# 基于PLUS-InVEST耦合模型的平原农区土地利用多情景模拟与碳储量时空演变研究

王高程[1], 刘 健[1], 李莎莎[1], 张婷婷[1], 王瑗玲[1,2*]

(1. 山东农业大学资源与环境学院,山东泰安 271018,中国; 2. 土肥高效利用国家工程研究中心,山东泰安 271018,中国)

**摘 要:** [**目的/意义**] 碳储量是衡量生态系统功能的重要指标,不同土地类型的固碳能力不同,分析并模拟土地利用变化与碳储量时空特征,可为土地利用优化和区域碳损失风险评估提供依据。[**方法**] 以典型平原农业县山东省高唐县为研究区,运用斑块生成土地利用模拟模型与生态系统服务与权衡综合评估模型(Patch-generating Land Use Simulation-Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, PLUS-InVEST),模拟自然发展、耕地保护、城镇发展、生态保护和可持续发展5种情景下土地利用变化,估算不同情景下碳储量特征。[**结果和讨论**] 2009—2023年地类变化明显,尤其是林地与耕地之间转换最显著;期间耕地面积净减少3 184.10 $hm^2$,林地面积净增加1 988.74 $hm^2$,2009—2023年碳储量总体增加$1.14\times10^5$ t,2014—2019年总体增幅约3.56%,耕地碳储量减少最多,林地增加最多;2035年各情景下土地利用类型的空间分布格局基本一致,均呈现中心低、四周高的空间分布规律。不同情景下碳储量均有所不同,城镇发展情景下总碳储量最低,相较于2023年减少$3.01\times10^5$ t。[**结论**] 应注重耕地保护、生态保护与城镇建设的协同发展,避免单一情景政策的局限性。研究通过PLUS-InVEST耦合模型有效揭示了土地利用变化对碳储量时空分布的影响,探明了不同情景下碳储量空间分布特征,为“双碳”和可持续发展目标的实现提供借鉴。

**关键词:** 土地利用;碳储量;PLUS-InVEST耦合模型;多情景模拟;时空演变;平原农区

**中图分类号:** [P963];S29;TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** SA202512028

引用格式:王高程, 刘健, 李莎莎, 张婷婷, 王瑗玲. 基于PLUS-InVEST耦合模型的平原农区土地利用多情景模拟与碳储量时空演变研究[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(4): 164-179. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202512028

WANG Gaocheng, LIU Jian, LI Shasha, ZHANG Tingting, WANG Ailing. Multi-Scenario Simulation of Land Use and Spatiotemporal Evolution of Carbon Storage in Plain Agricultural Region Based on The Coupled PLUS-InVEST Model [J]. Smart Agriculture, 2026, 8(4): 164-179. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202512028 (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

近年来,为实现“双碳”目标,中国积极采取低碳发展和节能减排政策[1],取得了一定成效。碳储量是衡量生态系统功能的重要指标,不同土地类型固碳能力不同,探明碳储量时空分布特征和动态变化,对于研究全球气候变化和维持生态系统平衡具有重要意义。由于不同土地利用类型的固碳能力有差异[2],土地利用变化会引起陆地生态系统碳储量变化[3],其转换过程中通常伴随着大量碳交换,进而影响陆地生态系统碳循环过程相关的结构和功能[4]。因此,深入分析并预测土地利用变化与碳储量的时空分布格局[5],可为增汇固碳目标的实现和土地利用结构优化提供科学依据[4]。

土地利用模拟模型包括土地利用变化及其效应模型(Conversion of Land Use and its Effects Model, CLUE)、小尺度土地利用变化及其效应模型(Conversion of Land Use and its Effects at Small region extent Model, CLUE-S)[6]、Markov模型[7]和斑块级土地利用变化模拟模型(Patch-generating Land Use Simulation model, PLUS)[6]等,其中PLUS模型能模拟多种土地利用类型变化过程中的非线性关系,

收稿日期:2025-12-30

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2021MD018;ZR2025QC396)

作者简介:王高程,硕士研究生,研究方向为土地利用与信息技术。E-mail:wanggc9804@163.com

*通信作者:王瑗玲,博士,教授,研究方向为土地利用与信息技术。E-mail:ailingwang@sdau.edu.cn

copyright©2026 by the authors 

具有模拟精度高等优点，被大量学者关注，开展了黄土高原[8]等区域研究。碳储量估算研究较为丰富，相关学者基于反硝化-分解模型（Denitrification-Decomposition Model, DNDC）[9]对内蒙古典型草地自然保护区进行碳储量模拟，研究表明DNDC模型能较好地模拟地上生物量的动态变化，而对地下生物量的模拟效果略差；相关学者基于高分一号卫星（Gaofen-1 Satellite, GF-1）[10]遥感影像构建遥感估算模型[11]，开展碳储量估算研究，但受影像识别精度和天气影响较大。生态系统服务和权衡的综合评估（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST）[12]模型是碳储量估算中常用的一种方法。该模型通过叠加土地利用类型与不同地类对应的单位面积碳密度数据，实现对碳储量的估算[13]。由于所需参数较少且计算效率较高，InVEST模型已被国内外学者广泛应用于不同区域的碳储量研究[14]，例如长三角城市群[15]。部分研究借助该模型揭示了土地利用变化所引起的碳储量变化特征[16]，从而为“双碳”目标的实现以及土地利用管理的优化提供了数据支撑。然而，InVEST模型不具备预测模拟的功能，难以直接模拟多种情景下各土地利用类型的碳储量及其空间分布，也无法清晰刻画土地利用变化与碳储量变化之间的内在联系[17]。实际上，未来的碳储量变化在很大程度上取决于不同的土地利用情景设定[18]。为此，本研究将PLUS模型与InVEST模型进行耦合。这一做法不仅能够弥补单一模型在功能上的不足，也有助于更全面地揭示未来碳储量变化的时空特征。

然而，当前研究多以典型城市群等为研究区，突出耕地与建设用地之间的转换，典型平原农业区在陆地碳储量变化模拟研究中的侧重点与之不同。平原农区在耕地保护政策和粮食安全保障措施要求下，耕地利用效益和布局优化是造成碳储量差异的主要原因，因此不能沿用已有结论；在模拟未来土地利用时，相关研究多选取数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）、坡度、坡向和社会经济因素作为驱动因子。驱动因子不够丰富，较少考虑归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）与土壤质地。结合NDVI与土壤质地数据，可有效提升模型精度并为耕地精细化管理提供科学依据。未来情景模拟时，大多研究只考虑耕地保护、城镇发展和生态保护，缺少对不同情景综合考虑。

鉴于此，本研究以典型平原农业县山东省高唐县为研究区，分析2009—2023年土地利用时空演变特征和各地类转化规律，运用PLUS模型模拟2035年土地利用类型，考虑土壤质地和NDVI等驱动因子，探明多情景下各地类空间分布。运用InVEST模型计算各年份和各情景下的碳储量，确定最优发展情景，促进“双碳”目标实现。

## 1　研究区域和数据来源

### 1.1　研究区概况

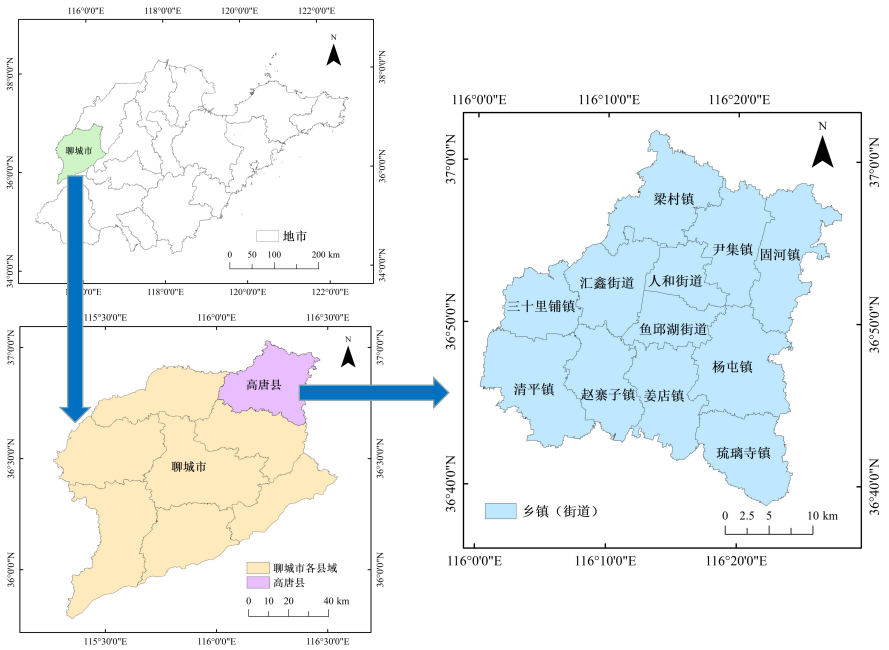
高唐县（116°06′～116°27′E，36°39′～37°27′N，图1）地处山东省西北部，位于聊城市最北部，面积947.38 km$^2$，辖3个街道、9个镇，人口约51万人。土壤有褐土化潮土和潮盐土等亚类。地貌是微波起伏的黄泛冲积平原，地势西南高，东北低。地下水源丰富，埋藏浅，水质较好。2023年耕地面积为642.87 km$^2$，占比为64.75%；建设用地面积为151.34 km$^2$，占比为15.97%；林地面积为82.89 km$^2$，占比为8.75%，其余地类面积占比较小。全县生产总值为193.06亿元，全年粮食总产量68.61万吨。开展典型平原农业县域碳储量估算及其动态监测，对“双碳”目标的实现具有重要意义。

### 1.2　数据及来源

数据包括土地利用数据、基础数据、自然因素数据、社会经济数据和区位条件数据。

土地利用数据基于Landsat TM 7和Landsat8 OLI_TRIS波段卫星影像数据进行土地利用信息提取[19]。首先，参考相关研究[17,20]，将土地利用分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6类。然后下载2009年、2014年、2015年、2019年和2023年8—10月晴朗天气卫星遥感数据[21]。以减少天气等因素对影像质量的影响。对遥感影像进行辐射校正、几何校正、投影变换、特征提取、增强和多元信息复合等预处理后，采用监督分类方法提取耕地等土地利用类型。运用误差矩阵/混淆矩阵（Error Matrix）评价法[22]，计算提取总体精度为85.31%，Kappa系数为0.786。

驱动因子包括DEM等自然因素数据、国内生产总值（Gross Domestic Product, GDP）等社会经济数据和区位条件数据[23-25]。其中，坡度与坡向数据通过提取处理高程数据得出。地块距村庄、城镇、道路与水域的距离指标通过遥感影像提取并运




注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号标准地图制作,底图无修改。

图1 高唐县地理位置及行政区划

Fig. 1 The geographical location and administrative division of Gaotang county

用欧氏距离计算;为确保数据分析的准确性和一致性,统一各类型数据分辨率为30 m。数据及来源如表1所示。

**表1 土地利用模拟的数据及来源**

Table 1 Data and sources of land use simulation

| 数据类型 | 数据名称 | 数据来源 | 选取依据及作用 | 文献参考 |
|---|---|---|---|---|
| 遥感数据 | 土地利用数据 | 地理空间数据云(http://www.gscloud.cn) | Land系列影像覆盖广、可免费获取,是土地利用分类的常用数据,用于PLUS模型模拟和InVEST模型估算 | |
| 基础数据 | 行政区划 | 自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index.html) | 确定研究区范围和图件制作 | [19, 21] |
| | 三区三线 | 《高唐县国土空间总体规划(2021—2035年)》 | 划定情景模拟中的限制转换区域 | |
| 自然因素数据 | DEM | 地理空间数据云(http://www.gscloud.cn) | 对土地利用类型具有约束作用,用于PLUS模型驱动因子分析 | [26] |
| | 坡度、坡向 | 基于DEM数据在ArcGIS中计算 | | |
| | NDVI | 资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn) | NDVI与植被量呈现显著正相关,能较直观地反映植被分布特征。用于PLUS模型驱动因子分析 | [27] |
| | 土壤质地 | 高唐县农业农村局 | 能够揭示土壤颗粒属性的空间分布规律,在耕地气候调节与碳循环中起到关键作用,用于PLUS模型驱动因子分析 | [8, 28] |
| | 距河流距离 | | 社会经济驱动因子和交通区位因子与耕地、建设用地等地类分布密切相关,社会经济发展水平较高、交通区位条件优越的地区,建设用地扩张明显。用于PLUS模型驱动因子分析 | [15, 23] |
| 社会经济数据 | 人均GDP<br>人口密度 | 高唐县统计年鉴 | | [24, 29] |
| 区位条件数据 | 距离指标 | 地理空间数据云(http://www.gscloud.cn) | | [25, 29] |

## 2 研究方法

### 2.1 研究思路

本研究通过PLUS-InVEST耦合模型,实现2035年不同情景下的土地利用模拟与碳储量计算的一体化分析,如图2所示。首先,通过监督分类方法提取2009—2023年土地利用数据,分析土地利用时空演变;其次,运用InVEST模型估算碳储量,探明各地类碳储量空间分异规律;然后,从自然因素、社会经济和区位条件角度选取驱动因子,引入

NDVI和土壤质地以提升耕地模拟的精度，设定自然发展、耕地保护、城镇发展、生态保护和可持续发展5种情景，运用PLUS模型模拟2035年土地利用类型，对比分析不同情景下的土地利用变化；最后，将模拟结果输入InVEST模型，估算碳储量，对比分析不同情景下碳储量变化，提出对策建议。

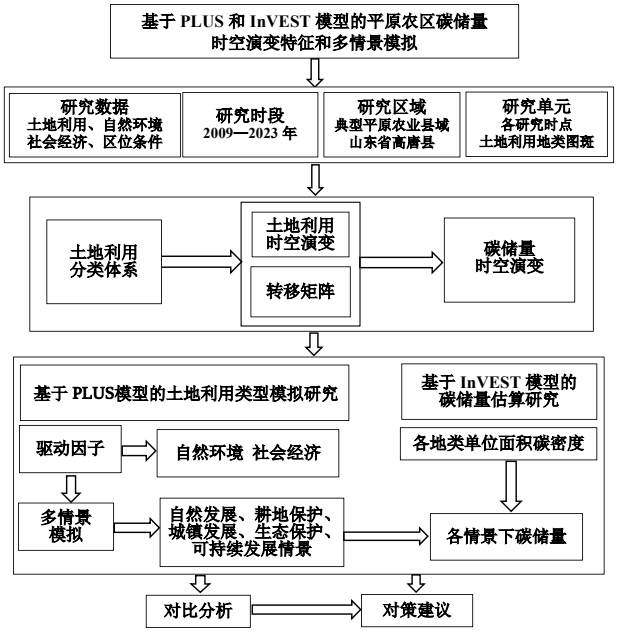



图2　平原农区土地利用碳储量研究思路

Fig.2　Research framework of land use and carbon storage in plain agricultural regions

## 2.2 方法模型

### 2.2.1　PLUS模型

1）模型构建。PLUS模型主要由用地扩张分析（Land Expansion Analysis Strategy，LEAS）模块和基于多类型随机种子（Cellular Automata based on Random Seeds, CARS）模块组成，通过结合随机种子生成和阈值降低机制，精准模拟土地利用类型[30]。首先，从自然因素、社会经济以及区位条件三个维度选取驱动因子，统一分辨率。其次，在LEAS模块下结合土地利用和驱动因子数据，采用随机森林算法预测各地类发展概率。如公式（1）所示。

$$P_{\alpha,\beta}^{\gamma}(x)=\frac{\sum_{n=1}^{A}H(L_n(x)=\gamma)}{I} \tag{1}$$

式中：$x$为驱动因子构成的向量；$L_n(x)$代表决策树为$n$时的土地利用预测类型；$H(L_n(x)=\gamma)$为决策树的指示函数；$I$表示决策树总数；$\gamma$取值为0或1，1表示其他地类可转变为地类$\beta$，0表示地类$\beta$不可转变；$P_{\alpha,\beta}^{\gamma}(x)$为在$\gamma$为0或1时，栅格$\alpha$处第$\beta$种地类的增长概率值。

CARS模块通过结合CA模型，设置土地利用需求、转移成本矩阵和邻域权重，模拟未来土地利用空间格局[31]。如公式（2）所示。

$$OP_{\alpha,\beta}^{\gamma-1,T}=P_{\alpha,\beta}^{\gamma}\times W_{\alpha,\beta}^{T}\times D_{\beta}^{T} \tag{2}$$

式中：$OP_{\alpha,\beta}^{\gamma-1,\sigma}$为栅格$\alpha$处在$T$时刻转为第$\beta$种地类的总体概率；$P_{\alpha,\beta}^{\gamma}$为栅格$\alpha$处第$\beta$种地类发展的适宜性概率；$D_{\beta}^{T}$表示预设地类数量对地类$\beta$的影响；$W_{\alpha,\beta}^{T}$表示栅格$\alpha$处的邻域权重，代表地类$\beta$在最后一次迭代$T$时的覆盖比例。

2）驱动因子选择。自然因素方面，选择DEM、坡度、坡向、归一化植被指数、土壤质地和距水域距离；社会经济方面，选择GDP和人口；区位条件方面，选择距铁路距离、距主干道距离、距次干道距离、距城镇距离和距村庄距离。

DEM、坡度与坡向对土地利用类型的分布具有限制作用[26]。高唐县地处黄泛冲积平原，整体地形平坦，地势呈现出西南高、东北低的特征。由于坡度变化不大，DEM和坡度对土地利用的限制较为有限，但仍会在一定程度上影响水域与建设用地的空间布局。

土壤质地有助于提升土地模拟的精度[28]，尤其在农业种植区，作物生长对土壤质地的适应性要求较高，质地条件直接影响作物的生长发育以及水肥保持能力。此外，土壤质地数据能够反映土壤颗粒属性的空间分布特征，在耕地气候调节和碳循环过程中至关重要。高唐县的土壤类型以褐土化潮土和潮盐土为主，空间差异明显，这种差异直接影响了耕地生产力的分布格局以及碳循环过程。因此，将土壤质地作为PLUS模型的驱动因子，有助于提高耕地模拟的准确性与可靠性。

NDVI与植被覆盖程度呈显著正相关，能够较为直观地展现植被的空间分布情况[27]，例如，NDVI值较高的区域多为林地和草地，而较低的区域则为建设用地或未利用地。同时，NDVI也能够反映气候变化或人为活动所引起的植被变化。本研究引入NDVI数据，用于区分西南部林地等高值区域与县城中心建设用地等低值区域，并能够精细刻画退耕还林政策下植被变化的特征。

将NDVI与土壤质地相结合，不仅可以提高模型的模拟精度和结果可信度，也能为耕地精细化管理提供科学支撑。不同地类在NDVI和土壤质地上存在差异，引入该驱动因子有助于PLUS模型更准

确地识别耕地、林地和建设用地的分布范围，从而增强多情景模拟的可靠性。

人均GDP、交通区位等社会经济因子与耕地、建设用地等地类的分布密切相关[29]。研究选取了各乡镇的人均GDP与人口密度数据，以及距离铁路、主干道、次干道、城镇和村庄的距离指标，用以表征人类活动强度对建设用地扩张和耕地变化的驱动作用。整体来看，社会经济发展水平较高且交通条件优越的地区，建设用地扩张趋势更为明显。

选择2015年和2019年为模拟基准年，以2023年为验证时点，模拟2035年高唐县土地利用情况。通过模拟2023年土地利用类型，并与实际情况进行对比，得到Kappa系数为0.924，总体精度为0.959，品质因数（Figure of Merit, FoM）为0.102，符合精度验证[32]。

3）发展情景设置。计算不同发展情景转移概率[33]，再依据当地政策文件、参考相关研究修正。如公式（3）所示。

$$P_{(\alpha,\beta)}=\frac{S_{(\alpha,\beta)}}{\sum S_{(\alpha,\gamma)}} \tag{3}$$

式中：$P_{(\alpha,\beta)}$为地类$\alpha$转为地类$\beta$的概率；$S_{(\alpha,\beta)}$为研究时段内地类$\alpha$转为地类$\beta$的面积；$\sum S_{(\alpha,\gamma)}$为研究时段内地类$\alpha$转为所有其他地类的总面积。

5种情景设置如下：

①自然发展情景。延续2009—2023年人口和经济发展趋势，不设置政策和规划干预及限制转换条件。

②耕地保护情景。该情景下，高唐县严格落实耕地保护制度，减少耕地转为建设用地，鼓励未利用地开垦为耕地。因此，耕地向建设用地转移概率降低70%[3,33]，未利用地向耕地转移概率增加50%[20]，耕地转为林地、草地和水体概率均降低30%[20]，设置基本农田、水体为限制条件。

③城镇发展情景。高唐县正处于城镇化和经济社会快速发展阶段，城镇功能不断完善，强化中心集聚，加强城镇建设管理，打造特色产业镇和中心镇，建设用地将持续适量增长。因此，耕地向建设用地转移概率提高50%[34]，设置城镇开发边界为限制条件。

④生态保护情景。《高唐县“十四五”生态环境保护规划》强调重视生态用地保护，减少人类活动占用自然生态空间，构建合理的生态功能区格局，不断拓展生态空间，建设生态廊道。要求严格落实耕地保护政策，鼓励退耕还林、还草。因此，耕地向林地转移概率提高30%[19]，耕地向草地转移概率提高20%[35]，设置生态保护红线为限制条件。

⑤可持续发展情景。《高唐县国土空间总体规划（2021—2035年）》指出积极推进绿色转型，加强生态建设，设定“煤退绿进、低碳高唐”的能源转型目标，严守“三区三线”，推动耕地保护与生态保护协同。因此，未利用地向耕地、林地和草地转移概率均提高30%[36]，耕地、林地和草地转为建设用地和未利用地的概率均降低30%[19]，设置基本农田、水体和生态保护红线为限制条件。

4）模拟规则设定。转移成本矩阵用于描述各地类转换的约束条件。设定的各个情景下的土地类型间转移成本矩阵如表2。

按照情景设置规则，预测2035年各情景下土地利用需求量，如表3所示。邻域权重反映各个土地利用类型的扩张能力，根据模型测试校正确定，确保权重因子集具有较高精度。邻域权重取值范围在0～1之间，值越大，越难以转化；反之，值越小，越容易转化。本研究根据2009—2023年各地类扩张得到邻域权重。由于城镇化发展，建设用地难以复垦为耕地；未利用地作为后备土地资源，更易转为其他地类，各地类邻域权重设置与实际相符。

### 2.2.2 InVEST模型

本研究基于土地利用和土地利用碳密度，运用InVEST模型评估碳储量。陆地生态系统碳储量包括地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机质碳储量4个部分[13]，计算如公式（4）所示。

$$C_T=C_A+C_U+C_S+C_D \tag{4}$$

式中：$C_T$为陆地生态系统总碳储量；$C_A$为植被地上碳储量；$C_U$为地下碳储量；$C_S$为土壤碳储量；$C_D$为死亡有机质碳储量。单位均为t/hm$^2$。

参考相关研究[35]确定山东省各地类碳密度数据。高唐县和山东省的年均温分别为13.9 ℃和14.5 ℃，年均降水量分别为801.6和861.5 mm。采用生物量碳密度和土壤碳密度与气温和降水关系模型[20,37,38]进行修正，死亡碳密度通常为地上生物碳的10%[39]，确定高唐县各地类碳密度数值，如表4所示。

### 2.2.3 PLUS模型与InVEST模型的耦合机制

PLUS模型能够精准模拟生态建设与耕地保护之间的非线性转换规律，结合不同驱动因子和政策导向，能够有效分析不同情景下耕地与生态用地的转换特征[30,31]。InVEST模型通过结合土地利用类

**表2　高唐县各发展情景下的土地利用转移成本矩阵**

Table 2　Land use transfer cost matrix of various development scenarios in Gaotang county

| | 自然发展情景 | | | | | | 耕地保护情景 | | | | | | 城镇发展情景 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | F | G | W | B | U | C | F | G | W | B | U | C | F | G | W | B | U |
| C | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| F | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| G | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| W | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| U | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | 生态保护情景 | | | | | | 可持续发展情景 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | F | G | W | B | U | C | F | G | W | B | U |
| C | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| F | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| G | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| W | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| U | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |

注：C、F、G、W、B和U分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地；0和1分别表示禁止和允许转换。

**表3　平原农区土地利用碳储量研究高唐县各地类邻域权重**

Table 3　The neighborhood weights of various land use types in Gaotang county in land use and carbon storage in plain agricultural regions

| 土地利用类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 邻域权重 | 0.65 | 0.46 | 0.25 | 0.14 | 0.80 | 0.12 |

**表4　平原农区土地利用碳储量研究高唐县各地类碳密度数值**

Table 4　Carbon density values of various land use types in Gaotang county in land use and carbon storage in plain agricultural regions

| 土地利用类型 | 地上生物碳密度/(t/hm²) | 地下生物碳密度/(t/hm²) | 土壤碳密度/(t/hm²) | 死亡碳密度/(t/hm²) |
|---|---|---|---|---|
| 耕地 | 2.42 | 0.46 | 90.58 | 0.24 |
| 林地 | 20.90 | 5.54 | 124.12 | 2.09 |
| 草地 | 0.92 | 4.82 | 97.21 | 0.09 |
| 水域 | 0.50 | 0.10 | 79.07 | 0.05 |
| 建设用地 | 0.00 | 0.00 | 71.18 | 0.00 |
| 未利用地 | 0.50 | 0.10 | 72.74 | 0.05 |

型和碳密度数据，运用Carbon Storage模块估算多情景下碳储量，能够快速、直观地反映耕地与生态用地转换所产生的碳储量变化[13, 14]。PLUS模型能够模拟多情景下土地利用类型的空间变化，但无法评估生态系统功能；而InVEST模型可以计算碳储量，却无法直接预测多情景下各土地利用类型碳储量及其空间分布。因此，耦合PLUS模型与InVEST模型，实现土地利用模拟与生态建设有效协同[3, 8, 15]。

研究中的耦合并非将两种模型进行算法的整合，而是构建了一条串联式的分析链。具体内容如下：基于2009—2023年土地利用数据，引入自然因素、社会经济和区位条件等三类驱动因子，运用PLUS模型模拟2035年五种情景下的土地利用空间格局；再将模拟得到的栅格数据输入InVEST模型的Carbon Storage模块，并结合修正后的高唐县碳密度参数，估算各情景下的碳储量及空间分布。

耦合机制的主要优势分为三个方面。一是功能互补：先运用PLUS模型预测未来的地类空间分布，再运用InVEST模型估算出对应的碳储量，实现情景、空间与效应之间的紧密联系。二是针对平原农区参数的调整：在PLUS模型驱动因子中引入NDVI[27]和土壤质地[28]，提升模拟精度；在InVEST模型中按降水、气温校正碳密度[20, 38]，增强估算结果可靠性。三是能够系统对比耕地保护、城镇发展以及生态保护等情景对碳储量的差异化影响。

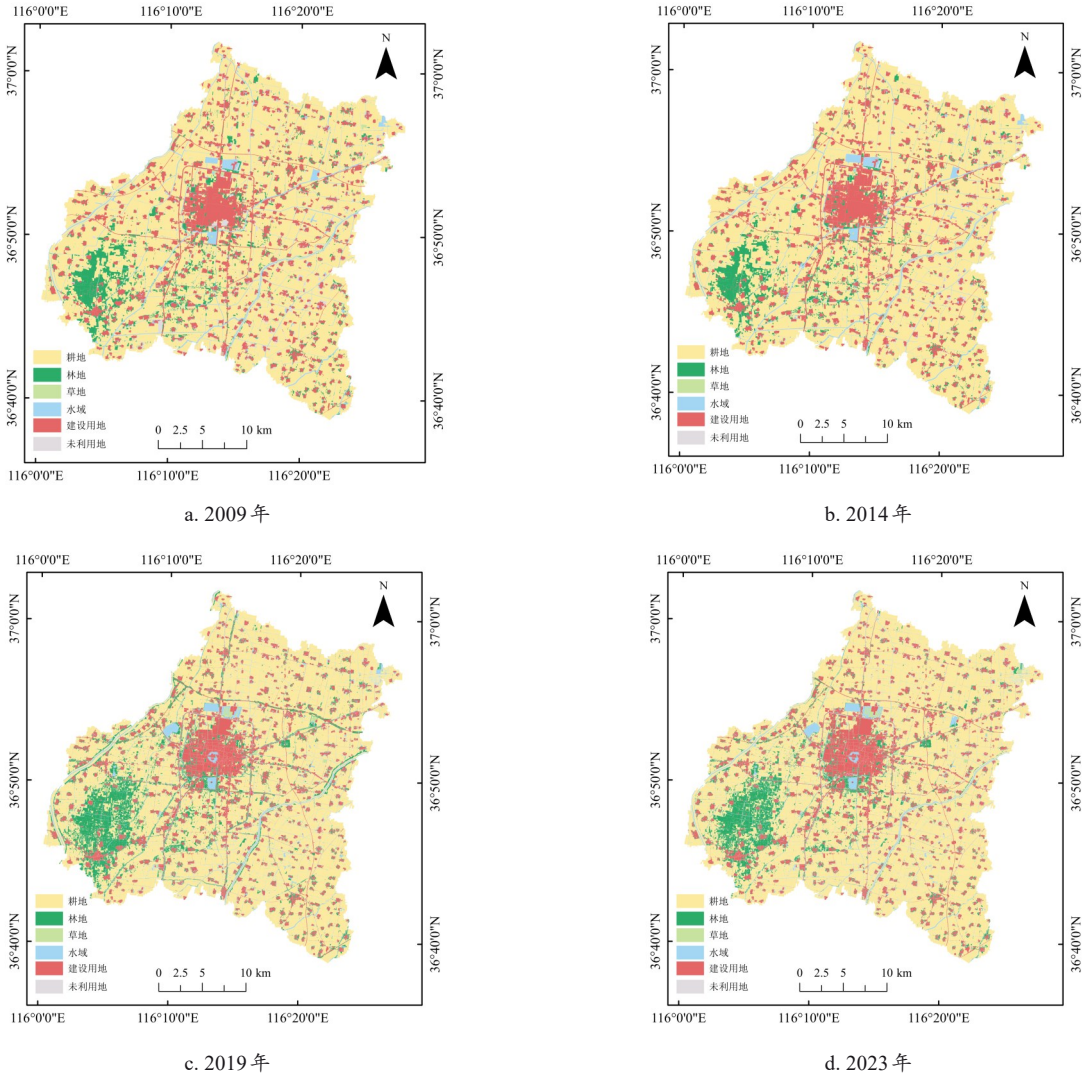
## 3　结果与分析

### 3.1　土地利用时空演变特征和模拟

#### 3.1.1　土地利用时空演变特征

2009—2023年土地利用空间分布如图3所示。整体上，耕地面积呈波动变化，耕地面积减少了3 184.10 hm²；县域中心建设用地面积呈现减少趋

势，减少了109.89 hm²；西南地区林地面积有所增加，增加了1 988.74 hm²，草地面积呈现先减少后增加的趋势，总体增加了约3.13 hm²；水域呈现增加趋势，增加了1 493.63 hm²；未利用地呈现减少趋势，面积减少了191.51 hm²。




a. 2009年　　b. 2014年

c. 2019年　　d. 2023年

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号标准地图制作，底图无修改。

图3 2009—2023年高唐县土地利用空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution patterns of land use in Gaotang county from 2009 to 2023

2009—2014年，城镇化发展迅速，县域中心建设用地面积增大，受“占补平衡”等政策影响，耕地面积增加，未利用地、林地和草地面积均减少。随着耕地和建设用地面积增加，对水资源需求提高，水域面积增加。2014—2019年受退耕还林还草政策影响，耕地面积缩减，西南部林地和草地面积增加。2019—2023年，受耕地保护政策和高标准基本农田建设影响，耕地面积增加，耕地和建设用地发展占用一定面积的林地，西南地区林地面积减少；受生态保护政策影响，县域中部草地和水域面积也稳定增长；部分未利用地经开发利用后面积减少。

综上所述，高唐县土地利用时空变化呈现以下规律：一是政策对土地利用变化的影响，主要表现在2009—2014年的“占补平衡”、2014—2019年的“退耕还林还草”，2019—2023年的耕地保护和高标准基本农田建设等政策分别成为不同阶段的地类变化的主要驱动因素。二是耕地与林地保护之间的动态平衡。2014—2019年耕地减少，林地增加；2019—2023年耕地增加、林地减少，表现了耕地保护与生态保护之间的阶段性冲突。三是建设用地呈现区域特色变化。与城市建设用地持续扩张有所不同，

高唐县建设用地呈现波动变化特征，这与典型平原农业县域以农业发展为主的特征相符，表明城镇化的区域差异性显著。

### 3.1.2　不同情景下土地利用模拟

2035年不同情景下土地利用情况如表5所示。自然发展情景下，受县域人口外流和生态红线管控政策等因素影响，建设用地面积未出现持续扩张的现象，除耕地面积增加外，其余地类面积均减少。在耕地保护情景下，各地类变化趋势与自然发展情景相同，耕地面积为69 116.78 hm$^2$，比例较2023年增加8.23%；林地面积减少最多，面积降幅28.98%。表明只强调耕地保护时，耕地需求量增加，会对林地和草地等生态用地形成挤占效应。而平原农区耕地后备资源有限，因此，补充耕地主要来源于林地。

**表5　2023—2035年高唐县不同情景下的土地利用类型变化及变化率**

Table 5　Changes in land use types and their rates under different scenarios in Gaotang county from 2023 to 2035

| 土地利用类型 | 2023年 | | 2035年 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 自然发展情景 | | | 耕地保护情景 | | |
| | 面积/hm$^2$ | 比例/% | 面积/hm$^2$ | 比例/% | 变化率/% | 面积/hm$^2$ | 比例/% | 变化率/% |
| 耕地 | 63 861.50 | 67.410 | 68 879.78 | 72.710 0 | 7.86 | 69 116.78 | 72.960 0 | 8.23 |
| 林地 | 8 714.40 | 9.200 | 6 244.52 | 6.590 0 | −28.34 | 6 189.14 | 6.530 0 | −28.98 |
| 草地 | 431.92 | 0.460 | 392.07 | 0.410 0 | −9.23 | 397.24 | 0.420 0 | −8.03 |
| 水域 | 6 595.52 | 6.960 | 5 497.65 | 5.800 0 | −16.65 | 5 480.68 | 5.790 0 | −16.90 |
| 建设用地 | 15 133.89 | 15.970 | 13 723.92 | 14.490 0 | −9.32 | 13 553.89 | 14.300 0 | −10.44 |
| 未利用地 | 0.86 | 0.001 | 0.15 | 0.000 2 | −82.56 | 0.36 | 0.000 4 | −58.14 |

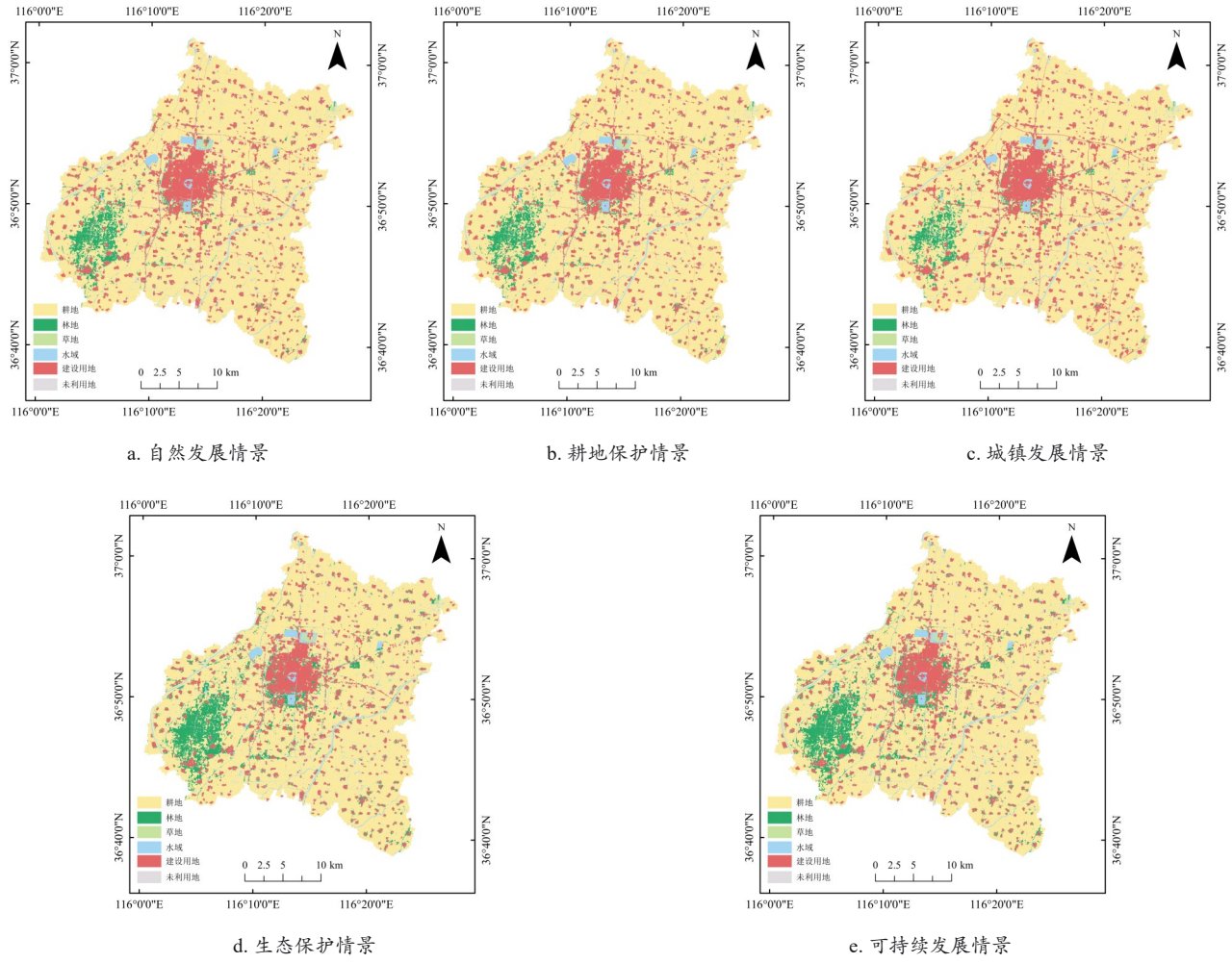
| 土地利用类型 | 2035年 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 城镇发展情景 | | | 生态保护情景 | | | 可持续发展情景 | | |
| | 面积/hm$^2$ | 比例/% | 变化率/% | 面积/hm$^2$ | 比例/% | 变化率/% | 面积/hm$^2$ | 比例/% | 变化率/% |
| 耕地 | 67 459.24 | 71.210 0 | 5.63 | 67 835.20 | 71.600 0 | 6.22 | 68 132.04 | 71.920 0 | 6.69 |
| 林地 | 4 945.24 | 5.220 0 | −43.25 | 9 109.06 | 9.620 0 | 4.53 | 9 056.11 | 9.560 0 | 3.92 |
| 草地 | 309.23 | 0.330 0 | −28.41 | 439.87 | 0.460 0 | 1.84 | 438.36 | 0.460 0 | 1.49 |
| 水域 | 6 058.25 | 6.390 0 | −8.15 | 6 098.25 | 6.440 0 | −7.54 | 6 064.65 | 6.400 0 | −8.05 |
| 建设用地 | 15 965.89 | 16.850 0 | 5.50 | 11 255.62 | 11.880 0 | −25.63 | 11 046.84 | 11.660 0 | −27.01 |
| 未利用地 | 0.24 | 0.000 3 | −72.09 | 0.09 | 0.000 1 | −89.53 | 0.09 | 0.000 1 | −89.53 |

在城镇发展情景下，耕地面积为67 459.24 hm$^2$，建设用地面积为15 965.89 hm$^2$，耕地和建设用地面积较2023年均有所增加，其余地类面积均下降；对比自然发展情景的耕地面积，由于建设用地扩张，耕地面积占比减少，但受耕地保护红线和高标准基本农田政策影响，耕地面积与2023年相比有所增加，对比耕地保护和自然发展情景，增加较少。该情景下，建设用地增幅5.50%，而耕地面积仍较2023年增幅5.63%。然而，林地和草地分别减少了43.25%和28.41%，表明城镇发展受到了耕地保护红线的约束，占用耕地面积较少，而对林地等生态用地的占用面积增加。

生态保护情景下，林地面积为9 109.06 hm$^2$，草地面积为439.87 hm$^2$。耕地、林地和草地较2023年面积均增加，其余地类面积均减少。该情景下林地和草地面积显著增加，但耕地增幅仅为6.22%，低于自然发展情景。表明在粮食安全保障等政策要求下，仅强调生态保护政策的可行性较低，因此，生态保护应与耕地保护政策协同发展。

可持续发展情景下耕地、林地和草地面积较2023年有所增加，未利用地和建设用地大量减少；相较于耕地保护情景，耕地面积小幅增加；林地和草地面积与生态保护情景相差较小。该情景实现了耕地保护与生态保护统筹协调发展，一方面限制了生态用地和耕地向建设用地的转化，另一方面鼓励未利用地开发，加强土地整治和土地复垦，使各地类向耕地和生态用地转化。因此，可持续发展情景有效避免了单一目标政策的局限性，通过动态调整“耕地保护与生态保护”平衡关系，实现二者协同发展。

如图4，2035年高唐县不同情景下各地类分布均呈现较强的空间一致性。耕地集中连片分布，林地主要分布在西南部，建设用地集中分布在县城中心，草地围绕在县城中心附近零星分布，水域分布在县域西北部和东南部，在县城中心也有零星分布。




a. 自然发展情景　b. 耕地保护情景　c. 城镇发展情景

d. 生态保护情景　e. 可持续发展情景

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号标准地图制作，底图无修改。

图4 高唐县2035年不同情景下的土地利用空间格局

Fig.4 Spatial patterns of land use in Gaotang county under different scenarios in 2035

在地类面积和空间集聚程度上，2035年不同情景存在显著差异：自然发展情景延续历史趋势，各地类空间分布变化最小，建设用地未出现明显外扩，呈现“惯性延续”特征。耕地保护情景下耕地主要向县域东北部扩张，林地在西南部收缩。城镇发展情景下县城中心建设用地向外辐射扩张明显，西南部林地破碎化程度增加，呈现“中心集聚、边缘侵占”特征。生态保护情景下西南部林地连片性增强，并向东北方向有所延伸，草地面积略有增加。可持续发展情景下耕地与林地空间分布趋于平衡，县城周边建设用地扩张受到明显限制，西南部林地保持完整，呈现“多目标协同”的空间特征。

## 3.2 碳储量时空演变特征和模拟

### 3.2.1 碳储量时空演变特征

参考相关研究各地类碳密度数据[35]，探明碳储量时空特征。如表6所示，2009—2023年碳储量整体变化不大，碳储量从$8.85\times10^6$ t增加至$8.97\times10^6$ t，总体增加了$1.14\times10^5$ t。因耕地面积减少，碳储量减少$3.00\times10^5$ t，降幅约4.78%。2009—2019年建设用地碳储量变化明显，其中2009—2014年碳储量变化较为平稳，2014—2019年碳储量总体增幅3.56%，2019—2023年趋于平稳，碳储量总体降幅7.03%，草地碳储量变化最小，林地碳储量增幅约44.76%。

**表6　2009—2023年高唐县碳储量变化**

Table 6　Changes in carbon storage in Gaotang county from 2009 to 2023

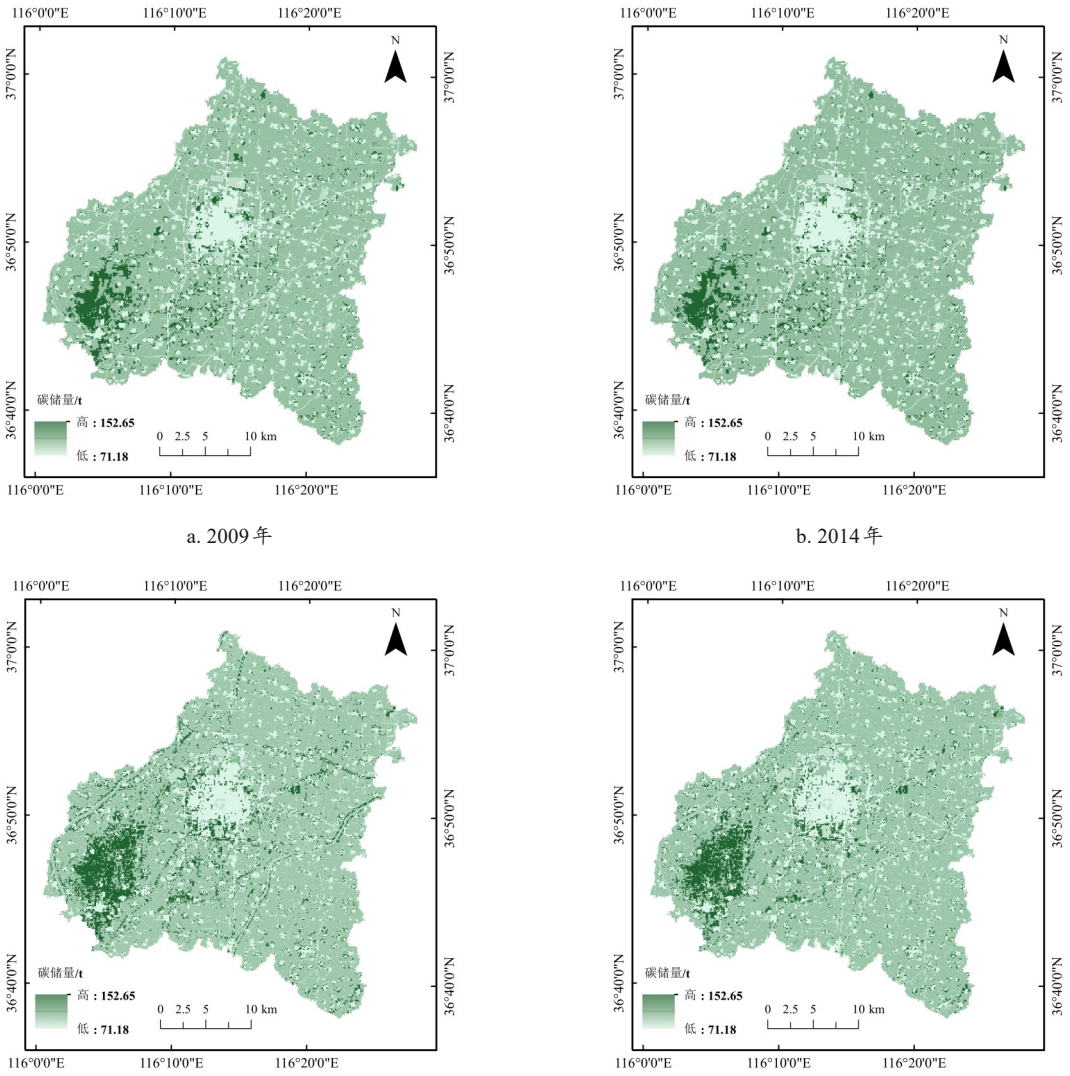
单位：万t

| 土地利用类型 | 2009年 | 2014年 | 2019年 | 2023年 |
|---|---|---|---|---|
| 耕地 | 628.79 | 629.62 | 578.91 | 598.76 |
| 林地 | 92.47 | 84.02 | 171.26 | 133.86 |
| 草地 | 4.23 | 3.62 | 4.34 | 4.41 |
| 水域 | 43.16 | 43.57 | 52.75 | 52.66 |
| 建设用地 | 115.30 | 118.45 | 104.81 | 107.20 |
| 未利用地 | 1.51 | 1.41 | 0.01 | 0.01 |
| 总计 | 885.46 | 880.69 | 912.08 | 896.90 |

如图5所示，碳储量与各地类的空间分布显著相关，整体呈现西南高，东北低的分布特征。县城中心碳储量较低，表明该区域碳储量减少与建设用地扩张占用耕地有关。西南地区林地资源丰富，碳储量最高，碳储量升高与耕地转为林地有关。

碳储量的时空变化本质上是各地类碳密度差异与地类转换共同作用的结果。在碳储量增加方面，2009—2023年碳储量总体增加了$1.14\times10^5$ t，主要源于林地面积增加导致的碳储量的显著提升。林地的平均碳密度为152.55 t/hm$^2$，约为耕地的1.63倍，因此，退耕还林政策有效促进了碳储量的显著增加，反映出生态保护在增强碳汇方面的有效性。

在碳储量损失方面，耕地碳储量减少最多，达$3.00\times10^5$ t，主要与耕地面积减少有关。此外，耕地内部种植结构调整，以及耕地利用方式的改变也




a. 2009年　b. 2014年

c. 2019年　d. 2023年

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号标准地图制作，底图无修改。

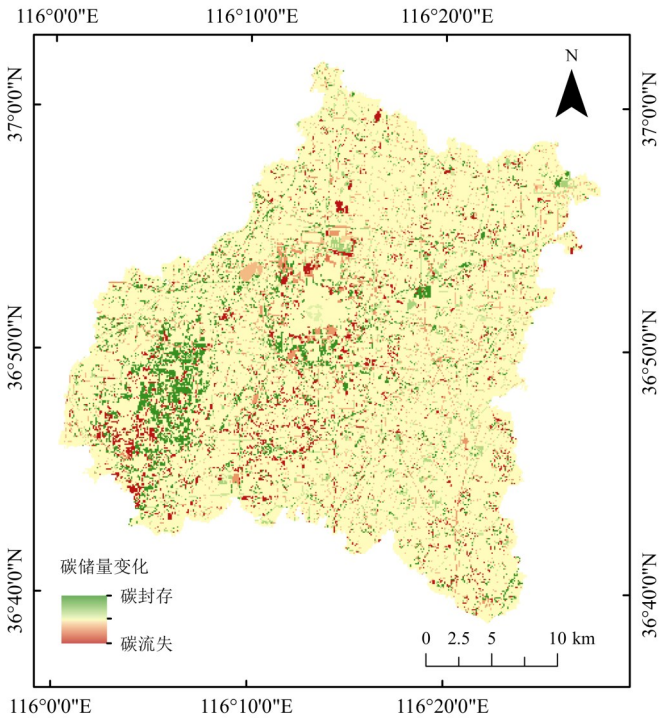
图5　2009—2023年高唐县碳储量分布

Fig.5　Distribution of carbon storage in Gaotang county from 2009 to 2023

会导致土壤有机碳减少，进一步导致了碳储量流失。尽管建设用地面积变化不大，但其扩张占用了碳密度较高的林地和耕地，导致单位面积内的碳储量流失较为明显。

在碳储量空间分布方面，碳储量整体呈现“西南高、东北低”的分布格局，与土地利用空间分布具有高度耦合。西南地区林地资源集中分布，且受历史变化影响较少，土壤有机碳含量较高，形成了碳储量的高值区。县域中心碳储量较低，是建设用地碳密度较低，且建设用地扩张导致土壤碳的流失，因此，形成了碳储量的低值区。

如图6所示，碳储量变化呈现集聚性空间分布特征，在退耕还林政策下，西南地区林地资源增加促进碳储量封存，而县城中心建设用地扩张导致碳储量流失。因此，针对不同区域土地分布和碳储量变化差异制定不同政策，在西南林地应继续加强生态用地监管和保护，严守生态保护红线，中心城镇应优化土地布局，节约集约利用土地，严控建设用地扩张不得超出城镇开发边界，减少地类转换造成的碳流失。




注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号标准地图制作，底图无修改。

图6 2009—2023年高唐县碳储量变化

Fig.6 Carbon storage changes in Gaotang county from 2009 to 2023

### 3.2.2 不同情景下碳储量数量与空间特征

如表7所示，生态保护情景和可持续发展情景下，林地和草地面积增加，碳储量较高；未利用地和建设用地面积较小，碳储量较低。不同情景下水域面积变化幅度不大，碳储量也基本不变。建设用地的碳储量主要来自土壤有机碳。城镇发展情景下总碳储量最低，比2023年减少$3.01\times10^5$ t。其中建设用地碳储量为$1.15\times10^6$ t。该情景下建设用地面积最大，土壤有机碳分解减少，碳储量呈持续积累趋势。

不同情景间碳储量差异揭示了政策导向对碳汇功能的影响：城镇发展情景下总碳储量最低，较2023年减少$3.01\times10^5$ t，主要是由于建设用地扩张占用了碳密度较高的林地和耕地，而新增建设用地的碳密度远低于被占用地类的平均水平。因此，建设用地扩张进一步加剧了单位面积碳储量的流失。

生态保护情景与可持续发展情景的碳储量相近，均显著高于其他情景。两者的区别在于：生态保护情景主要通过限制林地等生态用地向建设用地转化和鼓励退耕还林还草，林地面积增加，提高了碳储量；而可持续发展情景在保护生态的同时，兼

表7 高唐县2035年不同情景下各地类碳储量

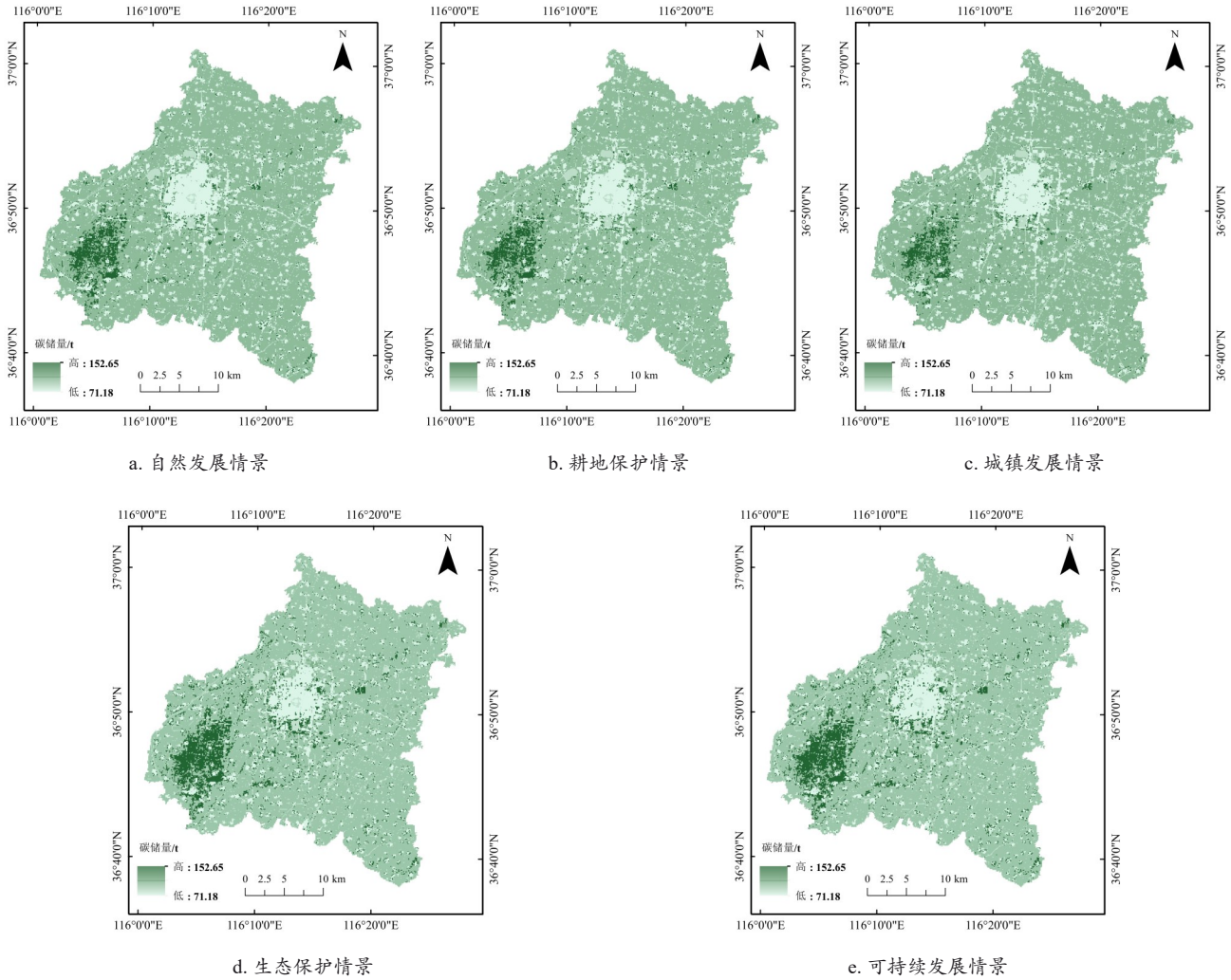
Table 7 Carbon storage of various land types in Gaotang county under different scenarios in 2035

单位：万t

| 土地利用类型 | 自然发展情景 | 耕地保护情景 | 城镇发展情景 | 生态保护情景 | 可持续发展情景 |
|---|---|---|---|---|---|
| 耕地 | 642.650 | 645.360 | 633.750 | 630.160 | 634.520 |
| 林地 | 80.540 | 79.240 | 63.280 | 134.860 | 134.060 |
| 草地 | 4.040 | 4.160 | 3.320 | 4.780 | 4.660 |
| 水域 | 46.810 | 46.290 | 51.240 | 50.010 | 49.030 |
| 建设用地 | 103.090 | 101.520 | 115.220 | 84.250 | 82.160 |
| 未利用地 | 0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 总计 | 877.130 | 876.580 | 866.800 | 904.060 | 904.430 |

顾了耕地面积稳定。从政策可行性角度看，后者更有利于实现粮食安全与生态安全的双重目标。

如图7所示，高唐县碳储量呈中间低，四周高的空间特征。西南地区以林地为主，生态保护情景下林地面积最大，碳储量也最大。耕地保护情景下，耕地种植作物吸收土壤有机碳，以及禁止秸秆焚烧还田，土壤碳减少，耕地整体碳储量偏低；由于中心城镇周边水域面积变化小，不同情景下碳储量变化较小。




a. 自然发展情景　b. 耕地保护情景　c. 城镇发展情景

d. 生态保护情景　e. 可持续发展情景

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号标准地图制作，底图无修改。

图7　高唐县2035年不同情景下碳储量分布

Fig.7　Distribution of carbon storage in Gaotang county under different scenarios in 2035

对比分析各情景碳储量与土地利用变化，可以看出碳储量的损失并不是由建设用地扩张的面积决定的，而是源于被占用土地的碳密度的高低。因此，碳储量研究的重点不应仅控制建设用地总量，更应避免占用碳密度较高的林地和长期耕作的耕地。

综上所述，可持续发展情景能够兼顾耕地保护与生态保护，有效防止单一情景的局限性，能够动态调整耕地保护与生态保护关系，实现二者长期协同。同时防止建设用地过度扩张。应该在城镇开发边界内加强地上地下建设用地开发利用，严守耕地保护红线和生态保护红线。

## 3.3　讨论

### 3.3.1　土地利用变化与碳储量变化

2009—2023年高唐县土地利用与碳储量的演变，本质上是不同发展阶段政策导致土地利用空间变化的结果。研究表明，各地类间的相互转换，尤其是建设用地的扩张，是导致碳储量减少的重要因素[3, 39]，同时，林地、草地等面积减少[36]、土壤化

学成分，以及耕地质量变化[37]，也是碳储量变化的原因。此外，碳储量空间分布与土地利用空间格局密切相关[24]。然而，本研究与现有研究的差异主要体现在以下几个方面：第一，研究区域不同：现有研究多集中于典型城市群和大流域平原，而本研究以典型平原农业县域高唐县为研究区。平原农区地类变化较小，耕地利用效益和布局优化不同是其碳储量区域差异的主要原因，碳储量变化受农业活动影响显著。第二，模型参数设置不同，运用PLUS模型模拟未来土地利用时，相关研究驱动因子多选取DEM、坡度、坡向和社会经济因素作为驱动因子，较少考虑与耕地变化相关的驱动因子，因此，本研究选用NDVI和土壤质地作为驱动因子，能更好地反映植被覆被与土壤养分。不同研究在碳密度参数设置、影像识别精度、PLUS情景设置参数等方面均会存在不同，从而影响研究区之间相互借鉴比较。第三，未来情景模拟时，大多研究只考虑耕地保护、城镇发展和生态保护中的两种，缺少对不同情景的综合考虑，多情景模拟结果揭示了不同政策约束条件下的发展路径，单一情景下政策具有局限性，应注重耕地保护、生态保护与城镇发展的协同发展[19]，本研究以高质量发展为目标导向，充分考虑区域特征与发展政策影响，设置兼顾耕地保护与生态保护的可持续发展情景。

#### 3.3.2 碳储量时空分布影响因素

结果分析多集中于地类变化造成的碳储量变化，未能与实际耕作条件、土壤状况和城镇建设进行结合。第一，建设用地扩张、耕地内部种植结构调整和秸秆还田等均会改变土壤有机碳，从而影响耕地碳储量的变化。第二，中心城镇周围公共设施集中，人类活动强烈，建设用地扩张导致地类变化，直接影响碳储量变化，远离城镇的地区，通过土地整治、合理耕作等措施恢复土地碳汇功能。第三，区域碳储量变化是各影响因素共同作用的结果[37]。不同自然因素通过影响土地空间分布，影响碳储量的空间分异特征，社会经济因素通过土地利用类型的改变间接影响碳储量变化。第四，耕地面积波动变化受耕地保护、生态保护及经济发展建设等政策的影响，不同政策导向对耕地面积的影响具有显著差异。耕地面积变化通常伴随着林地、草地等面积的调整，进而影响区域碳储量的变化。其中，可持续发展情景下各地类面积及碳储量变化幅度均较小，碳汇功能更为稳定，能有效避免单一政策的局限性。

## 4 结论、对策建议与展望

### 4.1 结论

基于上述结果与分析，得出以下主要结论。

1）土地利用类型与碳储量空间分布格局。建设用地面积略有减小，呈现县城较集中，全域零散的分布特征，碳储量较低；草地、林地和水域面积整体呈增加趋势，林地为碳汇的主体，主要分布在西南部；碳储量呈中间低，四周高的空间分布特征，与土地利用类型的分布格局具有较高的相关性。

2）各情景下土地利用与碳储量变化趋势。不同情景下各地类空间分布较稳定。城镇发展情景因建设扩张导致耕地与林地面积下降，碳储量减少；生态保护情景和可持续发展情景下，由于加强生态保护与退耕还林还草，碳储量增加。建设用地扩张是碳储量流失的主要原因，生态修复措施能有效提升碳储量。

3）可持续发展情景可以兼顾耕地保护与生态保护。可持续发展情景能够更好地统筹粮食安全与生态安全，符合高质量发展的战略目标。在政策实施过程中，应认识到只追求经济发展或只注重耕地保护等单一目标政策的局限性，动态调整“耕地保护与生态保护”平衡关系，实现二者协同发展。

### 4.2 对策与建议

依据不同情景模拟结果，针对不同区域碳储量差异提供不同对策建议。第一，林地和草地等生态用地是碳汇的主体，要严守生态保护红线，严禁生态用地的占用，维持生态用地碳储存功能的稳定。第二，优化耕地布局，严守耕地保护红线和粮食安全保障政策，合理进行耕地轮作休耕，精耕细作，加强耕地监管和保护，持续合理利用耕地和增强土壤固碳能力。第三，中心城镇以碳排放为主，固碳能力低，建设用地扩张是导致碳储量减少的主要原因，推进建设用地利用更加集约高效，严格控制因建设用地扩张而造成碳储量的损失，增强城镇发展与碳汇效益的协同性。在未来发展规划中，应以高质量发展和可持续发展为目标导向，注重生态保护与耕地保护协同发展。

### 4.3 不足与展望

在PLUS模型模拟过程中，虽然对参数进行了验证，但土地利用转移成本矩阵等主观因素仍会影

响模拟结果精度，因此，未来应进一步优化和检验转移成本矩阵等参数设置，最大程度减少参数设置的不确定性，提高模拟结果的可靠性。此外，本研究只分析了土地利用类型宏观变化对碳储量的影响，未深入分析土壤有机质变化的影响，未来应进一步融合土壤质量数据，揭示碳储量变化的原因。

**利益冲突声明：**本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献：


[1] 周曙东, 雷会妨, 葛继红, 等. “双碳”背景下中国能源结构转型的碳减排潜力及宏观经济影响[J]. 中国人口・资源与环境, 2024, 34(12): 55-63.
ZHOU S D, LEI H F, GE J H, et al. Carbon emission reduction potential and macroeconomic impact analysis of China's energy structure transition in the context of 'dual carbon' goals[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(12): 55-63.

[2] 刘耀彬, 邓伟凤, 李硕硕, 等. 基于碳汇潜力的碳排放空间关联网络结构特征及影响因素——以长江中游城市群为例[J]. 中国人口・资源与环境, 2024, 34(3): 1-15.
LIU Y B, DENG W F, LI S S, et al. Structural characteristics and influencing factors of carbon emission spatial associa-tion networks based on carbon sink potential: A case study of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(3): 1-15.

[3] WU Q, WANG L, WANG T Y, et al. Spatial-temporal evolution analysis of multi-scenario land use and carbon storage based on PLUS-InVEST model: A case study in Dalian, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112448.

[4] 彭建, 杜悦悦, 刘焱序, 等. 从自然区划、土地变化到景观服务: 发展中的中国综合自然地理学[J]. 地理研究, 2017, 36(10): 1819-1833.
PENG J, DU Y Y, LIU Y X, et al. From natural regionalization, land change to landscape service: The development of integrated physical geography in China[J]. Geographical Research, 2017, 36 (10): 1819-1833.

[5] 邓丽明, 杨骥, 尹小玲, 等. 粤港澳大湾区生态系统服务供需关系及其对城市化多空间尺度的响应[J]. 生态学报, 2024, 44 (20): 9094-9107.
DENG L M, YANG J, YIN X L, et al. Supply and demand of ecosystem services and its multi-spatial scale response to urbanization in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9094-9107.

[6] 于晓燕, 商亚男, 魏光普, 等. 基于PLUS-InVEST模型的国家级稀土矿区土地利用变化与碳储量预测研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56 (6): 153-164.
YU X Y, SHANG Y N, WEI G P, et al. Land use change and prediction of carbon storage in national rare earth mining area based on PLUS-InVEST model[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(6): 153-164.

[7] 李志英, 薛梦柯, 王绍邦, 等. 基于PSR-PLUS模型的昆明市土地生态安全预警研究[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(4): 871-881.
LI Z Y, XUE M K, WANG S B, et al. Early warning of land ecological security in Kunming city based on PSR-PLUS model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(4): 871-881.

[8] 刘康, 张寒, 张道军, 等. 黄土高原生态系统碳储量情景模拟与驱动因素——基于PLUS-InVEST-Geodector模型的研究[J]. 中国环境科学, 2025, 45(4): 2159-2170.
LIU K, ZHANG H, ZHANG D J, et al. Scenario simulation and driving factors of ecosystem carbon storage in the Loess Plateau: A study based on the PLUS-InVEST-Geodector model[J]. China Environmental Science, 2025, 45(4): 2159-2170.

[9] 王瑞利, 张存厚, 王明玖. 基于DNDC模型的赛罕乌拉自然保护区草地生态系统碳动态[J]. 中国草地学报, 2019, 41(4): 167-172.
WANG R L, ZHANG C H, WANG M J. Study on carbon dynamics of grassland ecosystem in saihanwula nature reserve based on DNDC model[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(4): 167-172.

[10] 王建步, 张杰, 马毅, 等. 基于GF-1 WFV的黄河口湿地植被碳储量估算研究[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(1): 604.
WANG J B, ZHANG J, MA Y, et al. Estimation of vegetation carbon storage in the Yellow River Estuary wetland based on GF-1 WFV satellite image[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37 (1): 604.

[11] 李尉尉, 薛志泳, 朱建华, 等. 基于GEE平台多源遥感数据的海南岛红树林碳储量估算[J]. 自然资源遥感, 2025, 37(2): 220-227.
LI W W, XUE Z Y, ZHU J H, et al. Estimating the carbon stocks of mangrove forests in Hainan Island based on multisource remote sensing data and Google Earth Engine[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(2): 220-227.

[12] 闫昊婷, 乔伟峰, 李语旻, 等. 基于生态安全格局的县域生态保护红线优化研究——以常州市金坛区为例[J]. 地理研究, 2024, 43(8): 2141-2157.
YAN H T, QIAO W F, LI Y M, et al. Optimization of county ecological protection red line based on ecological security pattern: A case study of Jintan district, Changzhou city[J]. Geographical Research, 2024, 43(8): 2141-2157.

[13] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065.
LIU Y, ZHANG J, ZHOU D M, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4052-4065.

[14] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 360-373.
ZHANG Y, SHI X Y, TANG Q. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 360-373.

[15] 王伟武, 伏添乐, 陈欢. 基于PLUS-InVEST模型的长三角城市群碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 1937-1950.
WANG W W, FU T L, CHEN H. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in the Yangtze River Delta urban agglomeration based on PLUS-InVEST model[J]. Environmental Science, 2025, 46(4): 1937-1950.

[16] 张雄, 毛星月, 柯珂, 等. 区域土地用途转换的土地资源碳储量研究[J]. 中国人口・资源与环境, 2023, 33(8): 193-202.
ZHANG X, MAO X Y, KE K, et al. Carbon storage of land resources in regional land use conversion[J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(8): 193-202.

[17] 张平平, 李艳红, 殷浩然, 等. 中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1183-1197.
ZHANG P P, LI Y H, YIN H R, et al. Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1183-1197.

[18] GONG W F, DUAN X Y, SUN Y X, et al. Multi-scenario simulation of land use/cover change and carbon storage assessment in

Hainan coastal zone from perspective of free trade port construction[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 385: 135630.

[19] 苏浩东, 任彦芳, 马元旭, 等. 新疆10 m分辨率土地利用/土地覆盖类型数据集(2015、2020年)[J]. 中国科学数据, 2025, 10(3): 168-184.
SU H D, REN Y F, MA Y X, et al. A dataset of land use and land cover types with a spatial resolution of 10 m in Xinjiang in 2015 and 2020[J]. China Scientific Data, 2025, 10(3): 168-184.

[20] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
ZHU W B, ZHANG J J, CUI Y P, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 446-459.

[21] 陈文娇, 翁永玲, 路云阁. 基于多级决策树分类的土地利用与覆盖信息提取[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(9): 63-68, 73.
CHEN W J, WENG Y L, LU Y G. Extraction of land use and land cover information based on multilevel decision tree classification[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(9): 63-68, 73.

[22] 信志红, 王宁, 李峰, 等. 基于Landsat的黄河口地区土地利用类型研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(1): 99-105.
XIN Z H, WANG N, LI F, et al. Study on land use types in the Yellow River estuary based on landsat[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(1): 99-105.

[23] 肖建英, 戴津津, 方昕然, 等. 基于PLUS模型的徐州市生态系统服务价值多情景模拟研究[J]. 中国土地科学, 2024, 38(4): 125-134.
XIAO J Y, DAI J J, FANG X R, et al. Multiple scenario simulation of ecosystem service value in Xuzhou city based on PLUS model[J]. China Land Science, 2024, 38(4): 125-134.

[24] 雷馨, 海新权. 耦合PLUS-InVEST模型的兰州市土地利用变化及碳储量经济价值估算[J]. 地理科学, 2025, 45(2): 339-348.
LEI X, HAI X Q. Assessing economic value of carbon storage and land use changes based on the coupled PLUS-InVEST model in Lanzhou city[J]. Geographical Science, 2025, 45(2): 339-348.

[25] 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 Q Y, LIU R Z, LUAN C X. 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.

[26] XU E Q, ZHANG H Q, YAO L N. An elevation-based stratification model for simulating land use change[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1730.

[27] LIN M, HOU L Z, QI Z M, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation NDVI in China's Mu Us Sandy Land during 2000—2019[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109164.

[28] LI J M, LI S Q, ZHAO R, et al. Soil organic carbon dynamics (2008—2020) across different cultivated land use types in a subtropical region[J]. Geoderma Regional, 2025, 40: e00926.

[29] ZHANG X D, HAN H Y. Characteristics and factors influencing the expansion of urban construction land in China[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 16040.

[30] 周满意, 王承武. 基于PLUS模型的乌鲁木齐市"三生"空间多情景模拟[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 4021-4030.
ZHOU M Y, WANG C W. Multi-scenario simulation of "production-livelihood-ecological" space in Urumqi based on PLUS[J]. China Environmental Science, 2024, 44(7): 4021-4030.

[31] WU A H, WANG Z T. Multi-scenario simulation and carbon storage assessment of land use in a multi-mountainous city[J]. Land Use Policy, 2025, 153(C). DOI: 10.1016/j.landusepol.2025.107529

[32] WANG Z K, LIU X L, ZHANG S P, et al. Multi-scenario land use and carbon storage assessment in the Yellow River Delta under climate change and resource development[J]. Remote Sensing, 2025, 17(9): 1603.

[33] WANG M M, JIANG Z Z, LI T B, et al. Analysis on absolute conflict and relative conflict of land use in Xining metropolitan area under different scenarios in 2030 by PLUS and PFCI[J]. Cities, 2023, 137: 104314.

[34] 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 X M, SHENG Y T, QI H M, 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.

[35] 裴志方, 吴彬, 范玉龙. 丹江口库区土地利用多情景模拟及其生态环境效应[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(10): 2264-2273.
PEI Z F, WU B, FAN Y L. Multi-scenario simulation of land use and ecological-environmental effects in the Danjiangkou Reservoir area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(10): 2264-2273.

[36] 张爽, 高启晨, 张戎, 等. 基于PLUS-InVEST模型碳储量时空演变及驱动因素分析——以纳帕海流域为例[J]. 中国环境科学, 2024, 44(9): 5192-5201.
ZHANG S, GAO Q C, ZHANG R, et al. Evaluating the changes and driving factors of carbon storage using the PLUS-InVEST Model: A case study of Napa Sea Basin[J]. China Environmental Science, 2024, 44(9): 5192-5201.

[37] 张龙江, 陈国平, 林伊琳, 等. 基于MOP-PLUS-InVEST模型的碳储量多情景模拟及驱动机制分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 223-233, 封3.
ZHANG L J, CHEN G P, LIN Y L, et al. Simulating multiple scenarios of carbon stocks for driving mechanisms using MOP-PLUS-InVest model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(22): 223-233, 封3.

[38] 朱志强, 马晓双, 胡洪. 基于耦合FLUS-InVEST模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 222-229, 239.
ZHU Z Q, MA X S, HU H. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou city by coupling FLUS-InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 222-229, 239.

[39] 范强, 孙虎虎, 孙爽, 等. 生态-耕地保护下的山东省碳储量估算与演变[J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1588-1598.
FAN Q, SUN H H, SUN S, et al. Estimation and evolutionary analysis of carbon stocks in Shandong province under the ecological-cultivated land protection scenario[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1588-1598.

# Multi-Scenario Simulation of Land Use and Spatiotemporal Evolution of Carbon Storage in Plain Agricultural Region Based on The Coupled PLUS-InVEST Model

WANG Gaocheng[1], LIU Jian[1], LI Shasha[1], ZHANG Tingting[1], WANG Ailing[1,2*]

（1. *Shandong Agricultural University*, *College of Resources and Environment*, *Taian* 271018, *China*;
2. *National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources*, *Taian* 271018, *China*）

**Abstract: [Objective]** Carbon storage is a key indicator for measuring ecosystem functionality, with significant differences in carbon sequestration capacity among various land use types. Changes in land use directly lead to variations in terrestrial ecosystem carbon storage. Therefore, an in-depth analysis and prediction of the spatiotemporal distribution patterns of land use change and carbon storage can provide a scientific basis for achieving carbon sequestration targets and optimizing land use structures. **[Methods]** Taking Gaotang county, a typical plain agricultural county in Shandong province as the study area, based on land use types extracted from remote sensing data from 2009 to 2023, the spatiotemporal evolution patterns of land use were first analyzed. The InVEST model was then employed to estimate carbon storage and identify the spatial distribution patterns of carbon storage across different land categories. Driving factors were selected from the perspectives of natural conditions, socio-economic development, and locational conditions. Five scenarios: natural development, cultivated land protection, urban development, ecological protection, and sustainable development, were established. A coupled PLUS-InVEST framework was constructed. First, the PLUS model was used to simulate land use patterns under five scenarios for 2035. Then, the simulated land use maps were input into the InVEST model to estimate carbon storage and to compare changes across different scenarios. This coupling enables an integrated analysis linking policy scenarios, spatial land use patterns, and carbon storage responses. **[Results and Discussions]** From 2009 to 2023, significant changes occurred in land use types, with the most notable transformation being the conversion from cultivated land to forest land. Overall, cultivated land area fluctuated and decreased by 3 184.10 $hm^2$; forest land in the southwestern region increased by 1 988.74 $hm^2$; and construction land in the county center decreased by 109.89 $hm^2$. Total carbon storage increased by $1.14\times10^5$ t. Carbon storage was significantly correlated with the spatial distribution of various land types, exhibiting a pattern of higher values in the southwest and lower values in the northeast. Carbon storage in the county center was relatively low, while the southwestern region, rich in forest land resources, had the highest carbon storage. Under the natural development scenario, all land use types except cultivated land showed a decrease in area. Under the cultivated land protection scenario, cultivated land area reached 69 116.78 $hm^2$, an increase of 8.23% compared to 2023, while forest land experienced the largest decrease. Under the urban development scenario, both cultivated land and construction land increased, whereas all other land types decreased. Under the ecological protection scenario, cultivated land, forest land, and grassland increased, while all other land types decreased. Under the sustainable development scenario, cultivated land area was slightly smaller than that under the cultivated land protection scenario, while forest land and grassland areas were similar to those under the ecological protection scenario. The spatial distribution characteristics of carbon storage were similar across all scenarios, consistently showing a pattern of lower values in the central area and higher values in the surrounding areas. Under the urban development scenario, total carbon storage was the lowest among all scenarios, decreasing by $3.01\times10^5$ t compared with the 2023 level. **[Conclusions]** This research reveals that construction land expansion is the main cause of carbon storage loss, while ecological restoration measures can effectively increase carbon storage. The spatial distribution of different land categories remains relatively stable across scenarios, with carbon storage exhibiting a pattern of lower values in the central urban area and higher values on the periphery. Strategies pursuing only economic development or focusing solely on cultivated land protection have inherent limitations. The sustainable development scenario can better balance cultivated land protection and ecological conservation, dynamically adjust the relationship between the two, and achieve their long-term coordinated development. This research could provide a reference for achieving carbon peak, carbon neutrality, and sustainable development goals in plain agricultural regions.

**Keywords:** land use; carbon storage; PLUS-InVEST coupled model; multi-scenario simulation; spatiotemporal evolution; plain agricultural region

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021MD018, ZR2025QC396)

**First author:** WANG Gaocheng, E-mail: Wanggc9804@163.com
***Corresponding author:** WANG Ailing, E-mail: ailingwang@sdau.edu.cn