张以侵占耕地为主导,侵占现象在利津县与广饶县表现最为显著;对林地、草地、水域、城镇建设用地的侵占在东营区

较为显著;而对未利用地的侵占在垦利区表现的尤为突出。若乡村聚落扩张缺乏有效的引导,放任其无序扩张,只会持续加剧区域生态压力,并对耕地保护产生不利影响。

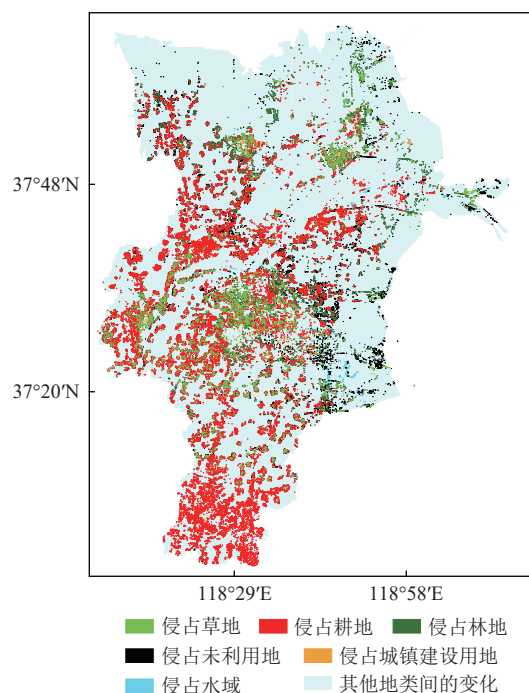


图7 1987年—2023年东营市乡村聚落侵占其他地类空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of rural settlements encroaching on other land types in Dongying City, 1987—2023

表4 1987年—2023年东营市乡村聚落侵占其他地类面积统计

Table 4 Statistics on the area of other land types encroached upon by rural settlements in Dongying City, 1987—2023

地名	侵占耕地 面积/km ²	侵占林地 面积/km ²	侵占草地 面积/km ²	侵占水域 面积/km ²	侵占城镇建设 用地面积/km ²	侵占未利用地 面积/km ²	侵占地类 总面积/km ²
垦利区	21.977	9.320	3.188	1.556	3.313	15.023	54.377
广饶县	38.955	2.014	1.234	1.205	0.167	6.130	49.705
利津县	32.418	3.501	2.184	0.439	0.538	9.068	48.148
东营区	17.697	7.228	3.279	2.101	4.670	5.277	40.252
河口区	7.993	10.254	2.533	0.303	1.840	7.828	30.751

4.1.2 乡村聚落面积变化对碳储量的影响

(1) 土地利用变化对于碳储量的影响。1987年—2023年，东营市乡村聚落的面积发生了显著变化，这会对区域碳储量格局产生重要影响。鉴于此，本文基于InVSET模型，结合东营市多期土地利用数据，系统性分析在乡村聚落扩张背景下区域碳储量的时空变化特征。

如图8所示，1987年东营市总碳储量为 69.067×10^6 t，至2023年下降至 64.445×10^6 t，37年间累计减少了 4.622×10^6 t。进一步从土地利用类型转化过程分析各地类对碳储量变化的影响，各地类变化所导致的碳储量变化为累积转化效应，用于刻画不同土地利用类型相互转换过程中对碳储量的影响强度。如表5所示，林地减少对区域碳储量的影响最为显著。当林地净面积减少880.132 km²时，导致区域碳储量损失达 5.276×10^6 t，凸显了林地在区域碳循环中的重要性。尽管耕地面积在研究期内增加了1036.199 km²，但其碳储量减少了 1.812×10^6 t。这主要是由于耕地碳密度远低于草地和林地，而耕地扩张往往以侵占林地与草地这些高碳密度的地类为代价，从而引发区域碳储量下降的现象（邵尔辉等，2024；Yang等，2023；曾庆雨和孙才志，2024）；同期水域面积增加了1124.759 km²，对于碳储量变化产生了负效应，碳储量减少了 1.823×10^6 t；城镇建设用地扩张了482.008 km²，导致碳储量减少 1.461×10^6 t，表示在城镇化过程中土地覆被变化与土壤质量、结构改变对区域碳储量会产生不利影响；此外，乡村聚落面积增加了88.507 km²，导致碳储量降低 0.330×10^6 t，表明乡村聚落的扩张整体上对区域碳储量有负向影响。

从空间格局看，1987年—2023年东营市碳储量空间变化较为显著，1987年碳储量高区主要分

布在河口区北部地区、垦利区东部地区、东营区中部地区。到了2023年碳储量高值区范围明显缩小，主要是集中在河口区的北部、利津县飞地的南部、垦利县的西部。结合土地利用类型变化可知，上述地区碳储量的减少与林地、草地面积大幅减少有关；而碳储量低值区域则多是分布于城镇建设用地与乡村聚落等植被覆盖较低的区域。

(2) 乡村聚落变化对于碳储量的影响。为了进一步揭示1987年—2023年乡村聚落侵占其他土地利用类型对区域碳储量的影响及其在空间上的分布特征。本文在土地利用变化对区域碳储量影响的基础上，重点分析了因乡村聚落演变引起的区域碳储量的时空变化过程。如表6所示，研究期内，东营市乡村聚落变化共导致区域碳储量损失 0.555×10^6 t。结合图7可知，乡村聚落扩张主要通过侵占耕地与林地导致区域碳储量的下降。其中侵占耕地造成的碳储量损失占比最高，达46.31%，主要分布于东营市中南部地区；侵占林地导致碳储量损失 0.244×10^6 t，占比为43.96%，集中分布于垦利区、东营区及河口区南部。此外，乡村聚落侵占草地、水域和未利用地所造成的碳储量损失相对较小，分别占7.03%、0.72%和1.98%。其中，侵占的草地主要分布于东营区和垦利区；侵占水域的影响较为零散；侵占的未利用地则主要集中于广饶县。

总体而言，乡村聚落侵占其他高碳密度地类，是导致东营市碳储量下降的重要因素。

4.2 未来乡村聚落有序退出后对碳储量的影响

本研究在PLUS模型中设置耕地—生态保护情景，模拟了乡村聚落有序退出情景下2040年东营市的土地利用格局，并耦合InVEST模型分析了该情景下的区域碳储量特征。

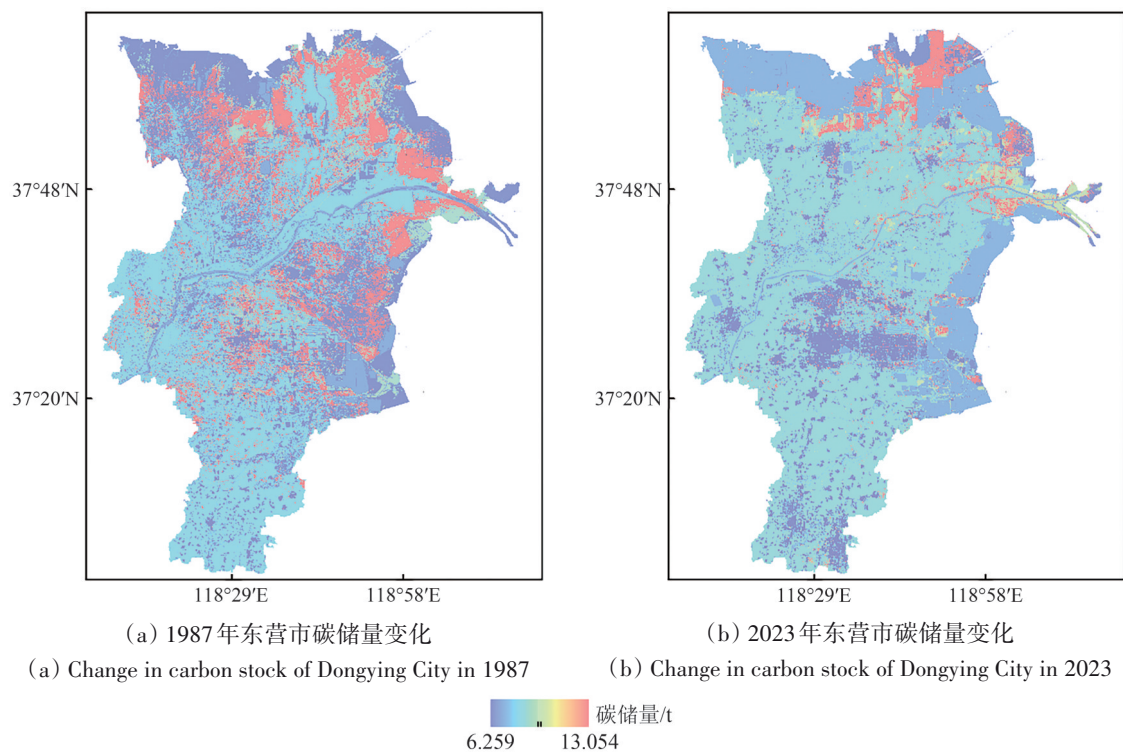


图8 1987年—2023年东营市碳储量变化

Fig. 8 Changes in carbon stock of Dongying City, 1987—2023

表5 1987年—2023年东营市土地利用变化所带来碳储量的变化

Table 5 Changes in carbon stock due to land use changes of Dongying City, 1987—2023

土地利用类型	面积减少量/km ²	面积增加量/km ²	净面积变化量/km ²	总碳储量变化/(10 ⁶ t)
耕地	594.588	1630.787	1036.199	-1.812
林地	1157.238	277.106	-880.132	-5.276
草地	477.779	225.829	-251.950	-0.732
水域	119.642	1244.401	1124.759	-1.823
城镇建设用地	59.082	541.090	482.008	-1.461
乡村聚落	134.763	223.270	88.507	-0.330
未利用地	1656.300	59.908	-1596.392	2.210

表6 1987年—2023年东营市乡村聚落扩张所带来的碳储量变化

Table 6 Changes in carbon stock due to rural settlement expansion in Dongying City, 1987—2023

侵占地类	侵占面积/km ²	侵占导致的碳储量的变化/(10 ⁶ t)	占侵占造成总碳储量变化比例/%
耕地	119.040	-0.257	46.31
林地	32.317	-0.244	43.96
草地	12.418	-0.039	7.03
水域	5.604	-0.004	0.72
城镇建设用地	10.528	0	0
未利用地	43.326	-0.011	1.98

如表7所示,乡村聚落有序退出情景下,东营市碳储量总体增加了0.250×10⁶ t。其中,乡村聚落向耕地转移是区域碳储量增加的主要因素,耕地

面积增加75.386 km²,对应碳储量增加了0.163×10⁶ t,占总碳储量增加量的65.20%;其次为向林地转移,面积增加9.802 km²,碳储量增加0.074×

10⁶ t，占总碳储量增加量的 29.60%。相比之下，乡村聚落向草地、水域、未利用地转移面积及其引起的碳储量变化较少，分别增加 0.008×10⁶ t、0.003×10⁶ t、0.002×10⁶ t，占总碳储量增加量的比

例均不足 5%。总体来看，生态—耕地保护情景下，通过引导乡村聚落向高碳密度地类转化，可有效提升区域碳储量水平。

表 7 2040 年乡村聚落有序退出后对于碳储量的影响
Table 7 Impact of orderly withdrawal of rural settlements on carbon stock in 2040

恢复地类	恢复面积/km ²	恢复导致的碳储量的变化/(10 ⁶ t)	占总碳储量增加量的比例/%
耕地	75.386	0.163	65.20
林地	9.802	0.074	29.60
草地	2.574	0.008	3.20
水域	3.295	0.003	1.20
未利用地	6.541	0.002	0.80

东营市乡村聚落有序退出后不同县区碳储量变化存在显著差异（表 8、图 9）。总体上看，碳储量增加主要集中在垦利区，增量为 0.787×10⁵ t，且退出后土地利用类型以恢复耕地为主导，其次是林地。东营区、广饶县、河口区、利津县在乡村

聚落有效退出后均以恢复耕地为主导，碳储量分别增加 0.331×10⁵ t、0.400×10⁵ t、0.384×10⁵ t、0.598×10⁵ t；同时这 4 个地区恢复成林地的面积要大于恢复成草地的面积。

表 8 2040 年东营市各县区乡村聚落有序退出后带来的碳储量变化
Table 8 Changes in carbon stock following the orderly withdrawal of rural settlements in each county and district of Dongying City in 2040

地名	不同土地利用类型恢复面积/km ²						碳储量总变化/(10 ⁵ t)
	耕地	林地	草地	水域	城镇建设用地	未利用地	
东营区	9.034	1.484	0.181	1.041	2.557	2.612	0.331
广饶县	15.007	0.725	0.327	0.829	2.292	1.007	0.400
河口区	8.199	2.351	0.518	0.773	1.287	0.329	0.384
垦利区	18.421	4.487	1.427	0.606	1.370	2.037	0.787
利津县	24.725	0.755	0.121	0.046	1.171	0.556	0.598

总体而言，东营市乡村聚落有效退出使得区域碳储量增加 0.250×10⁶ t，其中以恢复耕地为主导，占比约 65.20%，该效应主要集中在垦利区。

5 讨 论

本研究基于 InVEST 模型，对 1987 年—2023 年东营市乡村聚落变化所引起的区域碳储量的变化进行了定量分析。结果表明，乡村聚落扩张过程中通常伴随周边生态用地被侵占，其中以侵占耕地为主导，这一过程导致了区域碳储量的下降。这一研究发现证明了乡村聚落的无序扩张不仅会改变土地利用格局，更会对区域生态环境服务功能产生显著的负面影响。对东营市土地利用变化对碳储量影响的分析表明，尽管耕地净面积总体上呈现增加趋势，但区域总碳储量却表现为下降

趋势。这种现象主要源于耕地扩张过程中侵占了大量的林地和草地，其中林地减少尤为明显。已有研究表明：（1）林地与草地的单位面积碳储能力显著高于耕地（邵尔辉 等，2024；Yang 等，2023；曾庆雨和孙才志，2024）。林木与草本植被通过光合作用吸收大量的二氧化碳并将其固定在生物量中（Pan 等，2011），而耕地上以种植农作物为主，尤其东营市作为重要的粮食生产地，主要种植玉米、大豆、花生等季节性农作物，这些农作物生物量相对较低、生长周期短，且收获后生物量会被移出生态系统，从而导致碳储量减少（邱建军 等，2004）。（2）林地和草地中的土壤通常富含丰富的有机质，这些有机质是碳储存的重要组成部分（周恒 等，2015）。而频繁的耕地活动会破坏土壤结构，增加土壤的呼吸作用，导

致土壤有机碳被分解并释放 (Szostek 等, 2022; Haddaway 等, 2017)。(3) 林地与草地在生态系统中具有多种功能, 这些功能有助于维护生态系统的稳定性和促进碳循环, 而耕地参与的生态系统功能较为单一, 主要集中与粮食的生产 (刘童 等, 2024)。上述原因共同导致了耕地面积增加但是碳储量减少的现象。

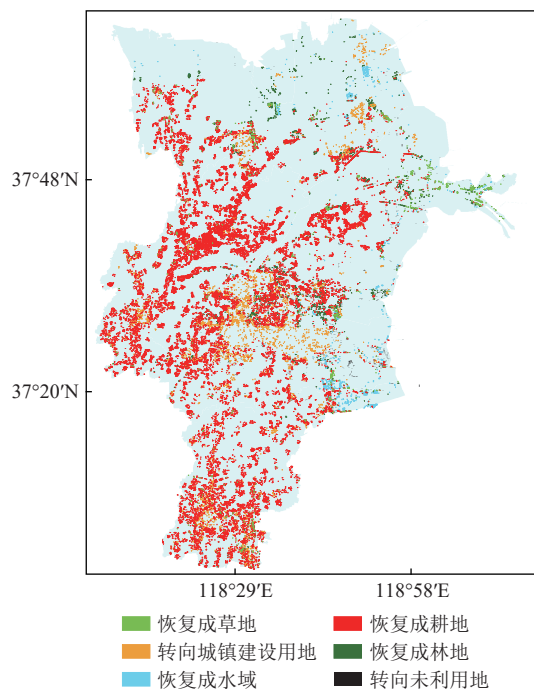


图9 2040年乡村聚落有序退出后恢复成其他地类的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of other land types restored after orderly withdrawal of rural settlements in 2040

在基于 InVEST 模型分析 1987 年—2023 年乡村聚落变化对东营市碳储量影响的基础上, 本文进一步耦合 PLUS 模型, 模拟了 2040 年乡村聚落有序退出情景下土地利用变化所带来的碳储量变化。结果表明, 乡村聚落有序退出后以复垦耕地为主导。这符合东营市一直以来贯彻落实的“土地增减挂钩”政策与《东营市落实国土资源节约集约示范省创建工作实施方案》(2018)中提出的农村土地整治与结构优化方向。相关政策的实施有助于提高闲置土地的利用效率, 确保东营市的生态安全与粮食安全。基于模型预测的结果, 本文对乡村聚落退出机制的优化提出以下建议: (1) 继续强化推行“土地增减挂钩”政策, 对于自愿将闲置用地复垦为耕地或者其他生态用地的农户应

当给予相应的财政补贴, 以强化政策激励; (2) 完善农业户口向城市户口转移的机制, 要保障这些转移户口的民众在教育、医疗、社保等公共服务方面与原本的城市居民享有同等权利, 以此来提高户籍转移意愿; (3) 积极推行乡村公寓式住宅, 进一步优化土地利用结构; (4) 对于退出后的土地应当开展长期、动态的监测, 以确保其按规划恢复为生态用地类型。

本文在碳储量的预测上还存有一定的局限性。尽管碳库参数已通过修正系数进行调整, 但区域气候、植被类型及土壤条件等未来变化的不确定性可能导致估算结果与实际情况存在明显的偏差。此外, 本文采用的 30 m 分辨率的土地利用原始数据对于特定地区草地与林地类型的识别与实际情况相比仍可能存在较大的差异, 可能影响分类精度。因此, 未来研究将会引入更高空间分辨率的数据源, 并进一步优化区域碳库数值, 以提高碳储量评估的科学性和可靠性。

6 结 论

本研究通过耦合 InVEST 模型与 PLUS 模型, 在分析 1987 年—2023 年东营市乡村聚落变化所引起的区域碳储量变化的基础上, 进一步预测了 2040 年乡村聚落有序退出情景下区域碳储量的变化, 主要结论如下。

(1) 1987 年—2023 年东营市农村人口减少, 但乡村聚落的面积却在不断扩大, 侵占其他土地利用面积 223.233 km², 其中以侵占耕地面积为主, 侵占面积 119.040 km², 约占总侵占面积的 53.32%。

(2) 1987 年—2023 年乡村聚落扩展导致区域碳储量损失 0.555×10⁶ t。其中以侵占耕地为主导, 导致碳储量损失了 0.257×10⁶ t, 占总碳储量损失的 46.31%; 侵占林地导致碳储量损失 0.244×10⁶ t, 占总碳储量损失的 43.96%。

(3) 情景模拟结果表明, 2040 年东营市乡村聚落有序退出可为东营市带来 0.250×10⁶ t 碳储量的增加, 其中乡村聚落退出后以复垦耕地为主导, 面积增加量为 75.386 km², 碳储量增加 0.163×10⁶ t, 约占碳储量变化的 65.20%; 其次为林地, 面积增加量为 9.802 km², 碳储量增加 0.074×10⁶ t, 面积增加主要集中在河口区与垦利区。

参考文献(References)

- Alam S A, Starr M and Clark B J F. 2013. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study. *Journal of Arid Environments*, 89: 67-76 [DOI: 10.1016/j.jaridenv.2012.10.002]
- Chen B A, Feng Q L, Niu B W, Yan F Q, Gao B B, Yang J Y, Gong J H and Liu J T. 2022. Multi-modal fusion of satellite and street-view images for urban village classification based on a dual-branch deep neural network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 109: 102794 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102794]
- Chen G S, Yang Y S, Liu L Z, Li X B, Zhao Y C and Yuan Y D. 2007. Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2(1): 34-42 (陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 李熙波, 赵月彩, 袁一丁. 2007. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展. 亚热带资源与环境学报, 2(1): 34-42) [DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2007.01.005]
- Fan Q, Sun H H, Sun S and Zhang J N. 2025. Estimation and evolutionary analysis of carbon stocks in Shandong Province under the ecological-cultivated land protection scenario. *Acta Ecologica Sinica*, 45(4): 1588-1598 (范强, 孙虎虎, 孙爽, 张津宁. 2025. 生态—耕地保护下的山东省碳储量估算与演变. 生态学报, 45(4): 1588-1598) [DOI: 10.20103/j.stxb.202405211159]
- Fang Z Y, Ding N, Feng H D, Shen Y and Zhang D. 2025. The impact of landscape patterns on the spatial differentiation characteristics of ecosystem services: a case study of Dongying City. *Journal of Northeast Forestry University*, 53(2): 86-96 (房子钰, 丁宁, 冯恒栋, 沈阳, 张达. 2025. 景观格局对生态系统服务空间分异特征的影响——以东营市为例. 东北林业大学学报, 53(2): 86-96) [DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2025.02.008]
- Feng Q L, Chen B A, Li G Q, Yao X C, Gao B B and Zhang L C. 2022. A review for sample datasets of remote sensing imagery. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(4): 589-605 (冯权洸, 陈泊安, 李国庆, 姚晓闯, 高秉博, 张连翀. 2022. 遥感影像样本数据集研究综述. 遥感学报, 26(4): 589-605) [DOI: 10.11834/jrs.20221162]
- Fu Z H, Yang Y H, Wang L J, Zhu X Y, Lv H and Qiao J J. 2024. Geographical types and driving mechanisms of rural hollowing-out in the Yellow River Basin. *Agriculture*, 14(3): 365 [DOI: 10.3390/agriculture14030365]
- Gao M Y and Li C. 2023. Spatial distribution characteristics, mechanism and clustering development strategies of rural settlement around the Yellow River floodplain area. *Development of Small Cities and Towns*, 41(8): 89-98 (高梦瑶, 李翘. 2023. 黄河滩区周边乡村聚落空间分布特征、机制及聚类发展策略. 小城镇建设, 41(8): 89-98) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1483.2023.08.013]
- Geng Y L, Hu Z Q, Guo W H, Zhong A Y and Li Q Z. 2025. Study on carbon storage evolution and scenario response under multi-pathway drivers in high-groundwater-level coal resource-based cities: a case study of three cities in Shandong, China. *Land*, 14(10): 2001 [DOI: 10.3390/land14102001]
- Giardina C P and Ryan M G. 2000. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 404(6780): 858-861 [DOI: 10.1038/35009076]
- Gou R. 2025. The spatial form and types of rural settlement landscape in Northwest China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 46(5): 151-160 (沟睿. 2025. 我国西北地区乡村聚落景观的空间形态及类型研究. 中国农业资源与区划, 46(5): 151-160) [DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20250514]
- Guo L, Huang W T, Wei Q, Teng G and Zhang M Q. 2025. Optimization simulation study of spatial carbon storage in Suqian City, Jiangsu Province based on InVEST and MOP-PLUS models. *Science of Surveying and Mapping*, 50(10): 152-165 (郭龙, 黄文亭, 魏清, 滕淦, 张孟强. 2025. 基于InVEST和MOP-PLUS模型的江苏省宿迁市国土空间碳储量优化模拟研究. 测绘科学, 50(10): 152-165) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2025.10.017]
- Haddaway N R, Hedlund K, Jackson L E, Kätterer T, Lugato E, Thomsen I K, Jørgensen H B and Isberg P E. 2017. How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6(1): 30 [DOI: 10.1186/s13750-017-0108-9]
- He L J, Cheng Q Y, Huang L B, Zhou Y J and Zhang Z R. 2025. Study on the impact of rural settlement changes on regional carbon stocks in the Yangtze River Economic Zone. *Acta Ecologica Sinica*, 45(12): 5871-5887 (何利杰, 陈青芸, 黄炉斌, 周亚娟, 张子睿. 2025. 长江经济带农村居民点变化对区域碳储量的影响. 生态学报, 45(12): 5871-5887) [DOI: 10.20103/j.stxb.202409132220]
- Huang J Q and Li X M. 2014. The realistic dilemmas and policy choices of rural migrant workers' urban settlement: a human capital analysis perspective. *Economist*, (5): 87-96 (黄江泉, 李晓敏. 2014. 农民工进城落户的现实困境及政策选择——一个人力资本分析视角. 经济学家, (5): 87-96) [DOI: 10.16158/j.cnki.51-1312/f.2014.05.023]
- Huang M, Ji J J, Cao M K and Li K R. 2006. Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China. *Acta Ecologica Sinica*, 26(12): 4156-4163 (黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 李克让. 2006. 中国区域植被地上与地下生物量模拟. 生态学报, 26(12): 4156-4163) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.12.031]
- Huang Z H, Du H Q, Li X J and Mao F J. 2025. Review of research on land use/cover change and its impact on forest carbon balance. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(1): 49-69 (黄子豪, 杜华强, 李雪建, 毛方杰. 2025. 土地利用/覆盖变化及其对森林碳收支影响研究综述. 遥感学报, 29(1): 49-69) [DOI: 10.11834/jrs.20233169]
- Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, Daily G C and Polasky S. 2011. *Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. Oxford: Oxford University Press [DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199588992.001.0001]
- Liu J B, Yi M H, Du X, Zhao H and Ma Z P. 2025. Spatial reconstruction of rural settlements oriented towards agricultural and rural modernization in China. *Geographical Science*, 45(2): 326-338 (刘继斌, 伊梦晗, 杜雪, 赵瀚, 马佐澎. 2025. 面向农业农村现代化的中国乡村聚落空间重构. 地理科学, 45(2): 326-338) [DOI: 10.11834/j.issn:1000-0933.2025.02.031]

- 10.13249/j.cnki.sgs.20241265]
- Liu J N, Ji G X, Gao H K, Chen W Q, Zhang Y L, Huang J C, Guo Y L and Chen Y N. 2025. Multi-scenario simulation and eco-environmental effect analysis of production-living-ecological space in Henan Province based on PLUS model. *Environmental Science*, 46(2): 990-1001 (刘佳楠, 姬广兴, 高红凯, 陈伟强, 张亚丽, 黄珺嫦, 郭宇龙, 陈轶楠. 2025. 基于PLUS模型的河南省“三生空间”多情景模拟及生态环境效应分析. *环境科学*, 46(2): 990-1001) [DOI: 10.13227/j.hjx.202402085]
- Liu J T. 2018. A Study on Collaborative Extraction Method of Typical Land Surface Types and the Evaluation of Ecological Environment in the Yellow River Delta Using Remote Sensing. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, University of Chinese Academy of Sciences (刘建涛. 2018. 黄河三角洲典型地表类型遥感协同提取方法及生态环境遥感评价研究. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所))
- Liu J T, Zhang Y, Meng F, Gong J H, Zhang D, Peng Y, and Zhang C. 2025. Rural settlement mapping and its spatiotemporal dynamics monitoring in the Yellow River Delta using multi-modal fusion of Landsat optical and sentinel-1 SAR polarimetric decomposition data by leveraging deep learning. *Remote Sensing*, 17(21): 3512 [DOI: 10.3390/rs17213512]
- Liu S, Cai L, Wen Z Y and Liu X H. 2025. Classification and distribution characteristics of ethnic settlements in the mountainous areas of northwest Yunnan. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 46(5): 73-85 (刘杉, 蔡蕾, 文智猷, 李旭华. 2025. 滇西北山地聚落分类及其分布类型特征. *四川林业科技*, 46(5): 73-85) [DOI: 10.12172/202505080001]
- Liu S W, Wu Y F and Li Y C. 2025. Rural settlement pattern and its driving factors in Jiangsu Province. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 46(6): 207-216 (刘苏文, 吴永发, 李永昌. 2025. 江苏省乡村聚落格局及其驱动因子分析. *中国农业资源与区划*, 46(6): 207-216) [DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20250618]
- Liu T, Bao S C and Yuan T. 2024. Advances in research on plant carbon sequestration capacity across different vegetation zones in China. *Forest and Grassland Resources Research*, (4): 12-20 (刘童, 鲍首辰, 袁涛. 2024. 中国不同植被区植物碳汇能力研究进展. *林草资源研究*, (4): 12-20) [DOI: 10.13466/j.cnki.lczyy.2024.04.002]
- Liu Y L, Yao Y, Wang R and Xu Y X. 2024. Evolutionary characteristics and influencing factors of the spatial and temporal patterns of rural settlements in ecologically fragile areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 40(20): 219-229 (刘愿理, 姚焱, 汪蕊, 许亚茜. 2024. 生态脆弱区乡村聚落时空格局演化特征与影响因素研究. *农业工程学报*, 40(20): 219-229) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406155]
- Liu Y S, Liu Y and Zai R X. 2009. Geographical research and optimizing practice of rural hollowing in China. *Acta Geographica Sinica*, 64(10): 1193-1202 (刘彦随, 刘玉, 翟荣新. 2009. 中国农村空心化的地理学研究与实践. *地理学报*, 64(10): 1193-1202) [DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.10.005]
- Liu Y T, Ye Y, Jiang C, Jiang J F, Wang F H, Li J and Zhang X P. 2024. Dynamics of rural settlement patterns in the Yellow River Delta in response to river diversion and avulsion since 1855. *Rural Landscapes: Society, Environment, History*, 11(1): 2 [DOI: 10.16993/rl.100]
- Lou Y C, Huang L, Li A, Feng T and Wang K. 2025. Evolution of the spatial pattern and influencing factors of rural settlements in the Taihu Basin over the past century—a case study of Huzhou City, Zhejiang Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 32(4): 320-331 (楼雨晨, 黄璐, 李昂, 冯天, 王珂. 2025. 太湖流域乡村聚落百年格局演变及其影响因素——以浙江省湖州市为例. *水土保持研究*, 32(4): 320-331) [DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2025.04.003]
- Lou Q, Xing S H, Liu C, Wang S C, Chen M Y and Yuan X. 2023. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage and its response to land use/cover changes in the Yellow River Delta in recent 20 years. *Research of Soil and Water Conservation*, 30(6): 366-375 (路琦, 邢韶华, 刘昌, 汪生财, 陈梦缘, 袁秀. 2023. 近20年黄河三角洲地区植被覆盖度时空变化及其趋势分析. *水土保持研究*, 30(6): 366-375) [DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.034]
- Luo S Q, Hu X M, Sun Y, Yan C and Zhang X. 2023. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled PLUS-InVEST model. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 31(2): 300-314 (雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 闫彩, 张鑫. 2023. 耦合PLUS-InVEST模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响. *中国生态农业学报(中英文)*, 31(2): 300-314) [DOI: 10.12357/cjea.20220520]
- Sharp R, Douglass J, Wolny S, Arkema K, Bernhardt J, Bierbower W, Chaumont N, Denu D, Fisher D, Glowinski K, Griffin R, Guannel G, Guerri A, Johnson J, Hamel P, Kennedy C, Kim C K, Lacayo M, Lonsdorf E, Mandle L, Rogers L, Silver J, Toft J, Verutes G, Vogl A L, Wood S and Wyatt K. 2020. InVEST 3.9.0 User's Guide The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H and Shaw M. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1): 4-11 [DOI: 10.1890/080023]
- Niu B W, Feng Q L, Qiu B W, Su S, Zhang X M, Cui R J, Zhang X H, Sun F L, Yan W H, Zhao S Y, Shi H Y, Ou C, Yan X L, Gong J H, Yin G F, Huang J X, Liu J T, Gao B B, Yao X C, Yang J Y and Zhu D H. 2025. Global-PCG-10: a 10 m global map of plastic-covered greenhouses derived from Sentinel-2 in 2020. *Earth System Science Data*, 17(10): 5065-5088 [DOI: 10.5194/essd-17-5065-2025]
- Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S and Hayes D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045): 988-993 [DOI: 10.1126/sci-

- ence.1201609]
- Qin Y, Hao F X, Li Z F, Li Q and Jiang G H. 2025. Evolution patterns of spatial layout in rural settlements of plain agricultural areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 41(16): 299-307 (秦羽, 郝凤辛, 李子菲, 李强, 姜广辉. 2025. 平原农区乡村聚落的空间格局演变模式. *农业工程学报*, 41(16): 299-307) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410194]
- Qiu J J, Wang L G, Tang H J, Li H and Li C S. 2004. Study on the situation of soil organic carbon storage in arable lands in northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 37(8): 1166-1171 (邱建军, 王立刚, 唐华俊, 李红, Li C S. 2004. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究. *中国农业科学*, 37(8): 1166-1171) [DOI: 10.3321/j.issn:0578-1752.2004.08.014]
- Ren X J, Pei T T, Chen Y, Xie B P and Cheng D L. 2021. Impact of land use change on carbon storage in Gansu Province based on carbon density correction. *Ecological Science*, 40(4): 66-74 (任玺锦, 裴婷婷, 陈英, 谢保鹏, 程东林. 2021. 基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响. *生态科学*, 40(4): 66-74) [DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.04.008]
- Shao E H, Xu W M, Yang H, Lin X and Liao Y T. 2024. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon stock in Nanping City by coupling PLUS-InVEST model. *Journal of Hainan University (Natural Science)*, 42(2): 186-196 (邵尔辉, 徐伟铭, 杨慧, 林馨, 廖云婷. 2024. 耦合 PLUS-InVEST 模型的南平市土地利用模拟与碳储量评估. *海南大学学报(自然科学版)*, 42(2): 186-196) [DOI: 10.15886/j.cnki.hdxzbkb.2024.0021]
- Szostek M, Szpunar-Krok E, Pawlak R, Stanek-Tarkowska J and Ilek A. 2022. Effect of different tillage systems on soil organic carbon and enzymatic activity. *Agronomy*, 12(1): 208 [DOI: 10.3390/agronomy12010208]
- Tan X L, Liu Y, An Y, Hu Z Y and Hu T. 2025. Spatial pattern and multifunctional characteristics of rural settlements: take Dongting Lake area of Hunan Province as an example. *Geographical Research*, 44(9): 2300-2314 (谭雪兰, 刘悦, 安悦, 胡尊英, 胡涛. 2025. 乡村聚落空间格局与多功能特征研究——以湖南省洞庭湖地区为例. *地理研究*, 44(9): 2300-2314) [DOI: 10.11821/dlyj020240472]
- Wan H F, Meng Y B, Chen Y, Zhao Z L, Luo J Q and Zhang Z R. 2024. Response of carbon storage to land use/cover changes and vulnerability for central Guizhou urban agglomeration. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 44(1): 443-452 (万海峰, 蒙友波, 陈洋, 赵祖伦, 罗洁琼, 张朝睿. 2024. 黔中城市群碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性. *水土保持通报*, 44(1): 443-452) [DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.043]
- Wang D and Liu Z Y. 2019. Progress and implications of international rural space research. *Progress in Geography*, 38(12): 1991-2002 (王丹, 刘祖云. 2019. 国外乡村空间研究的进展与启示. *地理科学进展*, 38(12): 1991-2002) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.12.014]
- Wang F S. 1994. Reflections on the "Migrant Worker Tide". *Economic Research Journal*, 4: 32-33, 45 (王凤山. 1994. 关于“民工潮”的思考. *经济研究*, (4): 32-33, 45) [DOI: CNKI:SUN:JJYJ.0.1994-04-005.]
- Wang J Y and Zhang Y. 2021. Analysis on the evolution of rural settlement pattern and its influencing factors in China from 1995 to 2015. *Land*, 10(11): 1137 [DOI: 10.3390/land10111137]
- Xing X T, Wang Q, Zhao J J, Liu P D and Zhang J Y. 2025. Investigating land use and carbon storage changes in Jinan metropolitan circle based on the InVEST-PLUS coupled model. *Remote Sensing for Natural Resources*, 37(4): 118-130 (邢笑天, 王琪, 赵佳俊, 刘浦东, 张靖苑. 2025. 耦合 InVEST—PLUS 模型的济南都市圈土地利用及碳储量变化研究. *自然资源遥感*, 37(4): 118-130) [DOI: 10.6046/zrzyyg.2024117]
- Yang J, Xie B P and Zhang D G. 2021. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 29(6): 1018-1029 (杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 2021. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究. *中国生态农业学报(中英文)*, 29(6): 1018-1029) [DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200746]
- Yang K Y, Song Y Y and Xue D Q. 2020. Spatiotemporal change of rural settlement land in the Loess Plateau and influencing factors. *Resources Science*, 42(7): 1311-1324 (杨凯悦, 宋永永, 薛东前. 2020. 黄土高原乡村聚落用地时空演变与影响因素. *资源科学*, 42(7): 1311-1324) [DOI: 10.18402/resci.2020.07.08]
- Yang Q Q, Zhang P, Qiu X C, Xu G L and Chi J Y. 2023. Spatial-temporal variations and trade-offs of ecosystem services in Anhui Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1): 855 [DOI: 10.3390/ijerph20010855]
- Yang Z K, Zuo Q T, Ba Y J, Qin X and Ji Y H. 2025. Temporal and spatial evolution and correlation analysis of carbon stocks-water production in Qinhe River Basin based on InVEST model. *Yellow River*, 47(3): 1-9 (杨智楷, 左其亭, 巴音吉, 秦西, 纪义虎. 2025. 基于 InVEST 的沁河流域产水量—碳储量时空演变及关联分析. *人民黄河*, 47(3): 1-9) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2025.03.001]
- Ye Y, Liu Y T, Gao S Q, Lou L, Zhang X P and Wang F H. 2025. The influence of historical river system changes on settlement distribution and implications for cropland gridding in the Yellow River Delta. *Land*, 14(4): 812 [DOI: 10.3390/land14040812]
- Yu W, Liu B C and Song J P. 2016. A study on farmers' willingness to quit rural residential lands and its influencing factors. *Geographical Research*, 35(3): 551-560 (于伟, 刘本城, 宋金平. 2016. 城镇化进程中农户宅基地退出的决策行为及影响因素. *地理研究*, 35(3): 551-560) [DOI: 10.11821/dlyj201603013]
- Zeng Q Y and Sun C Z. 2024. Estimation and influencing factors of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Yellow River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 44(13): 5476-5493 (曾庆雨, 孙才志. 2024. 黄河流域陆地生态系统碳储量测算及其影响因素. *生态学报*, 44(13): 5476-5493) [DOI: 10.20103/j.stxb.202311012367]
- Zhang X, Liu Y S, Wang W, Xue Y X, Li B Y and Jin S Z. 2025. Simulation of multi-scenario land use change and its impact on ecosystem services in China based on PLUS-InVEST model. *Acta Ecologica Sinica*, 45(19): 9577-9593 (张贤, 刘彦随, 王伟, 薛岩欣, 李博远, 金淑贞. 2025. 基于 PLUS-InVEST 模型的中国多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响. *生态学*

- 报, 45(19): 9577-9593) [DOI: 10.20103/j.stxb.202501180162]
- Zhang X Y, Hou X Y, Fan G L, Wang F T, Wang X L, Li D, Song J, Liu K, Xu H and Gao Y X. 2025. Spatiotemporal dynamics of vegetation carbon sequestration and afforestation potential for carbon sink enhancement: a case study of Changdao Archipelago, China. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(11): 3243-3261 (张雪莹, 侯西勇, 范国伦, 王福涛, 王晓利, 李东, 宋洁, 刘凯, 徐鹤, 高映旭. 2025. 长岛植被固碳量时空变化特征及造林增汇潜力分析. *遥感学报*, 29(11): 3243-3261) [DOI: 10.11834/jrs.20254306]
- Zhou H, Tian F P, Lu Y, Hu Y and Shi Y J. 2015. A review on influencing factors of grassland soil organic carbon storage. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(23): 153-157 (周恒, 田福平, 路远, 胡宇, 时永杰. 2015. 草地土壤有机碳储量影响因素研究进展. *中国农学通报*, 31(23): 153-157) [DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb15020071]
- Zhou J Z, Liu X R, Li Q Z, Hou Q H and Liu S Q. 2023. Spatial resilience assessment and optimization of rural settlements in small watershed based on social network. *Journal of Human Settlements in West China*, 38(6): 129-135 (周吉喆, 刘禧瑞, 李青泽, 侯全华, 刘思琪. 2023. 基于社会网络的小流域乡村聚落空间韧性评估与优化. *西部人居环境学刊*, 38(6): 129-135) [DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20230618]

Impacts of rural settlement evolution on regional carbon storage in the Yellow River Delta based on multisource data

LIU Jiantao¹, GUO Jiamin¹, MENG Fei¹, YIN Gaofei², FENG Quanlong³

1. School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China;

2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Chian;

3. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Since the implementation of China's Reform and Opening-up policy, the continuous advancement of industrialization and urbanization has profoundly reshaped rural spatial patterns. In many rural regions, a typical phenomenon characterized by "population decrease but land increase" has emerged, resulting in the disorderly expansion and hollowing of rural settlements. This process has posed significant challenges to rational land resource utilization, ecological environment protection, and food security. Existing studies have mainly focused on the spatial pattern evolution and driving mechanisms of rural settlements, while relatively limited attention has been paid to the carbon storage changes induced by the orderly withdrawal of rural settlements. The Yellow River Delta is a strategic region for ecological protection, agricultural production, and economic development in China. Under the combined influences of environmental protection policies, demographic shifts, and urban development, the spatial pattern of rural settlements in this region has undergone substantial changes in recent decades. Therefore, taking Dongying City in Shandong Province, the core area of the Yellow River Delta, as the study area, this research aims to quantify the impacts of rural settlement dynamics on regional carbon storage and explore potential carbon storage changes under an orderly rural settlement withdrawal scenario. On the basis of multisource remote sensing datasets and driving factor data, the InVEST (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs) model was employed to estimate regional carbon storage and evaluate the impacts of rural settlement expansion on carbon storage during the study period. Subsequently, the PLUS (patch-generating land use simulation) model was coupled with the InVEST model to simulate future land-use patterns and assess carbon storage changes under an orderly rural settlement withdrawal scenario in 2040. The results are as follows: (1) From 1987 to 2023, despite the continuous decline in rural population, the total area of rural settlements in Dongying City exhibited an overall increasing trend. The cumulative expansion of rural settlements reached 223.233 km², mainly encroaching upon other land-use types, particularly cropland. (2) During the same period, the expansion of rural settlements resulted in a reduction of approximately 0.555×10⁶ t in regional carbon storage. Among different land-use conversions, cropland occupation contributed the largest carbon storage loss, reaching 0.257×10⁶ t and accounting for 46.31% of the total carbon loss. (3) Simulation results indicate that under the orderly withdrawal scenario, the area of rural settlements could decrease by approximately 106.275 km² by 2040, leading to an increase of about 0.250×10⁶ t in regional carbon storage. The expansion of cropland would play a dominant role, contributing approximately 0.163×10⁶ t of carbon storage gain, accounting for 65.20% of the total carbon increment under this scenario. Overall, the orderly withdrawal of rural settlements can effectively promote the transformation of idle into ecological land or cropland, thereby enhancing regional carbon sequestration capacity. The findings of this study provide scientific support for ecological protection and food security strategies in the Yellow River Delta region.

Key words: carbon storage, rural settlement evolution, Yellow River Delta, InVEST model, PLUS model

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42171113, 42571383)