

基于InVEST模型的阿拉尔市碳储量时空演变分析

闫 召, 刘鹏源, 石文鑫, 崔佳奇, 方 刚*

宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2026年6月1日; 录用日期: 2026年7月7日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

针对多维度土地利用变化对生态系统碳储量的影响, 论文基于2008~2023年新疆阿拉尔市土地利用数据, 利用InVEST模型估算碳储量与分析其空间分布特征和土地利用变化对碳储量变化的影响。结果表明: 新疆阿拉尔市土地利用类型以未利用土地(占比47.73%)和耕地(占比36.49%)为主; 近15年来, 新疆阿拉尔市碳储量整体呈现上升后小幅下降趋势, 共增加了12.81%, 耕地、未利用土地和林地转化是新疆阿拉尔市碳储量时空演变的主要贡献者。林地面积增加是推动区域碳储量提升的关键驱动因子, 地形位指数0.61~0.63区间为新疆阿拉尔市碳固定潜力高值区。研究结果可为干旱区土地利用空间优化及碳汇功能管理提供科学支撑。

关键词

时空变化, 地形梯度, InVEST, 碳储量, 阿拉尔市

Spatiotemporal Evolution Analysis of Carbon Storage in Alaer City Based on the InVEST Model

Zhao Yan, Pengyuan Liu, Wenxin Shi, Jiaqi Cui, Gang Fang*

School of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: June 1, 2026; accepted: July 7, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

This study investigates the impact of multidimensional land use changes on ecosystem carbon

*通讯作者。

文章引用: 闫召, 刘鹏源, 石文鑫, 崔佳奇, 方刚. 基于 InVEST 模型的阿拉尔市碳储量时空演变分析[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(7): 1298-1310. DOI: 10.12677/aep.2026.167130

storage by analyzing land use data from Alaer City, Xinjiang, spanning 2008~2023. Using the InVEST model, it estimates carbon storage and its spatial distribution characteristics, and examines how land use changes affect carbon storage dynamics. Results show that land use in Alaer City is dominated by unused land (47.73%) and cropland (36.49%). Over the past 15 years, total carbon storage has generally increased first and then slightly declined, with a net increase of 12.81%. The transformation among cropland, unused land, and forestland has been the primary driver of spatiotemporal changes in carbon storage. Expansion of forest areas is the key factor driving regional carbon storage increases, while areas with terrain position indices between 0.61 and 0.63 exhibit high carbon sequestration potential. These findings provide scientific support for optimizing land use patterns and managing carbon sink functions in arid regions.

Keywords

Spatiotemporal Variation, Terrain Gradient, InVEST, Carbon Storage, Alaer City

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球社会经济快速发展进程中，能源消耗引发的二氧化碳等温室气体过量排放，已对陆地生态系统碳循环与碳平衡过程造成显著扰动[1]。因此，修复生态系统碳循环过程、维持碳平衡状态、缓解气候变化带来的生态效应，已成为全球生态环境领域共同研究议题。碳储存是植被与土壤吸收大气中 CO₂ 等温室气体，提升碳汇、削减碳排放的关键生态过程[2]，其对区域气候调节、碳平衡维持具有不可替代的核心作用[3]。

目前，区域碳储量评估方法主要分为生物量估算法[4]-[6]、遥感反演法[7] [8]与模型模拟法[9]三类。生物量估算法主要通过剖面分析[10]、实验样地调查或实地采样数据构建回归模型开展碳储量估算，该方法操作简便且估算精度较高，但依赖大量野外实测数据支撑，在干旱荒漠区难以全面开展。同时在高海拔、地形复杂区域，数据获取难度大，难以精准反映区域碳储量的时空动态变化特征，限制了该方法的推广应用。遥感反演法依托实地实测数据与遥感影像，通过逐步回归[11]、模型构建[12]等技术手段，模拟碳储量的空间分布特征，该方法无需开展大范围资源清查工作，但估算结果易受输入参数误差、遥感影像质量、实验样地代表性选取等因素影响。InVEST 模型模拟法虽估算精度略低于生物量估算法，但具备操作简便、输出结果直观、空间可视化效果佳等优势，已成为区域碳储量时空演变研究的主流方法[13]。InVEST 模型揭示土地利用变化是碳储量时空分异的主导因素，证实耕地、林地、未利用地转换会显著改变生态系统碳库规模。学者们更倾向于分析碳储量水平尺度上的变化。因此，本研究对干旱区绿洲碳储量在不同地形梯度下土地利用变化对生态系统碳储量的影响机制，揭示土地利用与地形耦合作用下的碳储量演变规律。

本研究以新疆阿拉尔市为研究区，基于 2008~2023 年土地利用数据，采用 InVEST 碳储存模型定量估算碳储量及分析其时空分布特征，并结合地形位指数揭示碳储量的地形梯度特征，阐明土地利用变化对碳储量的影响机制。研究结果可为干旱区土地利用格局优化、生态修复与碳汇功能提升提供科学依据，助力区域“双碳”目标实现。

2. 研究区概况

新疆阿拉尔市地处中国西北边陲，地理坐标介于 40°22'N~40°57'N、80°30'E~81°58'E 之间，平均海拔

约 1100 m, 属典型干旱气候区。该区域地理位置独特, 自然资源禀赋良好, 生态系统类型丰富且空间分异特征显著, 耕地、林地、草地等生态系统交错分布, 形成复杂的景观格局。上述生态系统不仅为区域社会经济发展提供重要的自然资源支撑, 还是维系区域生态平衡的核心功能载体; 且区域内植被与土壤碳储量较高, 对全球气候变化的响应与调控具有重要意义。阿拉尔市的地理区位与生态系统特征使其成为干旱区碳循环机制研究的典型样区, 以该区域为研究对象开展专项研究, 可明晰全球气候变化背景下干旱区生态系统的演变规律, 揭示其对全球碳循环过程的反馈效应。

3. 数据来源与研究方法

3.1. 数据来源

本研究以美国地质调查局(USGS)共享的 Landsat 系列影像为基础数据, 分析研究区碳储量时空动态; 数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云平台; 土壤属性数据来源于《1:100 万世界土壤数据库的中国土壤数据集》¹; 矢量文件是基于国家地理信息公共服务平台(天地图)下载的审图号为: GS(2024)0650 号, 底图无修改。

3.2. InVEST 模型碳储量评估

本研究采用 InVEST 模型的碳储存与封存模块, 对不同土地覆盖情景下生态系统碳储存服务功能开展空间模拟与可视化表达, 该模块中区域总碳储量通过各类土地利用类型的 4 个碳库碳密度分别与对应面积相乘后求和得到[14], 计算公式如公式(1)和(2)所示:

$$C_i = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (1)$$

$$C_{it} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (2)$$

式(1)和(2)中: C_i 为第 i 类土地利用类型的综合碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), C_{above} 为地上有机物碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), C_{below} 为地下有机物碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), C_{soil} 为土壤有机物碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), C_{dead} 为死亡有机物碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), C_{it} 为研究区总碳储量(t), S_i 为第 i 类土地利用类型的面积(hm^2), n 为土地利用类型数量, 本次研究中 $n = 6$ 。

3.3. 碳密度计算

研究区碳密度计算所需的土壤属性、生物量等基础数据来源于《1:100 万世界土壤数据库的中国土壤数据集》, 并通过公式(3)计算得到土壤表层碳密度[15] [16]。计算公式如公式(3)所示:

$$C_{soil} = \text{TOC} \times \gamma \times H \times 10^{-1} \quad (3)$$

式(3)中: C_{soil} 为土壤碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), TOC 为土壤有机碳含量($\text{t}\cdot\text{t}^{-1}$), γ 为土壤平均容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), H 为各土种平均表层厚度(m), 地上、地下有机物碳密度采用生物量转换因子法计算[15], 计算公式如公式(4)和(5)所示:

$$C_{above} = a \times \text{AGB} \quad (4)$$

$$C_{below} = a \times \text{BGB} \quad (5)$$

式(4)和(5)中: C_{above} 为地上植物碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), AGB 为地上生物量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), a 为碳转换系数, C_{below} 为地下植物碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), BGB 为地下生物量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) [16]。并结合《1:100 万世界土壤数据库的中国土壤数据集》、塔里木河流域生态系统碳储量分析成果[17]及 InVEST 模型支持的 2000~2020 年新疆伊犁地区碳储量分布数据集[18]。综合确定新疆阿拉尔市不同土地利用类型的碳密度参数, 结果如表 1 所示。

¹<https://data.tpdc.ac.cn/en/data/611f7d50-b419-4d14-b4dd-4a944b141175>

Table 1. Carbon density of different land uses in Alaer City, Xinjiang ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

表 1. 新疆阿拉尔市不同土地利用碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

序号	土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
1	耕地	3.47	4.12	86.22	1.24
2	林地	36.97	10.91	121.35	2.48
3	草地	0.58	5.13	85.02	0.22
4	水域	0.76	0.54	0	0
5	建设用地	1.88	1.74	0	0
6	未利用土地	0.54	1.04	43.39	0

3.4. 地形数据处理

地形位指数是综合表征研究区栅格单元高程与坡度的复合指标，可反映地形条件对区域景观空间格局的综合影响，该指数与高程、坡度呈正相关，可通过其数值特征反映研究区地形分异特征。新疆阿拉尔市地形以沙漠、丘陵及山地为主，基于区域高程、坡度数据计算地形位指数[19]，以揭示不同地形单元的指数空间分异特征，计算公式如公式(6)所示：

$$T_i = \ln \left[\left(\frac{E_i}{E_0} + 1 \right) \times \left(\frac{S_i}{S_0} + 1 \right) \right] \quad (6)$$

式(6)中： i 为栅格单元索引号， T_i 为第*i*个栅格单元的地形位指数， E_i 为第*i*个栅格单元的高程值， E_0 为研究区平均高程值， S_i 为第*i*个栅格单元的坡度值， S_0 为研究区平均坡度值[19]。采用分位数法[20]将高程、坡度、地形位指数各划分为5级。按数值由低到高依次命名为1~5级，分级标准如表2所示。

Table 2. Classification standards for elevation, slope, and topographic position index in Alaer City

表 2. 阿拉尔市高程、坡度、地形位指数分级标准

级别	高程/m	坡度/(°)	地形位指数
1	941~969	<18	0.29~0.31
2	969~997	18~36	0.31~0.61
3	997~1025	36~54	0.61
4	1025~1053	54~72	0.61
5	1053~1084	72~89	0.61~0.63

3.5. 主成分分析融合法

本研究采用光谱锐化技术将全色波段与多光谱波段进行融合，将遥感影像分辨率由30 m提升至15 m。由图1可知，经影像融合后的空间分辨率与解译精度显著提升，地物光谱与空间特征更加清晰，有效提升了地物信息提取的效率与准确性。

主成分分析(PCA)可在提升影像分辨率的同时保留光谱特征，在多波段融合中效果更优，本研究因此选用该方法进行多光谱影像的融合，融合计算公式如公式(7)所示：

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i S_i \quad (7)$$

式(7)中： F 为波段融合后的影像； S_i 为第*i*幅待融合的源影像； ω_i 为第*i*幅源影像的加权系数。

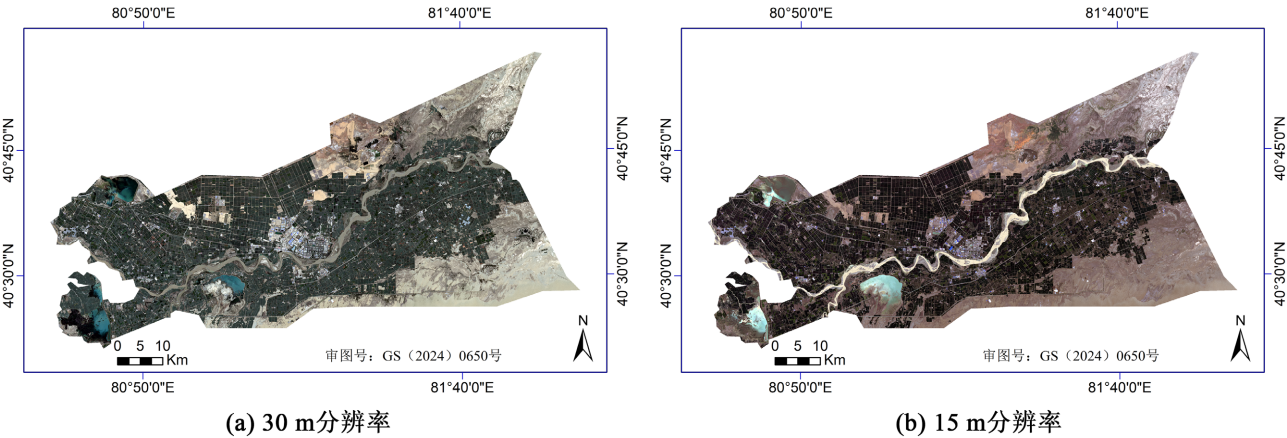


Figure 1. Visualization from 30 m resolution to 15 m resolution
图 1. 由 30 m 分辨率到 15 m 分辨率效果图

加权系数的取值直接决定融合方法的类型，典型方法包括像素平均法、像素极值法及区域能量加权平均法等，本研究通过主成分分析法确定各源影像的加权系数 ω_i 。

3.6. 监督分类方法

监督分类是遥感解译的核心技术之一，可实现未知像元的类别判定。本研究对支持向量机、二进制编码、马氏距离、平行六面体、神经网络、最大似然及最小距离法共 7 种经典监督分类算法进行精度对比。经综合性能评估，支持向量机(SVM)分类精度最优，故选定为研究区土地利用/覆盖分类的方法。该方法通过在高维特征空间构建最优分离超平面，可高效处理高维遥感数据并解决非线性不可分问题，在复杂地形与异质景观区域的遥感影像分类中具有显著优势，分类精度更高与稳定性更好。因此，采用支持向量机算法完成监督分类。不同算法分类精度对比如图 2 所示。

4. 结果与分析

4.1. 土地利用分析

由表 3 及表 4 可知，新疆阿拉尔市土地利用类型以未利用土地为主导类型，2023 年其面积占比为 47.73%，说明新疆阿拉尔市土地开发潜力较大，未利用土地向耕地、林地等生产与生态用地科学转化，是格局优化的重要方向。耕地为新疆阿拉尔市第二大土地利用类型，2023 年占比为 36.49%，空间上主要集中于研究区西北部及中东部区域；研究期内耕地面积呈阶段性波动特征，增长了 1.61%。水域空间分布集中于阿克苏水库、喀什河水库、阿拉尔水库及塔里木河流域，2023 年面积占比为 4.68%，研究期内减少了 14.37%。2023 年草地面积占比为 1.98%且呈空间分布破碎化特征显著，2008~2013 年草地保护成效显著，利用方式较为合理，未大规模退化，面积增长了 192.88%；2013 年后草地面积骤减了 18.77%，主要由过度放牧、土地开发等人类活动导致，草地生态保护需重点关注。建设用地呈持续扩张态势，2008~2023 年面积增幅达 442.26%，其扩张趋势与区域社会经济发展进程高度契合。

土地利用转移矩阵分析结果表明，新疆阿拉尔市耕地、林地与未利用土地间的类型转换最为频繁，建设用地与水域的转换强度相对较低。从转出特征来看，耕地、林地、草地及未利用土地均存在向建设用地转化的趋势，这一特征反映出城市化进程中土地资源向建设用地集聚的空间配置规律。从转入特征来看，水域的转入来源主要为耕地、草地及未利用土地，耕地的增量主要由林地与未利用土地转化而来，建设用地的新增面积则主要来源于未利用土地的类型转换。近年来，受区域经济增长与城市化进程加速

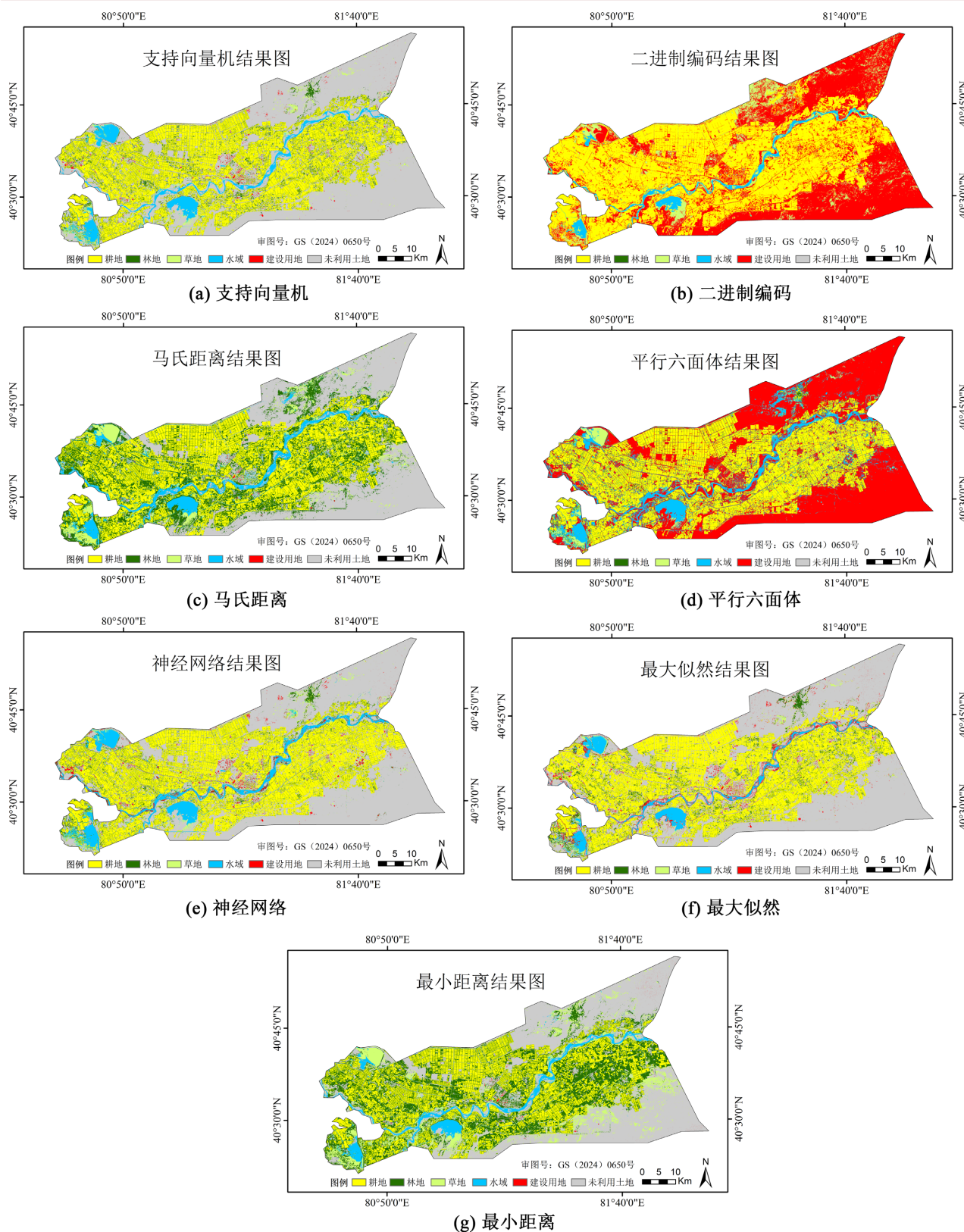


Figure 2. Comparison chart of different supervised classification methods
图 2. 不同监督分类方法对比图

Table 3. Changes in land use types in Alaer City, Xinjiang from 2008 to 2023 (/hm²)
表 3. 新疆阿拉尔市 2008~2023 年土地利用类型变化(/hm²)

土地利用类型	2008	2013	2018	2023
耕地	141118.85	134251.65	140415.73	143397.02
林地	11070.68	33449.00	40947.86	33658.27
草地	3267.32	9569.23	8601.37	7772.76
水域	21476.48	19745.19	20125.89	18391.03
建设用地	400.32	2637.02	1193.92	2170.76
未利用土地	215596.46	193278.02	181645.34	187540.27

Table 4. Land use conversion matrix of Alaer City, Xinjiang from 2008 to 2023 (/hm²)
表 4. 2008~2023 年新疆阿拉尔市土地利用转换矩阵(/hm²)

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	2023 年总计
耕地	103940.57	3396.26	974.90	1122.12	37.24	33925.93	143397.02
林地	18580.75	1992.87	251.26	567.52	12.67	12253.21	33658.27
草地	380.88	1586.14	334.33	1971.27	2.34	3497.81	7772.76
水域	608.94	324.52	52.67	13,125.17	2.30	4277.43	18391.03
建设用地	683.62	33.89	2.21	14.33	124.94	1311.77	2170.76
未利用土地	16924.10	3737.00	1651.95	4676.06	220.84	160330.32	187540.27
2008 年总计	141118.85	11070.68	3267.32	21476.48	400.32	215596.46	——
变化	2278.17	22587.59	4505.45	-3085.45	1770.44	-28056.20	——

驱动，城市建设、工业发展及农村居民点扩张引致建设用地需求持续增加，推动耕地、林地等土地类型向城镇村及工矿用地转化，促使建设用地面积稳步增长。为应对土地利用转型带来的生态与生产问题，阿拉尔市已实施土地流转推进、现代农业发展、土地整治强化等调控措施，在提升区域土地利用效率、保障粮食生产安全方面发挥了积极作用。

新疆阿拉尔市耕地资源禀赋较好，种植结构以棉花、葡萄、枣类、瓜类、花生及牧草等为主，依托农业技术进步与产业结构优化调整，耕地利用效率得到显著提升；但部分区域耕地开发利用仍受耕地质量偏低、淡水资源短缺等因素制约。阿拉尔市淡水资源时空分布不均，结构性缺水问题突出，农业用水供需矛盾显著，已成为制约区域农业生产可持续发展的核心瓶颈。2008~2013 年，阿拉尔市草地保护相关举措落地见效，草地开发利用方式趋于合理，未出现大规模开垦或退化现象，成为该时期草地面积增长的重要原因，但 2013~2023 年草地面积骤减了 18.77%，草地生态保护需重点关注。

4.2. 碳储量分析

土地利用转换对碳储量的影响体现在两个维度：一是地类变更直接改变植被与土壤固碳潜力；二是土地管理调控碳收支速率，影响碳循环过程。土地利用类型的不合理转换易引发碳源与碳汇的相互转化，进而导致区域碳储量发生显著波动。

阿拉尔市碳储量空间分布与地形位指数呈现显著关联，碳储量主要集中在地形位指数 3~5 级区域，该区域广泛分布耕地、林地及未利用土地，是区域固碳核心区；而地形位指数 1~2 级区域碳固定能力较

弱，碳储量占比偏低。由表 5 可知，时间序列分析结果显示区域总碳储量呈现先上升后小幅下降的变化趋势，2008 年、2013 年、2018 年和 2023 年各年份总碳储量分别为： $253.34 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $280.91 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $293.54 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $285.79 \times 10^5 \text{ t}$ 。15 年间，阿拉尔市总碳储量净增 $32.45 \times 10^5 \text{ t}$ ，整体呈现阶段性波动特征。

Table 5. Carbon storage in Alaer City, Xinjiang from 2008 to 2023 (t)
表 5. 新疆阿拉尔市 2008~2023 年碳储量(t)

	2008	2013	2018	2023
耕地	134.13×10^5	127.60×10^5	133.44×10^5	136.29×10^5
林地	19.01×10^5	57.43×10^5	70.31×10^5	57.80×10^5
草地	2.97×10^5	8.70×10^5	7.82×10^5	7.07×10^5
水域	0.28×10^5	0.26×10^5	0.26×10^5	0.24×10^5
建设用地	0.01×10^5	0.02×10^5	0.04×10^5	0.08×10^5
未利用土地	96.94×10^5	86.90×10^5	81.67×10^5	84.31×10^5

受干旱荒漠气候影响，阿拉尔市气候干燥少雨、蒸发强烈，植被覆盖度较低，土壤有机碳含量偏少，导致区域整体碳储量水平相对较低。不同土地利用类型对总碳储量的贡献度存在显著差异：耕地与林地作为核心贡献类型，二者碳储量合计占总碳储量的 67.73%；未利用土地虽碳密度较低，但因面积占比优势，碳储量占比为 29.42%，成为区域碳储量的重要组成部分。研究区不同土地利用类型对总碳储量的贡献度排序为：耕地 > 未利用土地 > 林地 > 草地 > 水域 > 建设用地。

4.3. 土地利用对碳储量影响

2008~2023 年，阿拉尔市退耕还林等生态保护政策的实施，有效推动耕地向林地、草地转化，林地碳储量净增 $38.79 \times 10^5 \text{ t}$ ，草地碳储量净增 $4.10 \times 10^5 \text{ t}$ ；未利用土地的科学开发与整理促进其向耕地转化，耕地碳储量净增 $2.16 \times 10^5 \text{ t}$ 。土地利用转型成为阿拉尔市碳储量提升的重要驱动因素，2008~2023 年不同土地利用类型碳储量占比如图 3 所示。

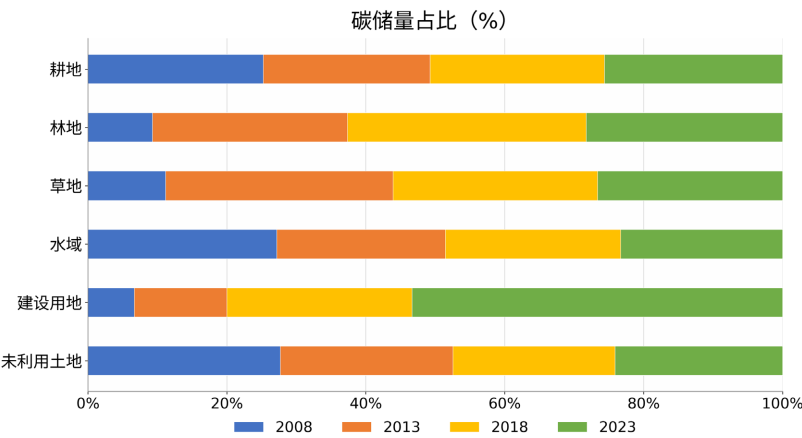


Figure 3. Proportion of carbon storage in Alaer City, Xinjiang from 2008 to 2023
图 3. 新疆阿拉尔市 2008~2023 年碳储量占比

由表 6 可知，不同土地利用类型转换对碳储量的影响存在显著差异，可划分为碳增汇型与碳流失型两类转换模式：碳增汇型转换主要包括水域向耕地、林地、草地、未利用土地转化，耕地向林地转化，草

地向耕地及林地转化，建设用地向耕地、林地、草地及未利用土地转化为代表，此类转换可优化植被覆盖与土壤碳库，提升区域固碳能力；碳流失型转换则以耕地向草地、水域、建设用地及未利用土地转化，林地向耕地、草地、水域、建设用地及未利用土地转化为代表，这类转换易破坏植被与土壤碳库的稳定性，导致碳储量减少，2008~2023 年碳储量分布如图 4 所示。

未利用土地向耕地转化可显著提升土壤碳储量，是研究区碳储量增加的核心转换类型；而林地、草地向未利用土地转化会造成土壤碳储量大幅流失，其中草地向未利用土地转化是区域碳储量减少的主要诱因。此外，水域与建设用地之间的类型转换因面积占比小、碳密度低，对区域总碳储量的影响微弱。

Table 6. Changes in carbon storage caused by land use changes from 2008 to 2023 ($/10^4$ t)
表 6. 2008~2023 年土地利用变化引起碳储量变化($/10^4$ t)

转换类型	地上生物量 碳储量	地下生物量 碳储量	土壤碳储量	死亡有机物 碳储量	总碳储量
耕地→林地	62.2370	12.6215	65.2771	2.3040	142.4396
耕地→草地	-0.1099	0.0385	-0.0456	-0.0388	-0.1559
耕地→水域	-0.1648	-0.2178	-5.2500	-0.0755	-5.7081
耕地→建设用地	-0.1085	-0.1630	-5.8938	-0.0848	-6.2501
耕地→未利用土地	-4.9548	-5.2193	-72.4834	-2.0985	-84.756
小计	56.8990	7.0599	-18.3957	0.0063	45.5695
林地→耕地	-11.3761	-2.3070	-11.9318	-0.4211	-26.0361
林地→草地	-5.7707	-0.9170	-5.7624	-0.3585	-12.8085
林地→水域	-1.1748	-0.3365	-3.9379	-0.0805	-5.5297
林地→建设用地	-0.1189	-0.0311	-0.4112	-0.0084	-0.5696
林地→未利用土地	-13.6115	-3.6910	-29.1343	-0.9268	-47.3636
小计	-32.0520	-7.2827	-51.1776	-1.7953	-92.3075
草地→耕地	0.2814	-0.0986	0.1168	0.0994	0.3991
草地→林地	0.9141	0.1453	0.9128	0.0568	2.0290
草地→水域	0.0010	-0.0242	0.4478	-0.0012	-0.4722
草地→建设用地	0.0003	0.0007	0.0187	0.0000	-0.0193
草地→未利用土地	-0.0068	-0.6766	-6.8773	-0.0363	-7.5970
小计	1.1900	-0.6548	-6.3142	0.1187	-5.6603
水域→耕地	0.3036	0.4014	9.6740	0.1391	10.5181
水域→林地	2.0543	0.5885	6.8858	0.1407	9.6693
水域→草地	-0.0357	0.9046	16.7589	0.0434	17.6712
水域→建设用地	0.0016	0.0017	0.0000	0.0000	0.0033
水域→未利用土地	-0.1038	0.2307	20.2855	0.0000	20.4124
小计	2.2200	2.1269	53.6042	0.3232	58.2743
建设用地→耕地	0.0059	0.0089	0.3210	0.0046	0.3405
建设用地→林地	0.0444	0.0116	0.1537	0.0031	0.2129

续表

建设用地→草地	-0.0003	0.0008	0.0199	0.0001	0.0204
建设用地→水域	-0.0003	-0.0003	0.0000	0.0000	-0.0005
建设用地→未利用土地	-0.0296	-0.0154	0.9581	0.0000	0.9131
小计	0.0202	0.0056	1.4528	0.0078	1.4864
未利用土地→耕地	9.9325	10.4627	145.3029	4.2068	169.9049
未利用土地→林地	44.6301	12.1022	95.5269	3.0388	155.2980
未利用土地→草地	0.0144	1.4325	14.5615	0.0770	16.0854
未利用土地→水域	0.0949	-0.2110	-18.5549	0.0000	-18.6710
未利用土地→建设用地	0.1758	0.0917	-5.6912	0.0000	-5.4237
小计	54.8477	23.8782	231.1452	7.3225	317.1936
总计	83.1250	25.1330	210.3147	5.9833	324.5560

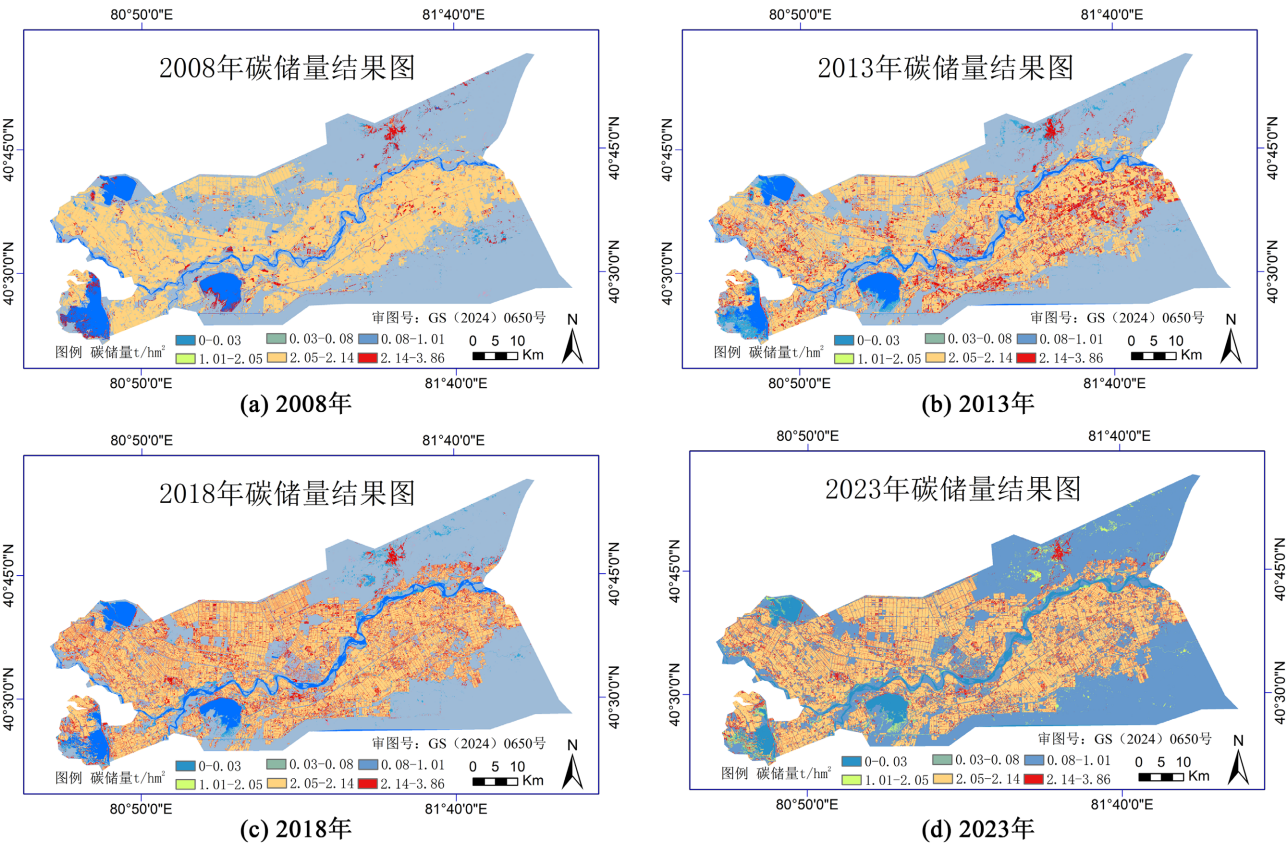


Figure 4. Carbon storage distribution map from 2008 to 2023
图 4. 2008~2023 年碳储量分布图

4.4. 碳储量的地形梯度分布特征

新疆阿拉尔市平均海拔约 1100 m，位于塔里木河冲积平原、塔克拉玛干沙漠北缘，地形以塔里木河冲积细土平原为主，地势自西北向东南缓慢倾斜，地形起伏较小，地形位指数最大值为 0.63。该区域属于干旱气候区，降水量偏低、蒸发强烈，淡水资源紧缺且空间分布不均，导致生态环境较为脆弱，植被覆

盖度整体偏低，林地与草地的分布面积有限。

由表 2 可知，阿拉尔市碳储量的地形梯度分异特征显著，主要集中在地形位指数 3~5 级区域，该区域广泛分布耕地、林地及未利用土地，是高碳储量区域。其中，地形位指数 5 级区域因淡水资源相对富集，农业生产条件优越，耕地面积占比高，碳储量显著高于其他地形梯度区域。而地形位指数 1~2 级区域受人类活动干扰更为频繁，土地利用类型转换剧烈，原有生态系统结构受损，植被覆盖面积减少，碳固定能力较弱，碳储量水平偏低。

综合坡度与高程的耦合分析结果表明，不同地形位指数级别的碳储量均随指数升高呈上升趋势：在地形位指数 4~5 级区域，以少量林地、草地分布为主，碳储量随地形位指数增加呈缓慢上升态势；在地形位指数 4~5 级区域，耕地与建设用地集中分布，碳储量随地形位指数增加呈快速上升态势，该区间为研究区碳固定潜力高值区。总体而言，阿拉尔市碳储量与地形位指数呈显著正相关关系，地形条件通过影响水资源分布、植被覆盖及土地利用类型，间接调控区域碳储量的空间分布格局。

5. 讨论

InVEST 模型基于生态系统服务与权衡理论，通过多源空间数据与标准化算法实现区域碳储量的定量评估与空间可视化，是小尺度区域碳储量研究的有效技术手段。本研究中碳密度参数通过《1:100 万世界土壤数据库》²数据核算，并结合干旱区相关研究成果修正确定，提升了参数的区域适配性；但模型估算过程中未考虑微生物活动、土壤呼吸、极端气候事件等因素对碳循环过程的影响，估算结果存在一定不确定性，后续可纳入多维度驱动因子，进一步提升估算精度。

人类活动主导的土地利用类型转换是研究区碳储量变化的核心驱动因素。农业开发、林地与草地不合理利用等活动易破坏土壤结构，降低土壤有机质含量，导致土壤碳储量流失：2008~2023 年，耕地向未利用土地转化导致阿拉尔市碳储量减少了 $84.76 \times 10^5 \text{ t}$ 。林地、草地向其他土地类型转化造成碳储量分别减少了 $92.31 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $5.66 \times 10^5 \text{ t}$ ，成为阿拉尔市碳流失的主要路径；建设用地扩张通过占用生态用地、破坏地表植被与土壤结构，同样导致碳储量损失，与塔里木河流域生态系统碳储量分析成果[17]较吻合。此外，已有刘梦园等基于 1990~2020 年数据对河西走廊开展的研究表明[21]，区域耕地、水域、建设用地面积持续扩张，林地、草地与未利用地面积呈缩减态势，区域碳储量虽总体小幅上涨，但林草地退化长限制固碳潜力释放。对比本研究 2008~2023 年阿拉尔市土地利用与碳储量演变规律，两地耕地、建设用地、未利用地的变化趋势保持一致；受绿洲人工造林、生态防护林持续建设影响，阿拉尔市林地、草地面积稳步增长，生态碳库持续扩充，水域面积整体收缩，碳储量提升幅度显著优于河西走廊，两地土地利用结构与碳汇演化路径存在明显分异。

地形条件通过调控水资源分布与植被生长适宜性，间接影响区域碳储量的空间格局。研究表明，阿拉尔市林地、草地主要集中在地形位指数 3~5 级区域，该区域地形条件更适宜植被生长与发育，是生态修复与碳汇提升的核心区域。基于此，在该区域开展植被恢复工程时，应结合地形特征与水资源禀赋，科学筛选适生植被类型、优化树种配置模式，提升植被覆盖度与碳固定效率，增强碳汇能力。

土地利用变化通过改变生态系统碳库结构与碳循环过程，对区域碳储量产生显著影响，科学合理的土地利用规划与管理是减缓气候变化、助力“双碳”目标实现的关键举措。针对阿拉尔市干旱区生态环境脆弱的特点，未来土地利用规划应坚持绿色发展原则，严控耕地、林地向建设用地转化，推进未利用土地向林地、草地等生态用地及耕地转化；同时加强草地生态保护与修复，遏制草地退化趋势，提升草地固碳潜力。通过优化土地利用格局、强化生态保护与修复，实现区域社会经济发展与碳汇功能提升的协同推进。

²同上。

6. 结论

本研究基于 InVEST 模型, 整合多源数据系统分析了阿拉尔市 2008~2023 年碳储量的时空变化规律与空间异质性, 得出以下结论:

(1) 不同土地利用类型对总碳储量的贡献度排序为: 耕地 > 未利用土地 > 林地 > 草地 > 水域 > 建设用地, 其中耕地与林地是碳储量的核心贡献类型。

(2) 不合理农业开发等人类活动易破坏土壤结构, 导致生物量碳储量流失, 是区域碳储量减少的重要原因。

(3) 阿拉尔市属典型干旱荒漠地区, 受气候干旱、植被覆盖度低等因素影响, 区域整体碳储量水平相对较低。

(4) 研究期内阿拉尔市总碳储量呈先上升后小幅下降的趋势, 2008~2023 年各年份总碳储量分别为: 253.34×10^5 t、 280.91×10^5 t、 293.54×10^5 t 和 285.79×10^5 t, 总碳储量净增了 32.45×10^5 t。

(5) 退耕还林等生态政策推动耕地向林地转化, 林地碳储量净增了 38.79×10^5 t; 未利用土地向耕地科学转型, 耕地碳储量净增了 2.16×10^5 t, 两类转型是区域碳储量增加的主要驱动因素。

(6) 碳储量空间分布与地形位指数显著相关, 地形位指数 3~5 级区域为碳储量高值区, 该区域可通过实施生态修复、扩大林草地覆盖面积, 来进一步提升碳汇功能。

基金项目

宿州学院省级大学生创新创业训练计划项目(S202510379177); 安徽省高校自然科学研究重点项目(2024AH051818); 安徽省学科(专业)带头人培育项目(DTR2025052); 安徽省合作实践教育基地项目(2023xqhz065); 安徽省新建专业质量提升项目(2024xjzlt053); 宿州学院质量工程结余经费项目(szxy2025jyjf50); 宿州学院科研创新平台发展基金项目(遥感与地理信息研究所)。

参考文献

- [1] Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., et al. (2014) Changes in the Global Value of Ecosystem Services. *Global Environmental Change*, **26**, 152-158.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- [2] 王秋风, 郑涵, 朱先进, 等. 2001-2010 年中国陆地生态系统碳收支的初步评估[J]. 科学通报, 2015, 60(10): 962-962.
- [3] 季波, 何建龙, 王占军, 等. 宁夏天然草地植被碳储量特征及构成[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1259-1268.
- [4] 萨如拉, 塔娜, 张昊, 等. 基于背包式激光雷达的单木地上生物量估算[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2026, 54(9): 14-26.
- [5] 张好, 董灵波, 卢军. 东北地区蒙古栎单木生物量及碳储量相容性模型研建[J]. 林业科学研究, 2025, 38(5): 105-116.
- [6] 刘亚男, 郝敏, 张希丽, 等. 中国湿地碳储量分布特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2481-2489.
- [7] 崔晓宇, 徐文韬, 关其锐. 东海有机碳存量估算[J]. 红外与激光工程, 2021, 5(6): 110-121.
- [8] 郭湧, 魏云琦, 欧阳翠玉. 基于 LIM 的城市园林树木碳储量基线情景模拟研究: 以北京市某高校绿地为例[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(12): 111-120.
- [9] 张正义. 河流生态治理工程对干旱区内陆河流域碳储量的驱动效应[J]. 水利科技与经济, 2026, 32(1): 112-128.
- [10] 王公鑫, 井长青, 董萍, 等. 新疆荒漠草地地上和地下生物量分配格局[J]. 草业科学, 2023, 40(5): 1201-1209.
- [11] 郭玉东, 张秋良, 张榕, 等. 库布齐沙漠人工灌木林生物量的遥感估测模型构建[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(9): 56-60.
- [12] 赵慧芳, 李晓东, 张东. 基于 MODIS 数据的青海省草地地上生物量估算及影响因素研究[J]. 草业学报, 2020, 29(12): 5-16.

- [13] 张禹森, 董春. InVEST 模型的藏东南地区 1990~2020 年碳储量时空格局及演化研究[J]. 测绘科学, 2023, 48(8): 153-162.
- [14] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1896-1906.
- [15] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究, 1999, 18(4): 349-356.
- [16] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 797-802.
- [17] 付玮, 夏文浩, 樊童生, 等. 塔里木河流域生态系统碳储量的情景预测分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(4): 634-644.
- [18] 曹梦迪, 曹姗姗, 刘婷婷, 等. 基于 InVEST 模型的新疆伊犁地区碳储量分布数据集[EB/OL]. 2023-10-24. <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.07550>, 2024-07-23.
- [19] 时任辉, 许力予, 陈英, 等. 重庆市生态系统碳储量空间分布及其地形梯度效应[J]. 四川环境, 2025, 44(4): 124-132.
- [20] 申亚斌, 周旋, 邱成锦. 基于 DEM 的坡度数据生产关键技术应用与实践[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(3): 76-82.
- [21] 刘梦园. 基于 InVEST 模型的河西地区碳储量与生境质量评价[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.