

# 天山北坡山地-绿洲-荒漠系统碳储量 梯度效应时空演变及机理\*

王婉莹, 黄佛君, 王华美

新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830017

**摘要:** 在全球变化与“双碳”目标下, 解析干旱区山地-绿洲-荒漠系统碳储量时空分异及驱动机制, 对实现区域“碳平衡”具有重要意义。本研究以天山北坡为研究区, 基于 InVEST 模型测算 1990—2020 年碳储量, 结合山盆梯度分析与双变量空间自相关, 系统揭示其时空演变规律, 并运用最优参数地理探测器探究驱动因子。结果表明: 1) 时间上, 碳储量呈先减后增趋势, 2000—2020 年共增长  $4.06 \times 10^7$  t, 主要归因于未利用地转为耕地与草地; 空间上, 沿山盆梯度呈条带状递减。2) 碳储量与山盆梯度显著正相关, 地均碳密度随梯度升高表现为“平稳-激增”模式, 反映出人类活动与自然约束随地形梯度变化的动态平衡关系。3) 驱动机制呈现空间异质性。低梯度受人文因素主导, 中梯度为人地交互, 高梯度以自然控制为主; 时序上则经历了从社会经济主导向土地利用强度凸显, 再向社会经济-夜间灯光二元协同的转型, 折射出区域发展趋于空间精细化管理。本研究深化了人地耦合理论对干旱区山地-绿洲-荒漠系统的认知, 可为国土空间规划与碳汇能力提升提供科学参考。

**关键词:** 天山北坡; 碳储量; InVEST 模型; 山盆梯度效应; 最优参数地理探测器

**中图分类号:** K909 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)02-0001-14

## Carbon storage gradient in the mountain-oasis-desert system on the north slope of Tianshan Mountain: Spatiotemporal evolution and mechanisms

WANG Wanying, HUANG Fojun, WANG Huamei

College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

**Abstract:** To support the "Dual Carbon" goals under global change, elucidating the spatiotemporal dynamics and driving mechanisms of carbon storage in arid mountain-oasis-desert systems is crucial for achieving regional carbon balance and sustainable development. This study applied the InVEST model to estimate carbon storage from 1990 to 2020 in the north slope of the Tianshan Mountain. By integrating mountain-descent gradient analysis and bivariate spatial autocorrelation, we systematically revealed its spatiotemporal patterns and the linkage with the gradient. The optimal parameter-based geographical detector was then used to investigate the driving factors. The results indicate that: 1) Temporally, carbon storage decreased initially and then increased, with a net gain of  $4.06 \times 10^7$  t since 2000, primarily attributed to the conversion of unused land to cropland and grassland. Spatially, it showed a belt-shaped decreasing pattern along the gradient. 2) Carbon storage was positively

\* 收稿日期: 2025-09-16

录用日期: 2025-12-15

网络首发日期: 2026-01-23

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2024D01A79)

作者简介: 王婉莹(2000年生), 女; 研究方向: 碳储量时空演变; E-mail: wwy106123@stu.xjnu.edu.cn

通信作者: 黄佛君(1975年生), 男; 研究方向: 绿洲人地关系地域系统演变; E-mail: hfj19762005@xjnu.edu.cn

全文阅读



ZR20250201

correlated with the gradient. Areal carbon density followed a "stable-then-sharp increase" pattern with increasing elevation, reflecting a dynamic equilibrium between human activities and natural constraints along the topographic gradient. 3) The driving mechanisms exhibited spatial heterogeneity: dominated by anthropogenic factors at low gradients, by human-land interaction at medium gradients, and by natural controls at high gradients. Temporally, the dominant drivers shifted from socioeconomic factors to land-use intensity, and finally to a dual synergy between socioeconomic activity and nighttime light intensity, indicating a regional transition toward more refined spatial governance. This study enhances the theoretical understanding of human-land coupling in mountain-oasis-desert systems and provides a scientific basis for territorial spatial optimization and carbon sequestration enhancement in arid regions.

**Key words:** the north slope of Tianshan Mountain; carbon storage; InVEST model; mountain basin gradient effect; optimal parameter geographical detector

在全球气候变化与“碳中和”战略背景下,精确量化陆地生态系统碳汇功能是生态学与气候治理的核心议题(Piao et al., 2009; Wang et al., 2020; 张鹏岩等, 2025)。山地生态系统作为重要碳汇,其碳储量的时空动态对区域碳平衡具有关键调控作用(Zhu et al., 2019; 张平等, 2022)。天山北坡山地-绿洲-荒漠系统(以下简称天北山盆系统)作为我国干旱区典型的社会-经济-生态复合体,不仅是新疆的核心经济走廊,也是中亚重要的生态屏障,其梯度性生态系统对气候变化与人类活动响应敏感(卢雅焱等, 2022)。近年来,强烈的人类活动与土地利用变化使该区域成为研究“人-地-碳”耦合机制的典型区域。本研究聚焦于气候变化与人类活动对天北山盆系统碳储量时空演变的驱动机制,重点解析其沿山盆梯度的分异规律,以期为干旱区生态适应与碳中和路径提供科学依据。

碳储量是评估区域生态系统碳汇能力的关键指标(He et al., 2016)。早期研究主要基于样地清查法(Fang et al., 2001; Wu et al., 2018),通过土壤剖面测算碳储量。随着遥感技术的发展,遥感估算方法逐渐应用于碳储量评估(Metzger et al., 2006; Sun et al., 2020)。随着研究不断深入,多种模型被广泛用于区域碳储量估算,如CASA模型(Woodwell et al., 1978)、“簿记”模型(Houghton et al., 1983)以及InVEST模型(Potter et al., 1993; 贺一聪等, 2024; 柯健等, 2025)。其中,InVEST模型因适用性强、支持空间可视化,能够高效、精准地估算区域碳储量,而得到广泛应用(赵胤程等, 2022)。

地形梯度通过调控水热格局与人类活动范围,深刻影响生态系统结构与碳汇功能(张斌等, 2023;

张禹森等, 2023; 郭炳良等, 2026; 温羽婧等, 2025)。作为关键地形因子,海拔与坡度共同驱动土壤有机碳与植被格局的空间分异(夏晓莹等, 2023; 杨涵等, 2024)。天北山盆系统因地形起伏显著,垂直带谱完整(吴芳等, 2024; 姜安静等, 2025),成为探究碳储量梯度分异的典型研究单元。尽管已有研究关注到了地形对碳储量的影响,但基于高程、坡度与地形位的连续梯度系统对碳储量空间格局的驱动机制,仍有待深入研究。

基于土地利用的碳储量研究主要集中于时空演变(刘昊等, 2025; Wang et al., 2024)、模拟预测(He et al., 2023; 薛杨等, 2025)与驱动力分析(Sun et al., 2023; 张志超等, 2025)。近年来,驱动机制研究逐渐从单一因子转向多因子交互作用识别。最优参数地理探测器在此方面具有优势,能够有效辨识连续型因子的主导作用并检验其交互效应(Li et al., 2023; 张龙江等, 2024)。针对天北地区的研究已初步揭示其碳储量变化与部分驱动因子间的关联(如克亚·热合曼等, 2022; 张顺鑫等, 2024),地形对森林土壤有机碳的影响也受到关注(夏晓莹等, 2023)。然而,现有研究多聚焦于单一地形因子或静态格局,尚未将地形作为连续梯度系统,整合自然与人为因子,揭示碳储量在山盆系统中的时空演变规律与驱动机制。

综上所述,现有研究尚未充分讨论天北山盆系统综合地形因子梯度效应下的碳储量时空分异规律。虽已识别出若干驱动因子,但对自然与人文要素如何如山盆梯度约束下发生交互作用、其耦合机理如何影响不同海拔带碳汇功能等问题,仍缺乏精细化与机理解释。鉴于此,为深化对干旱区山盆

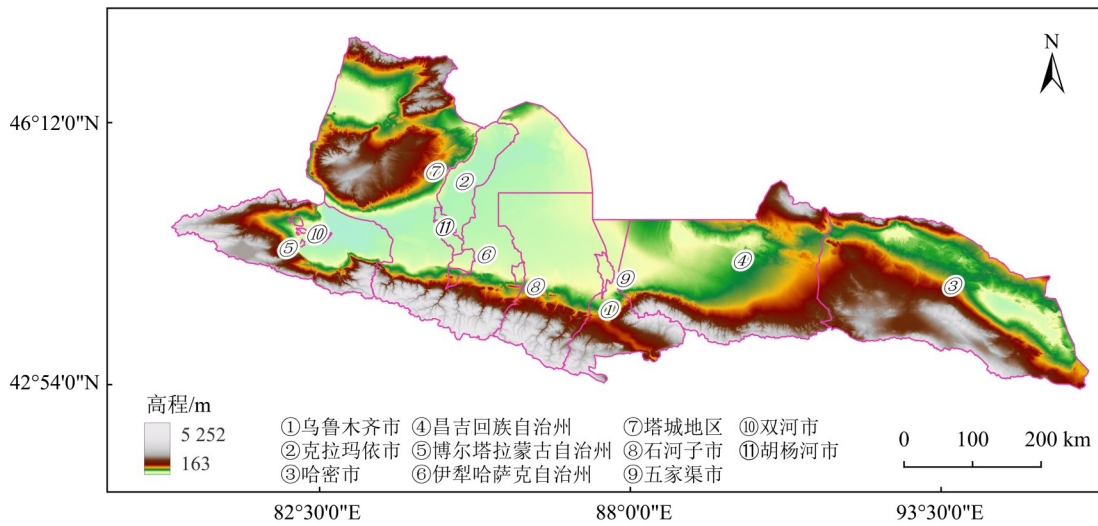
系统碳循环过程的理解,本研究从综合性山盆梯度视角出发,运用InVEST模型、最优参数地理探测器等方法,系统揭示天北山盆系统碳储量的时空演变规律及其在地形梯度上的分异机制,以深化对干旱区山盆系统碳循环过程的理解,并为区域国土空间优化与生态管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

本研究聚焦于天北山盆系统(79°E—97°E、

42N°—48°N),横跨新疆主要经济带(图1)。天北山盆系统作为欧亚大陆腹地典型的温带干旱-半干旱山地系统,其垂直高差巨大,形成显著的山盆梯度,塑造出自山前荒漠至亚冰雪带的完整植被-土壤垂直带谱(赵兵杰等,2025;袁国映,1993)。这些生态系统是区域碳储量的核心载体,其地上生物量与土壤有机碳库均表现出强烈的海拔依赖性。作为新疆经济核心区,山前绿洲人口密集,农牧与城镇活动频繁,引发了显著的土地利用变化(张百平等,2004),进而深刻影响碳储量的空间格局。



审图号为GS(2019)1822,底图边界无修改。

图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

### 1.2 数据来源

1990年为研究区发展起步阶段,故本研究选取1990、2000、2010、2020年4期数据,涵盖土地利用(30 m)、NDVI、人口密度与GDP(1 km)等指标,均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。土地利用数据经ArcGIS 10.8重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类。同期年均降水、气温与夜间灯光数据(1 km)取自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>),数字高程(DEM, 30 m)取自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。所有栅格数据统一重采样至30 m分辨率,空间参考均为地理坐标系WGS\_1984\_UTM\_Zone\_45N。预处理过程中通过目视解译与统计检验,确保数据无异常值与边缘畸变。

## 2 研究方法

### 2.1 基于InVEST模型的碳储量评估模型

InVEST模型的碳储量模块可利用土地利用数据估算天北山盆系统的碳储量(吕雅淑等,2025; Liu et al., 2024)。计算公式如下:

$$C_{\text{total}-i} = K_B \times C_{\text{above}-i} + K_B \times C_{\text{below}-i} + K_S \times C_{\text{soil}-i} + C_{\text{dead}-i}, \quad (1)$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{total}-i} \times S_i, \quad (2)$$

式中 $C_{\text{total}-i}$ 为第*i*种土地利用类型的总碳储量; $C_{\text{above}-i}$ 、 $C_{\text{below}-i}$ 、 $C_{\text{soil}-i}$ 、 $C_{\text{dead}-i}$ 分别为第*i*种土地利用类型的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度与死亡有机碳密度; $K_B$ 和 $K_S$ 分别为生物量碳密度修正系数和土壤碳密度修正系数; $C_{\text{total}}$ 为天北山盆系统的总碳储量; $S_i$ 为*i*种土地利用类型的面积。

本研究在确定碳密度参数时,采用已有研究成

果(Liu et al., 2024; 卢雅焱等, 2022; 张顺鑫等, 2024;)进行估算。鉴于气候条件是调控生态系统碳密度的关键驱动力,为提升估算准确性,选取研究区内与全国的年均气温与年均降水因素,对获取的碳密度基准值进行修正。采用Alam et al.(2013)的方法修正年均降水量对生物量碳密度与土壤碳密度的影响;采用Giardina et al.(2000)和陈光水等(2007)的方法修正年均气温对生物量碳密度的影响。公式如下:

$$C_{SP} = 3.3968 \times P_{MAP} + 3996.1, \quad (3)$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.0054 \times P_{MAP}}, \quad (4)$$

$$C_{BT} = 28 \times T_{MAT} + 398, \quad (5)$$

式中 $C_{SP}$ 为根据年均降水量得到的土壤碳密度, $P_{MAP}$ 与 $T_{MAT}$ 分别为年均降水量与年均气温, $C_{BP}$ 和 $C_{BT}$ 分别为根据年均降水量和年均气温算得的生物量碳密度。分别将天北山盆系统和全国的年均气温和年均降水带入上述公式:

$$K_{BP} = C'_{BP}/C''_{BP}, \quad (6)$$

$$K_{BT} = C'_{BT}/C''_{BT}, \quad (7)$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT}, \quad (8)$$

$$K_S = C'_{SP}/C''_{SP}, \quad (9)$$

式中 $K_{BP}$ 为生物量碳密度降水因子修正系数, $K_{BT}$ 为生物量碳密度气温因子修正系数; $C'_{BP}$ 和 $C''_{BP}$ 分别为天北山盆系统与全国根据年均降水量得到的生物量碳密度数据, $C'_{BT}$ 和 $C''_{BT}$ 分别为天北山盆系统和全国根据年均气温得到的生物量碳密度, $C'_{SP}$ 和 $C''_{SP}$ 分别为天北山盆系统和全国根据年均气温得到的土壤碳密度。修正后的结果见表1,碳密度值相较修正前降低。

表1 各类土地利用类型的碳密度  
Table 1 Carbon density of land use types t/hm<sup>2</sup>

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度
耕地	2.01	4.12	81.86	1.02
林地	32.15	11.51	111.46	5.48
草地	1.84	7.62	72.14	1.47
水域	1.01	0.00	0.00	0.00
建设用地	1.63	1.30	17.82	0.00
未利用地	0.94	0.64	35.38	2.36

## 2.2 山盆梯度分析

地形位指数可综合反映地形对地表过程与格

局的空间影响(Mugagga et al., 2012)。本研究根据地形位指数,探究其对天北山盆系统碳储量时空分布格局变化的作用。公式如下:

$$T = \ln \left[ \left( \frac{E}{\bar{E}} + 1 \right) \times \left( \frac{S}{\bar{S}} + 1 \right) \right], \quad (10)$$

式中 $T$ 为地形位指数, $E$ 和 $\bar{E}$ 分别为任意点的海拔和平均海拔, $S$ 和 $\bar{S}$ 分别为任意点的坡度和平均坡度。

根据天北山盆系统的地形特征,采用分位法将区内的高程、坡度、地形位指数分为5级(郭炳良等, 2025),选择分位数法是因可确保每个等级内包含的栅格数量相等,从而使不同等级间的对比分析在统计上更为平衡和稳健(表2)。

表2 天北山盆系统梯度分级标准  
Table 2 Gradient classification standards for the Tianbei mountain basin system

级别	海拔/m	坡度/(°)	地形位指数
1级	163.00~422.43	< 2.28	0.06~0.28
2级	422.43~681.87	2.28~4.25	0.28~0.39
3级	681.87~1100.97	4.25~6.86	0.39~0.52
4级	1100.97~1799.46	6.86~13.40	0.52~0.77
5级	1799.46~5252.00	13.40~83.37	0.77~1.72

## 2.3 双变量空间自相关

双变量空间自相关可用于定量描述事物的空间依赖性以及2个变量间的相关程度。本研究提取天北山盆系统的碳储量与山盆梯度进行双变量空间自相关分析,以测算其空间依赖性和聚集程度。

全局莫兰指数( $I$ )用于衡量天北山盆系统碳储量与山盆梯度的空间分布聚集情况。 $I$ 为正值,表明数据呈空间正相关,负值则表明数据呈负相关。值越大表明空间相关性越强,反之则表明空间相关性越弱,计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}, \quad (11)$$

式中 $n$ 为网络总数, $w_{ij}$ 为 $n \times n$ 的空间权重矩阵, $x_i$ 和 $x_j$ 为 $i$ 和 $j$ 的属性值, $\bar{x}$ 为属性值的均值, $S^2$ 为属性值的方差。

通过 $I$ 发现数据存在明显聚集后,故采用局部莫兰指数( $I_i$ )进行下一步计算。 $I_i$ 用于衡量碳储量在天北山盆系统特定地区与其相邻地区之间的空间自相关性。计算公式如下:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (12)$$

#### 2.4 最优参数地理探测器

最优参数地理探测器是基于传统地理探测器改进得到的模型。相较于传统地理探测器,该模型在处理连续型变量时,能显著减少人为干预所带来的主观偏差和离散化质量的不稳定(如克亚·热合曼等,2022)。因此,本研究借助最优地理探测器,对天山北盆系统梯度效应下碳储量空间分布机理进行探究,具体计算公式如下:

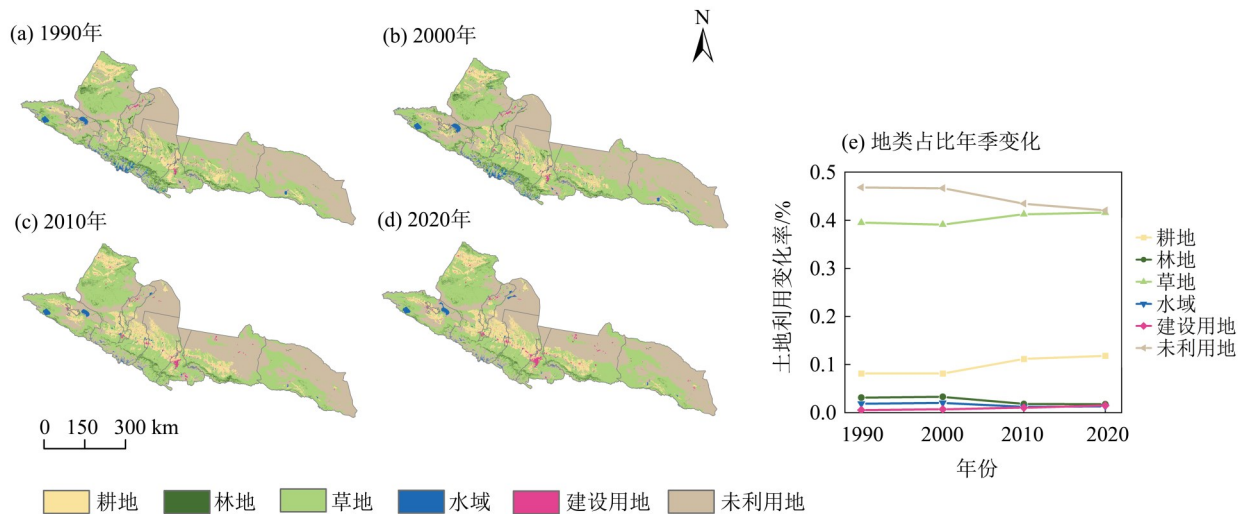
$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{W_{ss}}{T_{ss}} \quad (13)$$

式中 $q$ 为分异及因子探测统计量, $h$ 为自变量的分类序号,指对研究区分层或者分区后的每个子区域, $N$ 为天山北盆系统内样本数, $N_h$ 为 $h$ 层单元数, $L$ 为评价单元数, $\sigma_h^2$ 和 $\sigma^2$ 为 $h$ 层和天山北盆系统的方差, $W_{ss}$ 和 $T_{ss}$ 分别为类别内方差和全研究区的总方差。 $q$ 为 $[0, 1]$ , $q$ 越大,表示该驱动因子对天山北盆系统梯度效应下碳储量时空演变的影响越强,反之当 $q=0$ 时,则说明驱动因子无解释效力。

### 3 结果与分析

#### 3.1 天山北盆系统土地利用时空演变梯度效应

**3.1.1 土地利用时空演变特征** 1990—2020年,研究区域土地利用结构时空分异显著(图2)。土地利用类型以未利用地为主,但其面积比例呈持续下降趋势,从1990年的46.81%降至2020年的42.05%,集中分布于研究区域的西北部。草地面积占比次高,广泛分布于研究区域的西北部,面积占比介于39.12%~41.59%;2000年前呈减少趋势,后稳步上升,并沿天山北麓呈条带状延伸,空间分布呈高度破碎化特征。耕地面积占比在2000年后显著增加,占比从8.16%提高至11.83%,集中分布于研究区域的中部、北部山前洪积-冲积倾斜平原与洪积扇缘绿洲。林地与水域面积总体表现为下降趋势,2000年后显著下降。建设用地占比最低,但增幅最显著,占比从1990年的0.70%增至2020年的1.48%,空间上呈点状分布于天山北麓洪积平原带,并表现出由城市中心向周边区域蔓延扩张的趋势。



审图号为GS(2019)1822,底图边界无修改。

图2 天山北盆系统土地利用类型

Fig. 2 Land use types of the Tianbei mountain basin system

1990—2020年,该区域土地利用变化呈现出生态修复与农业扩张同步的特征(图3)。具体而言,1990—2000年,主要表现为草地与未利用地的净减少,其中草地净减少9.49万 $\text{hm}^2$ ,共转出1 016.78万 $\text{hm}^2$ ,其中25.20万 $\text{hm}^2$ 转为耕地,10.07万 $\text{hm}^2$ 退化为未利用地,显示农业开垦与生态

退化并存。2000—2010年,土地利用特征发生历史性转折,耕地通过开垦草地61.00万 $\text{hm}^2$ 和未利用地27.70万 $\text{hm}^2$ 实现净增加,同时草地也净增加55.19万 $\text{hm}^2$ ,未利用地则净减少83.27万 $\text{hm}^2$ ;标志着在强力的政策推动下,区域成功实现了从“生态退化”到“生态修复”的转变。2010—2020年,耕地

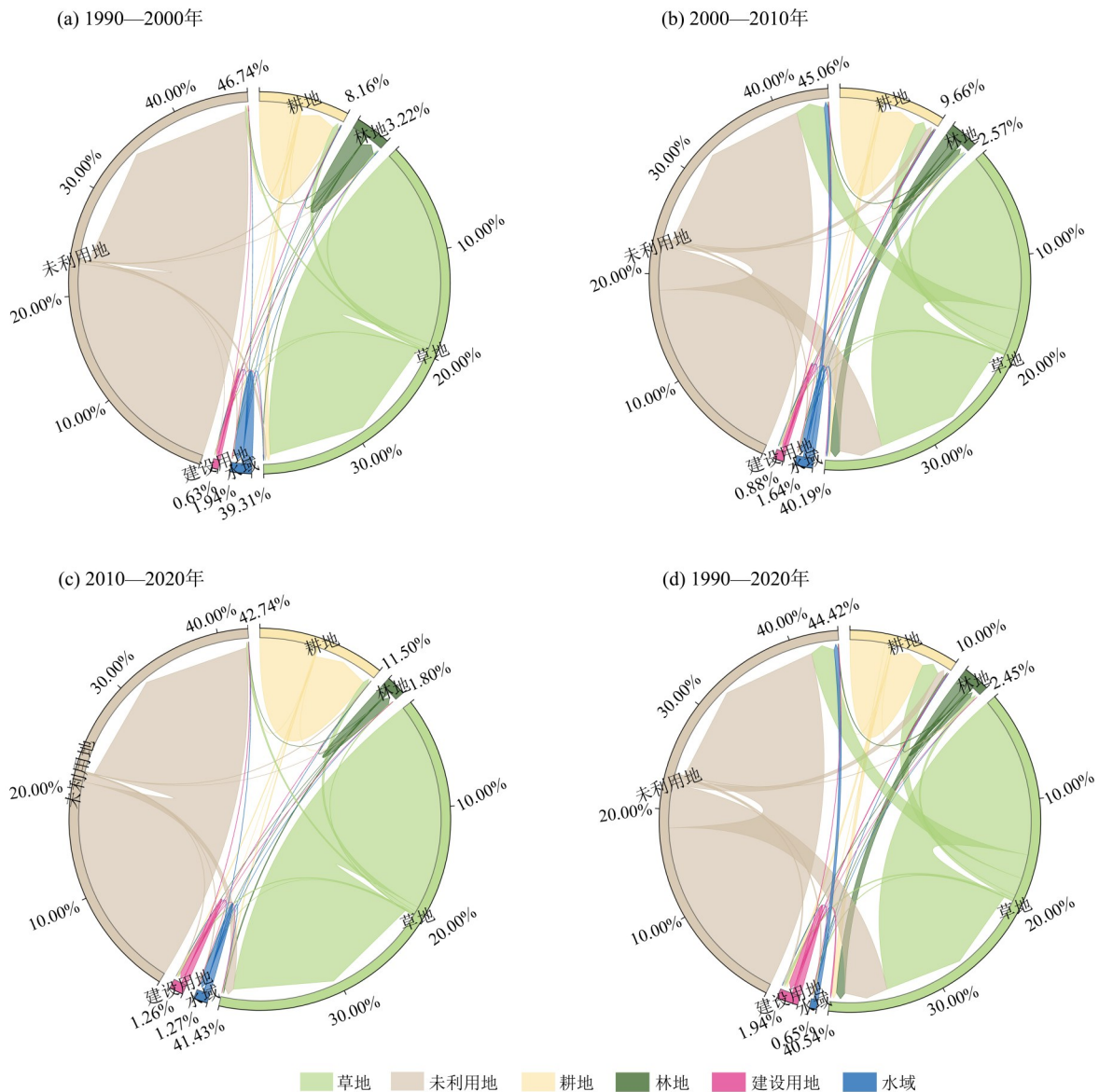


图3 土地利用类型时空变化

Fig. 3 Spatiotemporal changes in land use types

持续扩张, 草地在生态治理下净增加 8.28 万  $\text{hm}^2$ , 未利用地净减少 8.28 万  $\text{hm}^2$ , 表明生态修复进程持续。

近 30 年来, 天北山盆系统的草地累计净增加 53.99 万  $\text{hm}^2$ , 未利用地累计净减少 122.88 万  $\text{hm}^2$ , 而耕地则扩张了 84.45 万  $\text{hm}^2$ , 揭示了人类活动与生态保护政策在空间上博弈与动态调适的长期格局。

**3.1.2 土地利用山盆梯度效应** 受人类活动强度与自然地理条件垂直分异规律的共同作用, 天北山盆系统土地利用结构呈显著的山盆梯度分异特征。从 1990—2020 年各地类变化面积占比的山盆梯度特征来看 (图 4), 耕地减少与建设用地增加的热点均高度集中于 1 级梯度区域, 表明人类活动对土地利用变化的影响集中分布于自然条件最优越的低

梯度带。随着山盆梯度增加, 耕地流失与建设用地扩张强度显著减弱, 变化幅度逐步递减。林地在中高区域 (3~5 级) 减少, 草地的减少在中低区域 (1~2 级) 亦较为明显, 反映出该区域仍面临一定的生态压力。水域在 5 级梯度的减少, 体现了土地利用变化的地形依赖性和空间异质性。

以 2020 年土地利用现状为例, 各梯度土地利用分布格局, 1 级以耕地、水域和建设用地为主, 2~5 级则以草地、林地和未利用地为主。随着山盆梯度等级提升, 耕地占比逐渐减少; 林地和草地占比逐渐增加; 建设用地和未利用地占比呈“凸”型, 在 2 级占比最大, 随即逐渐减少; 水域呈“凹”型, 在 2、3、4 级占比小, 1、5 级占比大。

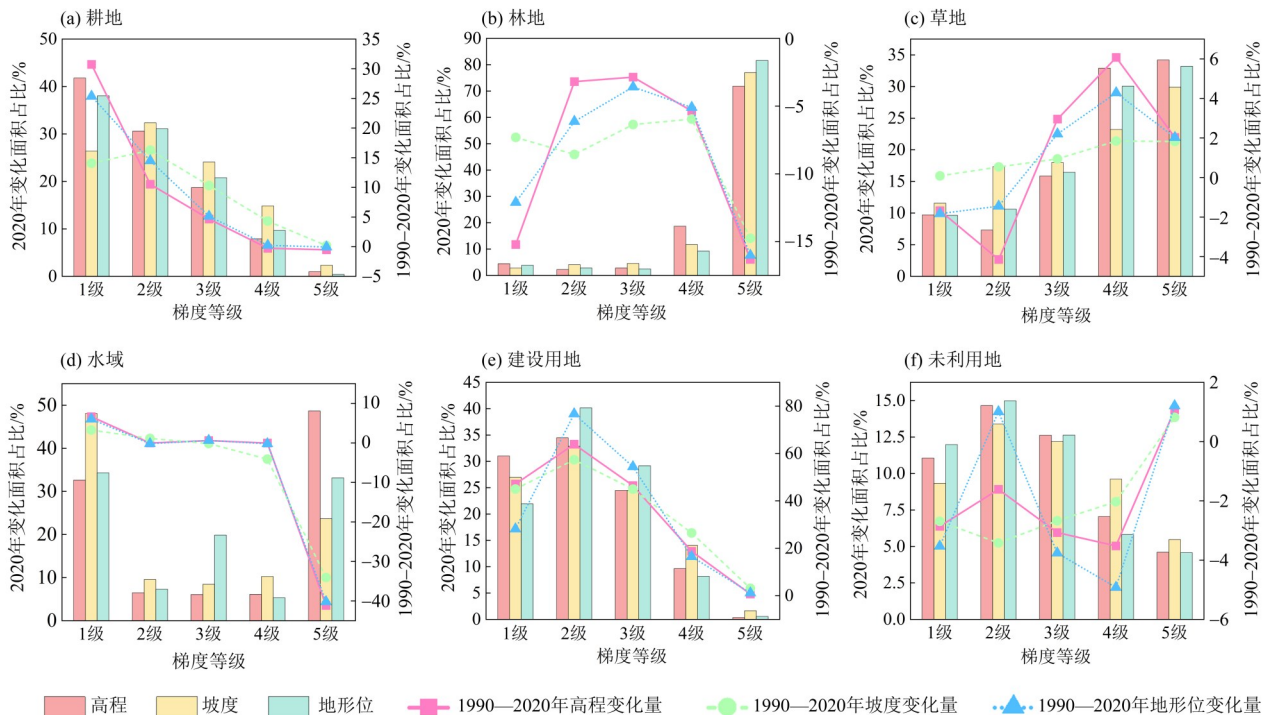


图4 不同梯度等级的2020年各地类面积占比与1990—2020年变化面积占比

Fig 4 Proportion of various land types in 2020 and proportion of area changed from 1990 to 2020 at different gradient levels

### 3.2 天北山盆系统碳储量时空演变梯度效应

**3.2.1 碳储量时空演变特征** 1990—2020年,天北山盆系统总碳储量整体呈先下降后上升的趋势(图5),4期碳储量依次为 $1.6385 \times 10^9$ 、 $1.6372 \times 10^9$ 、 $1.6608 \times 10^9$ 和 $1.6778 \times 10^9$  t。其中,2000—2020年增幅最大,达 $4.06 \times 10^7$  t,主要归因于该时期草地与耕地规模的扩大。

从空间分布看,碳储量高值区(最高达14.454 t)集中分布于北部天山中山带,呈条带状沿山脉延伸,主要位于林地覆盖区域;中值区环绕高值区外围分布,形成由边缘林地和草地构成的过渡带;低值区则呈现“大集中、小分散”格局,大面积连片区域位于东北部荒漠戈壁,零散低值区见于城市建成区,而极低值区呈规则条带镶嵌于天山高海拔区域与湖泊区,其空间走向与山脊线一致,海拔下限与雪线位置吻合。

1990—2020年,天北山盆系统碳储量变化呈现明显的时空分异(图6)。1990—2000年,碳储量总体稳定,减少区域集中于昌吉回族自治州西北部与塔城地区中部的耕地区。2000—2010年,减少态势趋缓,局部出现碳储量恢复迹象;减少区集中于乌鲁木齐市北部的绿洲-荒漠过渡带,增加区则呈破碎化分布于中低山草原带及绿洲边缘。

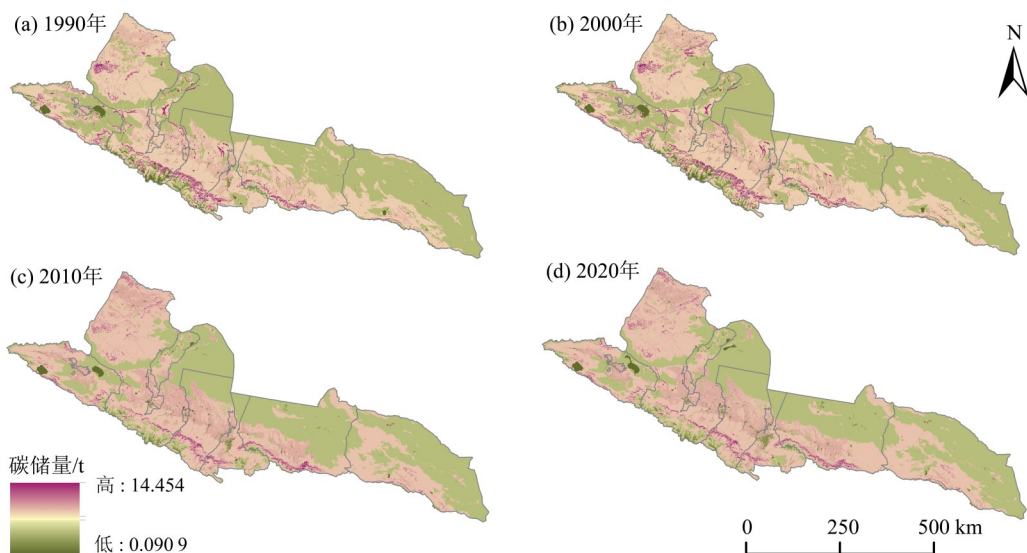
2010—2020年,增加区范围显著扩大,以昌吉回族自治州东南部的中低山草原带最为突出。整体上,碳储量变化由初期的减少逐步转为后期的增加,反映区域生态政策对生态系统固碳能力的增强作用;但高海拔冰缘带与城镇周边仍存在碳流失风险,未来需持续关注气候变化与人类活动交互作用下的碳库稳定性。

### 3.2.2 碳储量山盆梯度效应

#### 1) 碳储量与山盆梯度的空间关联

本研究通过GeoDa1.2软件的双变量空间自相关分析方法,从全局与局部空间自相关2个层面揭示了1990—2020年天北山盆系统地均碳密度与各个山盆梯度的空间关联特征。通过ArcGIS10.8.1软件渔网工具,构建天北山盆系统5 km分辨率的格网,作为空间自相关的基本单元,进一步绘制研究区1990—2020年各个山盆梯度与地均碳密度的空间集聚分布图。全局空间自相关结果显示,1990—2020年各山盆梯度与地均碳密度均具有显著空间正相关( $P < 0.05$ ),表明随着山盆梯度的增加,其地均碳密度也随之增加,且存在明显聚集趋势。

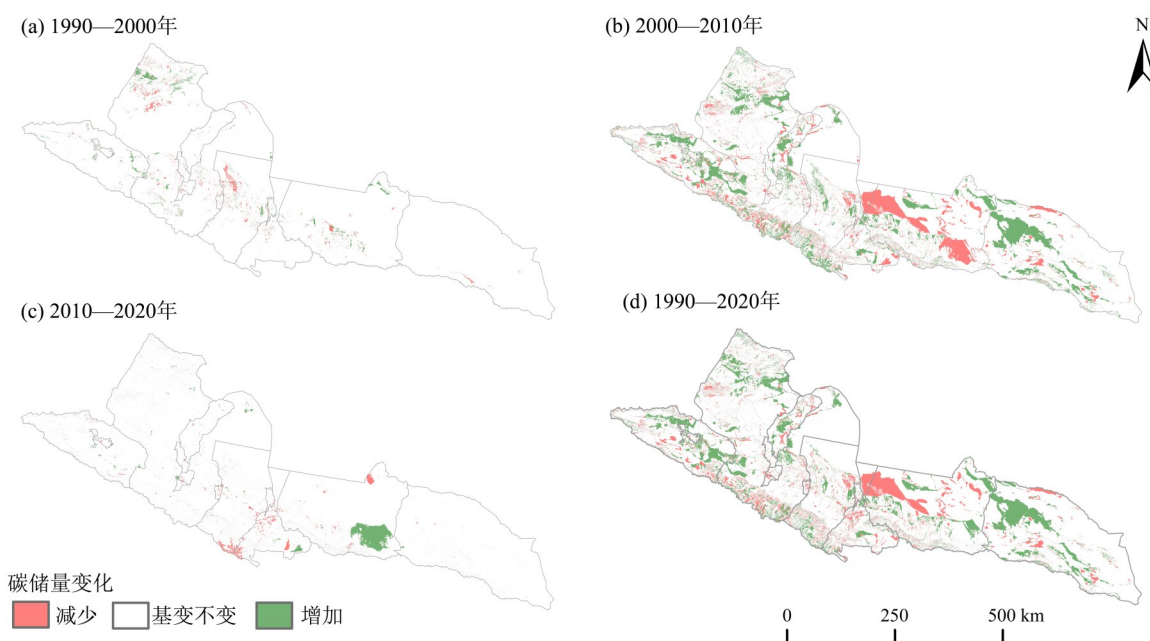
进一步通过局部空间自相关分析识别具体的空间集聚类型与分布,结果表明(图7),时间变化上,1990—2020年,各地形梯度与地均碳密度的



审图号为GS(2019)1822,底图边界无修改。

图5 碳储量空间分布

Fig 5 Spatial distribution of carbon storage



审图号为GS(2019)1822,底图边界无修改。

图6 碳储量变化量空间分布

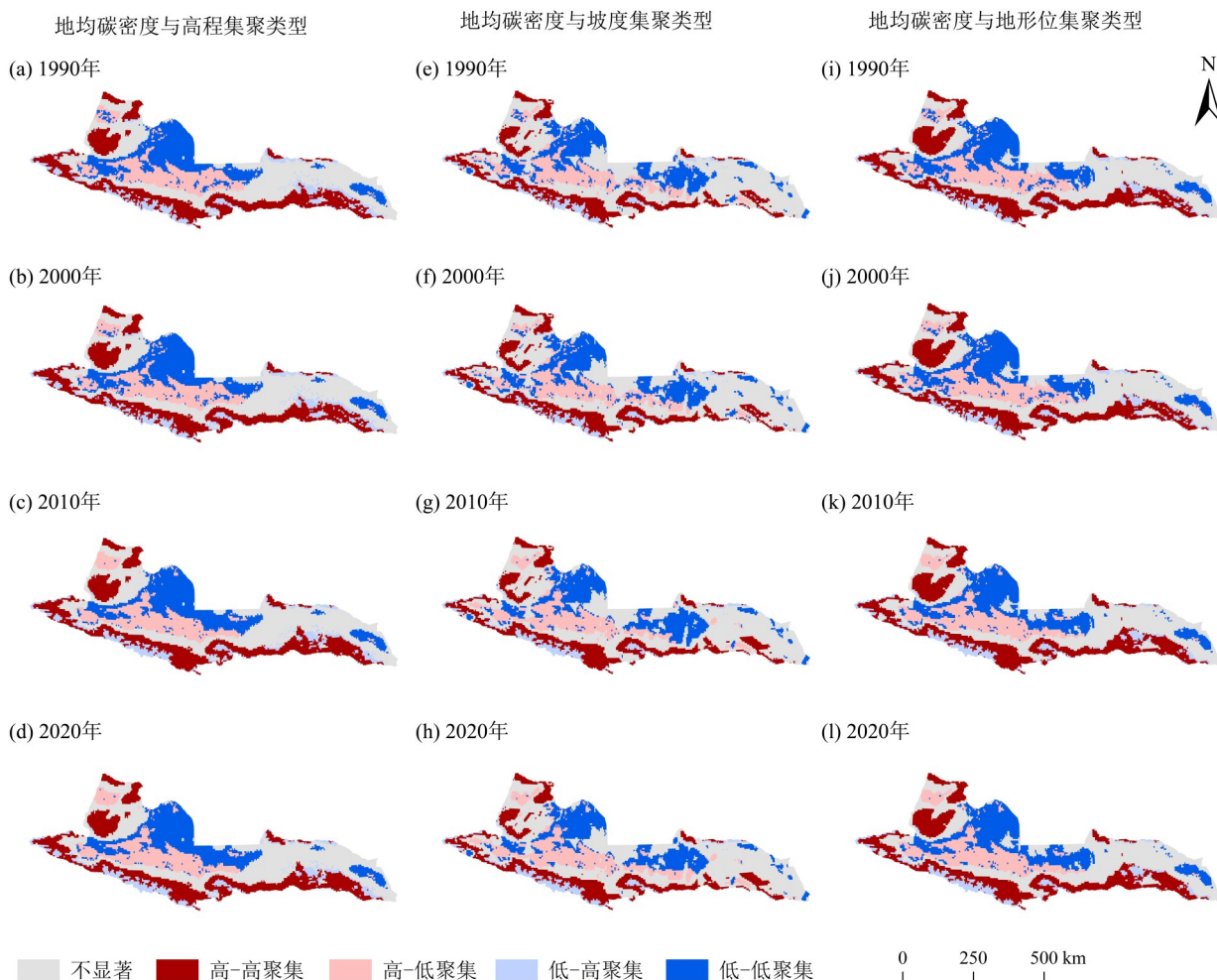
Fig. 6 Spatial distribution of carbon storage changes

高-高聚集区呈缓慢增加的趋势,低-低聚集区呈先减后增的趋势。空间分布上,高-高聚集区沿天山山脉呈环条带状分布,主要分布在研究区域的南部与西部,该区域温度适宜,降水充沛,人类干扰程度低;低-低聚集区呈条带状分布于研究区域的北部与中西部荒漠带,该区域地势低、温度高、降水少、土壤贫瘠;低-高聚集区占比最少,与山脊线分布一

致,分布于天山山脉雪线上部的高山冰雪带与冰缘带,位于高-高聚集区的外围;高-低聚集区镶嵌分布于高-高聚集区与低-低聚集区之间,呈条带状分布在研究区域中部。

## 2) 碳储量的山盆梯度分异特征

1990—2020年,研究区域地均碳密度总体保持稳定,并呈现小幅上升趋势(图8),均为1~3级平稳



审图号为GS(2019)1822,底图边界无修改。

图7 地形地貌指数与地均碳密度的空间聚集类型

Fig. 7 Spatial aggregation types of terrain morphology indices and average carbon density

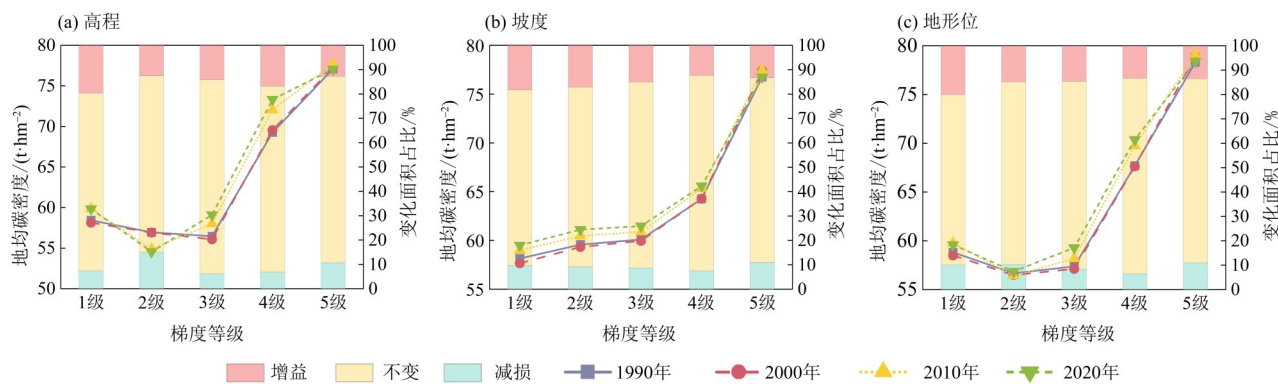


图8 不同梯度的地均碳密度与变化面积占比

Fig. 8 The area-weighted carbon density and its variation at different gradients

变化,4~5级迅速增长,并在5级达到峰值。各地均碳密度变化面积占比,在各山盆梯度上均以保持稳定为主,随着山盆梯度的上升其增益逐渐下降,减损呈“凹”型。

从天北山盆系统的不同地形因子来看,地均碳密度随高程变化总体表现为先降后升的趋势。其中,1990与2000年地均碳密度在1~3级减少,而后增多。2010与2020年地均碳密度在1~2级减少,而

后增加;随坡度增大,地均碳密度整体呈上升趋势,在 1~3 级缓慢增长,各年份增幅均低于 5 t/hm<sup>2</sup>,在 4~5 级增速显著加快。在地形位梯度上,地均碳密度亦呈现先减后增格局,在 1~2 级持续下降,3~5 级则迅速上升。

### 3.3 天北山盆系统梯度碳储量时空演变机理

**3.3.1 单因子探测** 天北山盆系统呈典型的条带状分布格局,其地形、地貌与人文社会条件沿山麓至荒漠方向表现出显著的南北梯度差异。碳储量时空演变受自然和人文双重因素影响。本研究将自然因素拆分为年平均降水( $X_1$ )、年平均气温( $X_2$ )、NDVI( $X_3$ )3 个气候植被因素,将社会经济因素拆分为土地利用强度( $X_4$ )、人口密度( $X_5$ )、GDP( $X_6$ )、夜间灯光强度( $X_7$ )4 类发展水平因素。

研究区域碳储量时空分异表现出明显的山盆梯度约束与人类活动相互作用的驱动特征(表 3)。总体而言,自然与人文因子的解释力随地形抬升,呈规律性演变。在低海拔绿洲核心区(1 级梯度),碳储量变化主要由人口密度、GDP 和夜间灯光强度等人文因子驱动,反映出人类干扰对碳储量空间格局的塑造作用。在山前绿洲-荒漠过渡带(2~3 级梯度),自然与人文因子的解释力均达到峰值,NDVI、土地利用强度及社会经济指标( $X_5$ 、 $X_6$ )共同主导该区域的碳储量分布,标志着此区域为人类与自然交互作用的敏感核心区域。中高海拔自然植被带(4~5 级梯度),驱动机制转为以年均降水、气温和 NDVI 等自然因子为主,人文因子影响显著减弱,表明该梯度碳储量主要受水热配置控制。

表 3 梯度碳储量时空演变影响因子地理探测值

Table 3 Geographical detection values of influencing factors on the spatialtemporal evolution of gradient carbon storage

年份	梯度	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
1990	1 级	0.04	0.12	0.13	0.21	0.35	0.29	0.00
	2 级	0.17	0.17	0.29	0.30	0.47	0.38	0.01
	3 级	0.25	0.14	0.36	0.24	0.39	0.27	0.01
	4 级	0.31	0.20	0.35	0.06	0.46	0.16	0.00
	5 级	0.86	0.26	0.07	0.02	0.10	0.11	0.00
2000	1 级	0.04	0.10	0.32	0.20	0.35	0.27	0.01
	2 级	0.13	0.14	0.43	0.30	0.43	0.36	0.02
	3 级	0.22	0.13	0.46	0.21	0.37	0.26	0.01
	4 级	0.29	0.20	0.43	0.05	0.45	0.20	0.01
	5 级	0.13	0.32	0.26	0.00	0.08	0.03	0.00
2010	1 级	0.07	0.06	0.43	0.36	0.33	0.26	0.01
	2 级	0.19	0.08	0.51	0.40	0.33	0.24	0.03
	3 级	0.26	0.12	0.41	0.27	0.24	0.22	0.02
	4 级	0.27	0.20	0.39	0.04	0.25	0.25	0.00
	5 级	0.11	0.31	0.27	0.01	0.09	0.04	0.00
2020	1 级	0.08	0.12	0.42	0.35	0.42	0.37	0.03
	2 级	0.19	0.20	0.42	0.36	0.38	0.32	0.04
	3 级	0.19	0.21	0.32	0.17	0.31	0.26	0.03
	4 级	0.23	0.25	0.30	0.03	0.35	0.29	0.04
	5 级	0.08	0.33	0.26	0.03	0.07	0.03	0.04

时间上,1990—2020 年天北山盆系统碳储量影响因子的驱动机制呈清晰的逐年演进序列。1990 年,碳储量格局由人口密度( $X_5$ ,0.10~0.47)与 GDP( $X_6$ ,0.1~0.38)等社会经济因子主导,自然因子作用

微弱;至 2000 年,NDVI( $X_3$ ,0.26~0.46)解释力增强,与经济人口因子共同形成多维度强化驱动格局,同时夜间灯光出现微弱信号,标识人类活动影响加剧。2010 年,土地利用强度解释力达峰值( $X_4$ ,

0.40), NDVI( $X_3$ , 0.27~0.51)成为全局解释力最强因子;2020年,驱动模式发生本质转型,夜间灯光强度( $X_7$ , 0.03~0.04)解释力增强,与传统优势因子人口密度( $X_5$ , 0.07~0.42)、GDP( $X_6$ , 0.03~0.37)协同构成“社会经济强度-人类活动空间分布”二元驱动体系。

纵观全程,自然因子中NDVI始终承担关键驱动作用,而气候因子( $X_1$ 、 $X_2$ )解释力微弱,主要起支撑作用。

3.3.2 多因子探测 天山北坡山盆系统的山盆梯度碳储量演变是自然和人文多因子共同作用的结果。对7个单一因子进行交互探测,结果见图9。

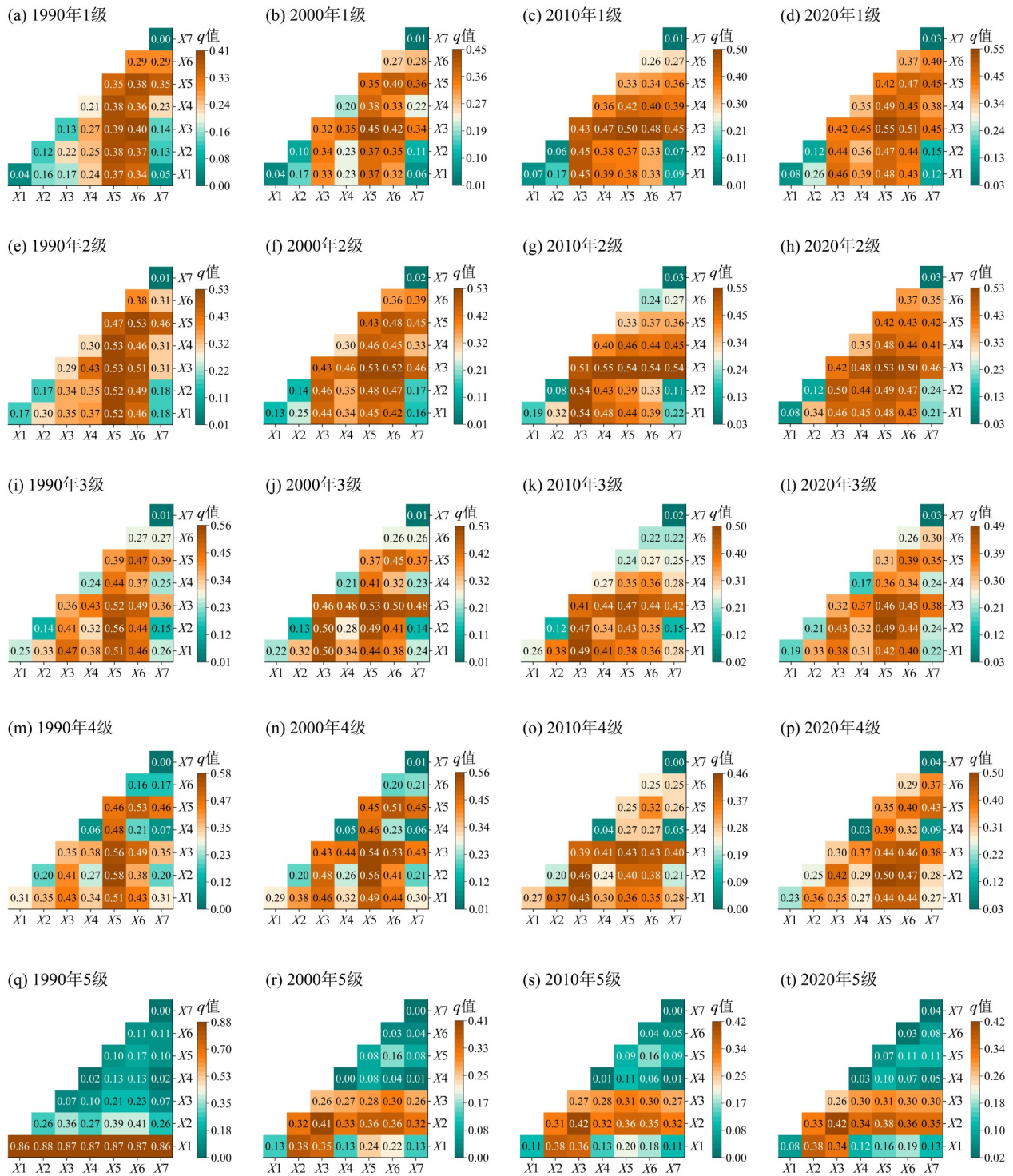


图9 梯度碳储量时空演变交互因子探测

Fig. 9 Spatio-temporal evolution and interactive factor detection of gradient carbon storage

1990—2020年,天北山盆系统碳储量影响因子的交互作用呈显著且动态的梯度分异特征。在低梯度(1级)绿洲核心区,人类活动因子( $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ )始终高度协同,形成持续稳定的强驱动,其交互作用强度普遍较高(如 $X_5 \cap X_6$ 的 $q$ 多高于0.45);因此,这些因子的协同效应主导了碳储量的空间分异。在中梯度(2~3级),驱动机制最为复杂且响应剧烈,自然因子与人文因子交互影响,水热条件( $X_1$ 、 $X_2$ )与人类活动因子多次出现交互峰值(如1990年第3级 $X_2 \cap X_5$ 的 $q$ 达0.56),且对生态政策响应迅速,如2010年退耕还林工程,导致土地利用强度( $X_4$ )的交互效应在2010年梯度2级达到全局峰值( $X_4 \cap X_3$ 的 $q$ 为0.549),凸显了该区域作为生态敏感前沿的地位。在中高梯度(4级),驱动力自2010年后呈衰减趋势,人文因子交互作用减弱,表现出从人类主导向自然过渡的典型特征;而在高梯度(5级),始终以自然因子内部交互为主导(1990年 $X_1 \cap X_2$ 的 $q$ 高达0.88),人类活动影响微弱且格局稳定,碳储量分异严格受自然本底控制。整体上,随着海拔升高,驱动机制由“高度人文协同”经“人地剧烈博弈”向“自然本底主导”逐级过渡,且演变速率依次递减,体现了山盆梯度对人类活动生态效应的约束与调节作用。

时间上,天北山盆系统碳储量驱动格局呈现明显的时序演进特征。1990年,社会经济因子主导全局,人口密度与GDP在梯度1~4与其他因子的交互解释力强,形成“经济-人口”双核驱动雏形;梯度5则主要由年均降水控制, $q$ 均大于0.86。2000年,NDVI和土地利用强度与其他因子的交互效应显著增强(如 $X_3 \cap X_4$ 的 $q$ 为0.48),与社会经济因子共同构建“经济-土地利用”双驱动格局,人类活动影响维度拓宽;梯度5中,年均气温与NDVI的交互作用开始凸显。2010年,土地利用强度的交互作用达到顶峰。至2020年,夜间灯光交互效应显著上升( $X_7 \cap X_5$ 、 $X_7 \cap X_6$ 的 $q$ 均大于0.42),标志着天北山盆系统进入多因子复合驱动的新阶段。纵观30年,NDVI始终作用明显。

## 4 讨论

### 4.1 碳储量时空格局的主导成因解析

1990—2020年,天北山盆系统碳储量呈现出

“先减后增”的总体趋势与“南高北低”的稳定空间格局。这一时空演变特征并非偶然,其背后是自然地理格局与阶段性人类活动共同作用的深刻反映。空间上,沿山盆梯度递减的条带状分布,清晰地体现了地形与水热条件对碳储量的基础性控制作用。巨大的海拔落差导致了水热条件的垂直分异,进而驱动山盆垂直带谱的形成,这从根本上决定了碳储量“南高北低”的空间本底。时间上,2000年成为碳储量趋势由降转升的关键拐点,这与我国退耕还林还草、西部大开发等重大生态工程的实施时间点高度吻合。

### 4.2 驱动力沿山盆梯度的分异性及演变

本研究发现,碳储量的时空动态存在显著的山盆梯度效应,其驱动力在不同梯度带上呈现出鲜明的异质性。通过综合山盆梯度与最优参数地理探测器方法,定量解析了这种分异规律发现:在绿洲-荒漠交错带这样的低地形梯度区,人类活动的扩张,土地利用转变和城镇化是碳储量变化的主导驱动力,表现为剧烈的动态变化和对政策响应的高度敏感性;在中地形梯度区,碳储量变化受自然条件与人类活动协同作用的共同影响;而在高海拔山区这样的高地形梯度区,自然过程(温度、降水等)则重新占据主导地位,碳储量表现出更强的稳定性。更为重要的是,驱动力的主导地位在过去30年并非一成不变,而是经历了从社会经济主导,到土地利用强度影响达到峰值,再转向社会经济与自然环境因素复杂交互的动态演变过程。这一演变路径深刻印证了天北山盆系统自1990年以来区域人地关系从剧烈扰动到逐步协调的演变特征。

### 4.3 模型适用性与不确定性分析

本研究在碳储量估算上存在一定不确定性。碳密度参数虽经本地化修正,但仍受环境动态变化及人类活动影响,且现有模型缺乏温度因素对土壤碳密度的定量校正(Davidson et al., 2006)。InVEST模型未纳入光合速率、土壤微生物活动等关键过程,也未充分考虑植被年龄与土地利用内部结构差异,可能影响空间格局的精确性。此外,以整体山盆系统为单元进行分析,未能体现市县尺度差异,未来将结合高精度采样与跨尺度嵌套研究,以提升估算准确性与政策适用性。

## 5 结论

本研究以天北山盆系统这一山地-绿洲-荒漠的梯度性地理系统为例,探究1990—2020年山盆梯度效应下天北山盆系统的碳储量时空演变格局与机理。研究结果揭示以下结论:

1)1990—2020年,天北山盆系统碳储量总体呈“先降后升”趋势,2000—2020年累计增长 $4.06\times 10^7$  t,耕地与草地增加、未利用地减少是碳储量回升的主要因素,反映出垦殖、造林与荒漠治理的积极影响。随着时间变化呈碳储量大、低值区减少,中值区扩张的态势。空间上呈南高北低和条带分布。

2)天北山盆系统碳储量与山盆梯度呈显著正相关。地均碳密度在1~3级梯度缓慢上升,在4~5级梯度急速增长;碳密度变化以稳定为主,增益面积随梯度上升而递减,揭示出人类活动与自然约束沿梯度此消彼长的空间博弈特征。

3)碳储量演变机制具有梯度异质性。低梯度受人文主导,中梯度为人地交互,高梯度受自然控制。时序上驱动模式由社会经济主导演进为“社会经济-夜间灯光”二元协同,标志着区域发展向精细化空间管控转型。植被与气候因子分别发挥核心调控与本底支撑作用,本研究可为差异化生态治理提供依据。

### 参考文献:

- 陈光水,杨玉盛,刘乐中,等,2007.森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J].亚热带资源与环境学报,2(1):34-42.
- 郭炳良,唐相龙,何悦铭,2026.兰州市碳储量地形梯度效应时空演变及影响因素[J].环境科学,47(1):396-407.
- 贺一聪,陶贞,梁誉正,等,2024.粤东北山地生态系统植被及其碳储量时空变化[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),63(3):1-11.
- 姜安静,董乙强,周时杰,等,2025.草地植物多样性沿海拔梯度分布特征及其驱动因素——以天山北坡东段为例[J].草业学报,34(3):29-40.
- 柯健,咎梅,叶茂,等,2025.伊犁地区陆地生态系统碳储量变化及影响因素[J].中山大学学报(自然科学版中英文),64(4):91-101.
- 刘昊,刘威帆,万猛虎,等,2025.基于PLUS-InVEST-OPGD模型的宁夏回族自治区碳储量时空演变分析及预测[J/OL].环境科学.(2025-08-22).<https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjxk.202504166>.
- 卢雅焱,徐晓亮,李基才,等,2022.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,39(6):1896-1906.
- 吕雅淑,杨涵,卡木然·买买提艾力,等,2025.气候变化与人类活动对天山北坡经济带植被覆盖度的协同影响[J/OL].环境科学.(2025-05-27).<https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjxk.202502071>.
- 如克亚·热合曼,阿里木江·卡斯木,希丽娜依·多来提,等,2022.天山北坡城市群碳储量时空变化及预测研究[J].中国环境科学,42(12):5905-5917.
- 温羽婧,李锐,2025.基于地形梯度的丘陵地区碳储量时空分异及分区研究——以长株潭城市群为例[J].生态环境学报,34(9):1373-1385.
- 吴芳,孙慧兰,田中平,等,2024.天山西部山地森林土壤有机碳沿海拔的分布格局及环境驱动因素[J].应用与环境生物学报,30(4):715-725.
- 夏晓莹,李思瑶,王杰,等,2023.地形因子对天山北坡天山云杉林土壤有机碳的影响[J].新疆农业科学,60(4):965-973.
- 薛杨,马松梅,雷诚,等,2025.基于PLUS-InVEST模型的新疆生产建设兵团碳储量时空演变及预测[J].石河子大学学报(自然科学版),43(3):354-365.
- 杨涵,孙慧兰,田中平,等,2024.伊犁河谷山地土壤养分化学计量比及其影响因素[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),63(3):60-70.
- 袁国映,1993.新疆山地垂直自然带的地区差异及经济意义[J].新疆环境保护,15(3):14-17.
- 张百平,谭娅,莫中国,2004.天山数字垂直带谱体系与研究[J].山地学报,22(2):184-192.
- 张斌,夏秋月,2023.武汉城市圈碳储量的地形梯度效应及脆弱性[J].水土保持研究,30(5):443-452.
- 张龙江,陈国平,林伊琳,等,2024.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,40(22):223-233.
- 张鹏岩,杨丹,刘宇,等,2025.基于复合生态系统视角的土地利用变化碳源/汇效应研究进展[J].生态学报,45(5):2058-2073.
- 张平平,李艳红,殷浩然,等,2022.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,37(5):1183-1197.
- 张顺鑫,吴子豪,闫庆武,等,2024.基于PLUS-InVEST模型的天山北坡生态系统碳储量时空变化与预测[J].干

- 旱区研究, 41(7): 1228-1237.
- 张禹森, 董春, 2023. 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, 48(8): 153-162.
- 张志超, 姚兵, 2025. 2000—2020年粤港澳大湾区碳储量时空变化特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学(中英文), 23(2): 239-248.
- 赵兵杰, 高鹏远, 王春博, 等, 2025. Sentinel-2遥感影像在天山北坡乔木林地上碳储量估算中的应用[J]. 湖北农业科学, 64(6): 190-196.
- 赵胤程, 覃盟琳, 庞雅月, 等, 2022. 基于FLUS-InVEST模型的北部湾城市群生态空间碳汇演变模拟及驱动因素研究[J]. 水土保持通报, 42(3): 345-355.
- ALAM S A, STARR M, CLARK B J F, 2013. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study[J]. *J Arid Environ*, 89: 67-76.
- DAVIDSON EA, JANSSENS IA, 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 440(7081): 165-173.
- FANG J, CHEN A, PENG C, et al, 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 292(5525): 2320-2322.
- GIARDINA C P, RYAN M G, 2000. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. *Nature*, 404(6780): 858-861.
- HE C, ZHANG D, HUANG Q, et al, 2016. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models [J]. *Environ Model Softw*, 75: 44-58.
- HEY, MA J, ZHANG C, et al, 2023. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Guilin based on FLUS and InVEST models[J]. *Remote Sens*, 15(5): 1445.
- HOUGHTON R A, HOBBIIE J E, MELILLO J M, et al, 1983. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere[J]. *Ecol Monogr*, 53(3): 235-262.
- LI Y, LUO H, 2023. Trade-off/synergistic changes in ecosystem services and geographical detection of its driving factors in typical karst areas in Southern China [J]. *Ecol Indic*, 154: 110811.
- LIU X, YANG H, LI X, et al, 2024. Impacts of land-use change on past and future carbon stocks in the Tianshan north slope economic belt [J]. *Land Degrad Dev*, 35(18): 5860-5873.
- METZGER M J, ROUNSEVELL M D A, ACOSTA-MICHLIK L, et al, 2006. The vulnerability of ecosystem services to land use change [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 114(1): 69-85.
- MUGAGGA F, KAKEMBO V, BUYINZA M, 2012. Land use changes on the slopes of Mount Elgon and the implications for the occurrence of landslides [J]. *Catena*, 90: 39-46.
- PIAO S, FANG J, CIAIS P, et al, 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 458(7241): 1009-1013.
- POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, et al, 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 7(4): 811-841.
- SUN B, DU J, CHONG F, et al, 2023. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Yellow River Basin [J]. *Remote Sens*, 15(15): 3886.
- SUN W, LIU X, 2020. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China [J]. *For Ecosyst*, 7: 4.
- WANG J, FENG L, PALMER P I, et al, 2020. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data [J]. *Nature*, 586(7831): 720-723.
- WANG N, CHEN X, ZHANG Y, et al, 2024. Integrated effects of land use and land cover change on carbon metabolism: Based on ecological network analysis [J]. *Environ Impact Assess Rev*, 104: 107320.
- WOODWELL G M, WHITTAKER R H, REINERS W A, et al, 1978. The biota and the world carbon budget [J]. *Science*, 199(4325): 141-146.
- WU S, LI J, ZHOU W, et al, 2018. A statistical analysis of spatiotemporal variations and determinant factors of forest carbon storage under China's Natural Forest Protection Program [J]. *J For Res*, 29(2): 415-424.
- ZHU W, ZHANG X, ZHANG J, et al, 2019. A comprehensive analysis of phenological changes in forest vegetation of the Funiu Mountains, China [J]. *J Geogr Sci*, 29(1): 131-145.