

伊犁地区陆地生态系统碳储量变化及影响因素*

柯健¹, 咎梅^{1,2}, 叶茂¹, 刘云同¹, 杨顺法¹, 薛聪¹, 周佳¹, 翟莉莉¹

1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054

2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要: 碳储量变化对陆地生态系统至关重要。为研究陆地生态系统碳储量变化, 以伊犁地区为研究对象, 基于2000—2020年土地利用数据, 利用InVEST模型模拟了该区域的碳储量时空变化特征, 并采用地理探测器和多元回归残差分析方法, 定量分析了影响碳储量的驱动因子及其贡献。研究表明: 1) 2000—2020年, 伊犁地区碳储量年均减少8.89 Tg, 呈现从南部和北部山区向中部平原递减的空间分布趋势。2) 伊犁地区碳储量变化是多种因子共同作用的结果, 其中高程是首要驱动因子, 其解释力(q)为0.469; 降水与植被归一化指数的交互作用对碳储量影响最为显著。3) 气候变化和人类活动对伊犁地区碳储量增加部分的贡献率分别为48.16%和51.84%。气候变化贡献率超过80%的区域主要分布在南部和北部森林, 而人类活动贡献率超过80%的区域则集中分布在中部和东部。碳储量减少的区域中, 约8.60%由气候变化和人类活动共同作用导致, 主要分布在南部和北部森林。整体上, 碳储量减少的区域明显大于增加的区域。研究结果可为伊犁地区碳循环研究、碳管理政策制定及生态保护提供科学依据。

关键词: 碳储量; InVEST模型; 地理探测器; 残差分析; 伊犁地区

中图分类号: K909 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2025)04-0091-11

Carbon storage changes and influencing factors in terrestrial ecosystems of Ili region

KE Jian¹, ZAN Mei^{1,2}, YE Mao¹, LIU Yuntong¹, YANG Shunfa¹, XUE Cong¹, ZHOU Jia¹, ZHAI Lili¹

1. School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2. Xinjiang Arid Area Lake Environment and Resources Laboratory, Urumqi 830054, China

Abstract: Changes in carbon storage are crucial for understanding terrestrial ecosystem dynamics. To investigate the changes in terrestrial ecosystem carbon storage, this study focused on the Ili region as the research area. Based on land use data from 2000 to 2020, the InVEST model was used to simulate the spatiotemporal characteristics of carbon storage in the study area. Geodetector and multiple regression residual analysis methods were employed to quantitatively analyze the driving factors affecting carbon storage and their contributions. The results indicate that: 1) From 2000 to 2020, the annual average carbon storage in the Ili region decreased by 8.89 Tg, showing a spatial distribution trend decreasing from the southern and northern mountainous areas towards the central plains. 2) The changes in carbon storage in the Ili region are affected by multiple factors, with elevation being the

* 收稿日期: 2024-08-25 录用日期: 2025-03-20 网络首发日期: 2025-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(42261013); 第三次新疆综合科学考察课题(2021xjkk0406);

新疆维吾尔自治区自然科学基金(2023D01A49)

作者简介: 柯健(2000年生), 男; 研究方向: 植被碳循环; E-mail: 107622024210614@stu.xjnu.edu.cn

通信作者: 咎梅(1979年生), 女; 研究方向: 植被遥感参数反演; E-mail: 107622007010058@xjnu.edu.cn

全文阅读



ZR20240263

primary driving factor, having an explanatory power (q) of 0.469. The interaction between precipitation and the normalized difference vegetation index (NDVI) had the most significant impact on carbon storage. 3) The contributions of climate change and human activities to the increase in carbon storage in the Ili region were 48.16% and 51.84%, respectively. Areas where climate change contributed more than 80% were mainly distributed in the southern and northern forest regions, while areas where human activities contributed more than 80% were concentrated in the central and eastern parts. In regions where carbon storage decreased, approximately 8.60% of the reduction was caused by the combined effects of climate change and human activities, primarily located in the southern and northern forest regions. Overall, the areas with decreased carbon storage were significantly larger than those with increased carbon storage. The findings provide a scientific basis for carbon cycle research, carbon management policy formulation, and ecological protection in the Ili region.

Key words: carbon storage; InVEST model; geodetector; residual analysis; Ili region

在全球气候变化背景下, 温室气体排放激增是导致环境恶化的主要因素之一(Fang et al., 2011; Li et al., 2022), 对生态系统、人类生活及社会经济产生了深远影响(Piao et al., 2009; Pan et al., 2011; 杨旭等, 2022)。减少碳排放已成为全球共识, 是实现可持续发展的关键目标(祁迷等, 2023; 郑慧玲等, 2024)。陆地生态系统在全球碳循环中扮演着重要角色, 在调节全球碳平衡、减缓气候变化等方面发挥重要作用(尚二萍等, 2016; 徐自为等, 2018; 韩楚翘等, 2024)。研究表明, 全球约 1/3 的碳排放来自陆地生态系统, 其碳储量的分布、变化及驱动机制具有显著的地域差异和复杂性(周绪等, 2007; 雒舒琪等, 2023; 邹桃红等, 2023)。

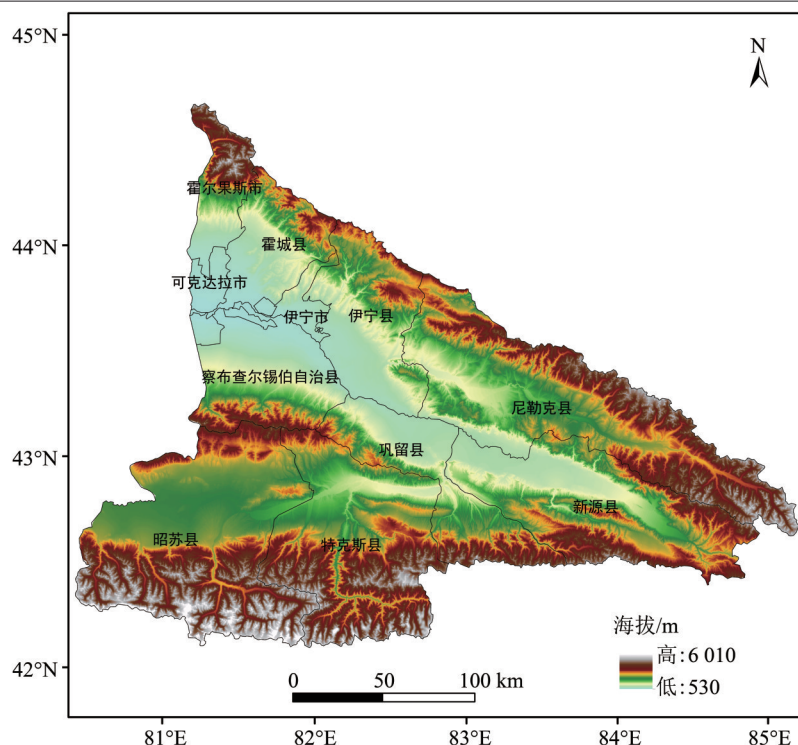
近年来, 碳储量变化及其驱动机制研究取得了重要进展, 多项研究表明, 碳储量呈现显著的时空异质性。松花江流域碳储量在 1986—2022 年整体呈下降趋势, 但受林地扩增影响在 1994、2002 和 2018 年出现阶段性增长(张智洋等, 2024); 塔里木河流域则因天然林地和草地萎缩导致碳储量持续下降(田梓祎等, 2024); 伊犁地区 2005—2015 年, 植被碳储量的下降与土地利用转型密切相关(位盼盼等, 2020)。上述研究均表明, 土地利用变化作为关键人为驱动因子对碳储量产生显著影响。在自然因子方面, 已有研究普遍证实了降水、植被指数(曾庆雨等, 2024; 孔蕊, 2020)、高程及气温(解铭威等, 2025)等自然要素对碳储量格局具有决定性作用。也有研究通过多模型融合方法进一步揭示了自然因子对碳储量分布的调控机制(傅楷翔等, 2024)。然而, 现有研究对人类活动与

自然变化协同作用对碳储量动态变化的影响机制研究较少。因此, 未来研究需综合考虑人类活动与自然变化的协同作用, 进而更为全面、准确地揭示碳储量变化的驱动机制。

伊犁地区作为丝绸之路经济带的关键枢纽, 其生态系统碳储量动态变化不仅影响区域生态安全, 对中亚跨境生态治理也具有示范意义。近年来, 也有学者对伊犁地区的碳储量变化开展了研究, 绘制了伊犁地区 2000、2010 和 2020 年的碳储量分布图(曹梦迪等, 2023), 但并未分析影响碳储量变化的原因。因此, 本研究以伊犁地区为对象, 基于 2000—2020 年的 5 期土地利用数据, 运用 InVEST 模型量化分析碳储量变化规律, 并通过多元回归残差分析模型分离并量化了气候变化与人类活动对碳储量的独立及协同影响, 以期对伊犁乃至整个干旱地区的碳储量管理提供科学依据。

1 研究区域概况

伊犁地区位于 80°09'E—91°01'E, 40°14'N—49°10'N(图 1), 东北部与俄罗斯、蒙古国接壤, 西部与哈萨克斯坦交界。该地区气候温和湿润, 年均气温 10.5 °C, 年降水量约 245 mm, 无霜期 112~177 d, 日照时数约 2 776 h(殷剑虹等, 2005)。伊犁河流域年均地表径流 $171 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占新疆水资源量的 20%, 水源涵养区面积占全疆的 38%。伊犁地区土地总面积约为 55 343 km², 东、南、北三面环山, 海拔 478~6 318 m, 高差显著, 分布着草地、林地和耕地(谈旭等, 2023)。



审图号为GS(2024)0650号, 底图边界无修改。

图1 研究区域位置示意图

Fig. 1 Location map of the study area

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究选取2000、2005、2010、2015和2020年5期土地利用数据(30 m分辨率)、GDP与人口密度数据(1 km分辨率), 皆来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)。土地利用数据按国家分类系统划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类。同时期的年均温度和降水数据(分辨率1 km)来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>), 归一化植被指数(NDVI, normalized difference vegetation index)数据(500 m分辨率)取自MODIS数据集的MOD13A3(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST模型估算碳储量 本研究利用InVEST模型的碳模块, 模拟研究区域的生态系统碳储量, 该模块可用于评估和预测土地生态系统碳储存能力。本研究将生态系统碳储量分为地面生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机碳库4个部分(徐丽等, 2019; 刘洋等, 2021), 这4类碳库是生态系统碳循环的重要组成部分。碳密度总和(C_k)计算方法如下(史名杰等, 2021)

$$C_k = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} + C_{i\text{-dead}},$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{k=1}^n A_k \times C_k,$$

式中 $C_{i\text{-above}}$ 为地面生物量碳库碳密度, $C_{i\text{-below}}$ 为地下生物量碳库碳密度, $C_{i\text{-soil}}$ 为土壤碳库碳密度, $C_{i\text{-dead}}$ 为死亡有机碳库碳密度, 碳密度单位为 Mg/hm^2 ; C_{total} 为总碳储量(Mg), A_k 为每种土地类型覆盖的总面积(hm^2), n 为土地利用类型总数。

一些学者在碳储量密度研究领域取得了显著进展(李克让等, 2003; 朱超等, 2012; 王鑫等, 2017; Spawn et al., 2020)。其中史名杰等(2021)采用碳密度与气候因子的线性相关性方程(陈光水等, 2007; Alam et al., 2013; 朱文博等, 2019)对伊犁地区碳密度进行了修正并证明其具有较高的精度, 因此本研究采用其修正后的碳密度数据进一步估算研究区域的碳储量。

2.2.2 地理探测器揭示影响因素 地理探测器的核心功能是揭示空间分异性并定量识别其驱动因素(王劲峰等, 2017), 包含因子探测、交互作用探测、风险区域探测和生态探测4个模块。本研究使用因子探测和交互作用探测模块, 分析影响研究区域陆地生态系统碳储量的驱动因素, 并评估因子如何共同作用形成空间分异性规律。

本研究中, 因子探测器用于解释不同因子对碳储量的影响程度(q), 参考王劲峰等(2017)的公式计算

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2,$$

式中 $h=1, 2, \dots, L$ 为不同因子类别, N_h 和 N 分别为 h 层和全区的单元数, σ_h^2 和 σ^2 分别为 h 层和全区的方差; 本研究中 q 的取值区间为 $[0, 1]$ 。

本研究中, 交互作用探测用于评估 2 个风险因子 X_1 和 X_2 共同作用时对碳储量的影响, 判断是否产生协同效应, 即联合作用是否比单独作用更显著地增强或减弱对碳储量的解释能力。同时, 还能分析 X_1 和 X_2 对碳储量的影响是否相互依赖。若交互作用不显著, 表明两者对碳储量的影响独立; 若显著, 则说明因子间存在依赖或调节关系。

2.2.3 多元回归残差分析 本研究通过多元回归残差分析方法, 定量评估了人类活动与气候变化对研究区域生态系统碳储量变化的影响程度 (Evans et al., 2004; Wessels et al., 2007)。该方法有 3 个关键步骤: 1) 利用碳储量的年度变化数据与对应的气温和降水序列, 构建以碳储量为因变量, 气温和降水为自变量的多元线性回归模型; 2) 根据所得到的回归模型及相应参数, 推算出碳储量的气候影响预测值(C_{clim}); 3) 通过计算实际碳储量(C_{obs})与 C_{clim} 之间的差异, 得出碳储量残差(C_{hum})。参照金凯等(2020)的公式计算

$$C_{\text{clim}} = a \times T + b \times P + c,$$

$$C_{\text{hum}} = C_{\text{obs}} - C_{\text{clim}},$$

式中 C_{clim} 和 C_{obs} 分别为基于回归模型的气候变化影响下的碳储量预测值和基于遥感影像估算的实际碳储量; a 、 b 和 c 为求取碳储量预测值的模型参数; T 和 P 分别为相应的气温($^{\circ}\text{C}$)和降水量(mm); C_{hum} 为残差(人类活动影响下的碳储量)。

在此基础上根据运用统计学方法计算出气候变化和人类活动分别对碳储量变化的相对影响权重, 进而确定气候变化(clim)和人类活动(hum)对碳储量变化中的相对贡献率和重要性 (Sun et al., 2015; 金凯等, 2020)。 $k_{\text{slope, obs}}$ 、 $k_{\text{slope, clim}}$ 和 $k_{\text{slope, hum}}$ 分别指基于碳储量实际值、碳储量预测值(气候变化)及碳储量残差值(人类活动)计算得到的对应斜率。当 $k_{\text{slope, obs}}$ 与 $k_{\text{slope, clim}}$ 同为正值或负值, 而与 $k_{\text{slope, hum}}$ 正负相反时, 则 clim 贡献率为 100%, hum 贡献率为 0%; 反之, 则 hum 贡献率为 100%, clim 贡献率为

0%。当 $k_{\text{slope, obs}}$ 、 $k_{\text{slope, clim}}$ 和 $k_{\text{slope, hum}}$ 均为正值或均为负值时, 则 clim 贡献率为 $k_{\text{slope, clim}}/k_{\text{slope, obs}}$, hum 贡献率为 $k_{\text{slope, hum}}/k_{\text{slope, obs}}$ 。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空分布

由图 2 可见, 伊犁地区土地利用类型以耕地、林地和草地 3 种植被类型为主。2000—2020 年, 草地面积较大, 占研究区域总面积的 58% 以上。伊犁地区土地利用呈现不同的时间变化趋势。2000—2020 年, 耕地面积增加了 25.8%, 林地面积减少了 43.2%, 草原面积增加了 5%, 水域面积减少了 54.7%, 建设用地面积增加了 44.8%, 未利用地面积也有所增加。其中, 耕地的大规模扩张导致特克斯河附近林地面积明显减少。

3.2 碳储量时空分布

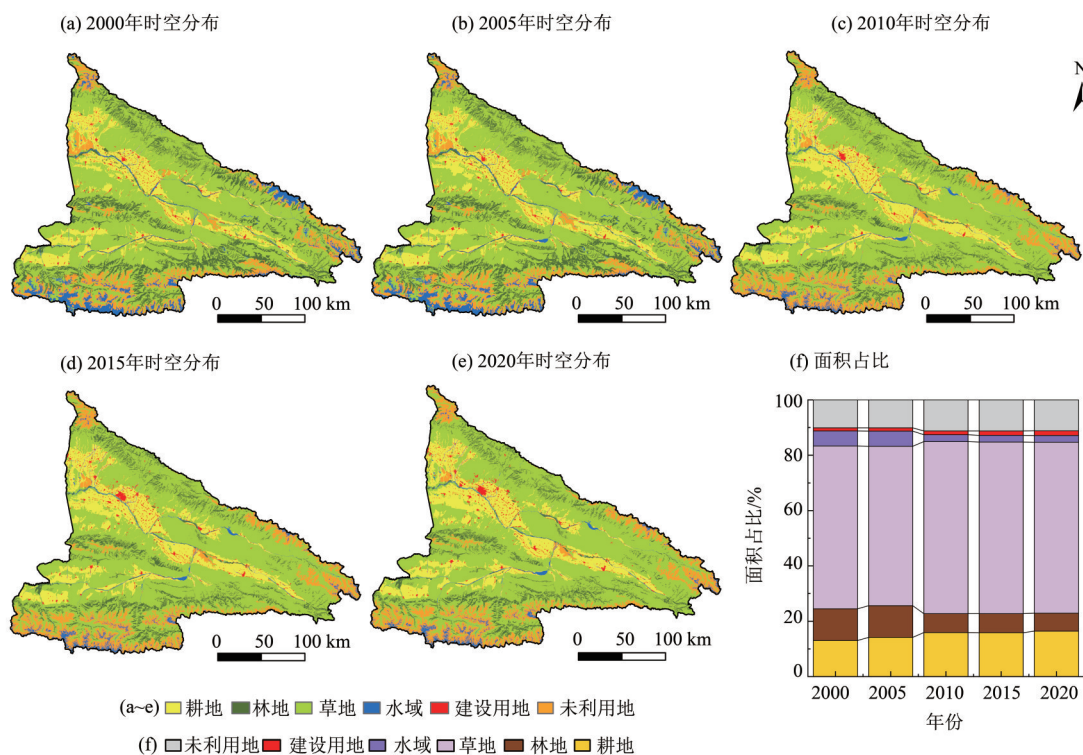
由图 3 可知, 利用 InVEST 模型估算得到的伊犁地区 2000—2020 年陆地生态系统碳储量呈逐年下降趋势; 相比 2000 年, 2020 年伊犁地区总碳储量减少了 4%。伊犁地区碳储量的空间分布表现出高值区与低值区沿东西方向相间分布的特征, 其中高值区分布在南部和北部山区的森林和草地区域, 而低值区则集中分布在中部平原附近。相比 2000 年, 2020 年林地面积的减少直接导致研究区域碳储量减少了 97.34 Tg。这是因为林地具有较高的碳密度, 而当林地转变为草地、农田或建设用地等碳密度较低的土地类型时, 其固定和储存碳的能力会显著降低。因此, 林地向其他土地类型的转变是导致研究区域碳储量减少的重要原因。

3.3 土地利用类型转换和碳储量变化

由图 4 可知, 相比 2000 年, 2020 年研究区耕地向草地转移的面积为 457.81 km^2 , 耕地向建设用地转移的面积为 310.83 km^2 ; 林地向草地转移面积最大 (3 231.31 km^2), 林地向未利用地转移面积为 147.70 km^2 ; 草地面积相对稳定, 但也有部分草地向耕地和建设用地转移; 水域向未利用地转移的面积较大 (1 606.35 km^2); 建设用地主要由耕地转换而来, 面积增加了 162.06 km^2 ; 未利用地向草地转移较多, 面积为 1 610.04 km^2 。土地利用类型的转变直接影响碳储量动态变化, 2000—2020 年伊犁地区陆地生态系统碳储量的增幅小于降幅。

3.4 碳储量影响因子探测

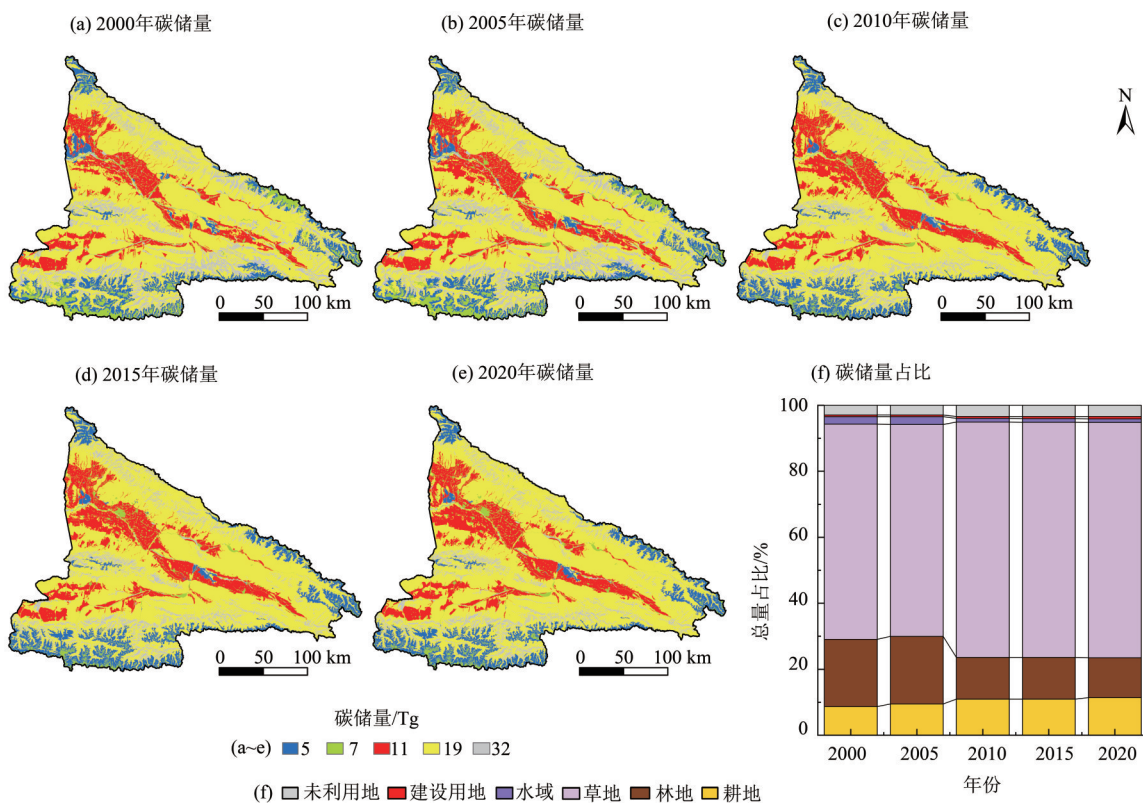
利用 ArcGIS 软件将研究区域 2000、2005、



审图号为GS(2024)0650号, 底图边界无修改。

图2 土地利用变化时空分布及面积占比

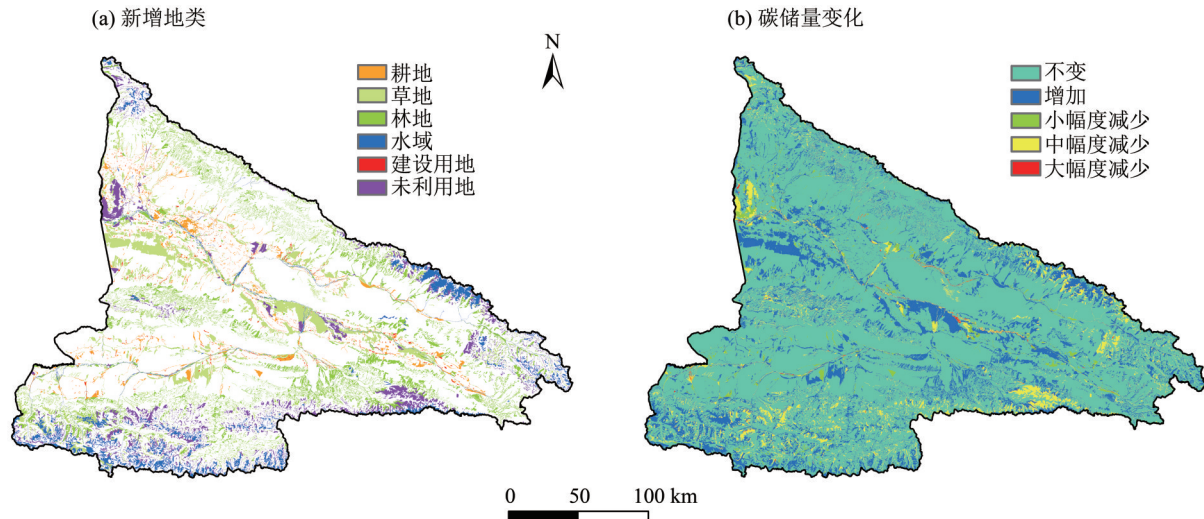
Fig. 2 Spatiotemporal distribution and area proportions of land use changes



审图号为GS(2024)0650号, 底图边界无修改。

图3 伊犁地区碳储量时空分布及各个地类的碳储量占比

Fig. 3 Spatiotemporal distribution of carbon storage and its proportion by each land category



审图号为GS(2024)0650号, 底图边界无修改。

图4 新增地类变化及碳储量变化

Fig. 4 Changes in newly added land categories and carbon storage

2010、2015 和 2020 年的坡度 (SLOPE)、高程 (DEM)、降水 (PRE)、温度 (TMP)、植被覆盖指数 (NDVI)、生产总值 (GDP) 和人口指数 (POP) 7 个指标离散化处理后, 输入地理探测器进行因子探测分析, 探测结果分为首要驱动因子 ($q \geq 0.4$)、重要驱动因子 ($0.2 \leq q < 0.4$) 和基础驱动因子 ($q < 0.2$) 3 个等级。由表 1 可知, DEM 和 TMP 是影响碳储量的主要因子。2000—2020 年, DEM 的 q 平均值最高 (0.469), 因其影响光照、水分和气候, 进而影响植被生长与分布; TMP 的 q 平均值为 0.442, 排第二。NDVI 是重要驱动因子, q 平均值排第三。表 1 中的 P 值表明, DEM、NDVI 和 TMP 在 5 个时期对碳储量均存在极显著影响。

由图 5 可知, 双因子的交互作用对伊犁地区碳储量的影响显著, 强于单因子作用, 交互作用类型均为双因子增强或非线性增强。对 5 个时期交互探测结果排名前三的 16 组交互项分析显示, DEM 出现 10 次, NDVI 出现 9 次, TMP 出现 6 次, PRE 出现 4 次, GDP 出现 3 次。从 2000—2020 年相关系数均值来看, DEM、NDVI 和 TMP 排名前三, 表明这 3 个因子与其他因子的交互作用对碳储量的影响最大。此外, PRE 对碳储量也有重要影响, 而 GDP 和 POP 则起到正向作用。进一步分析每年交互探测结果为双因子增强的前三组因子发现, $PRE \cap NDVI$ 出现次数最多 (5 次), 说明其交互作用对伊犁地区碳储量的影响最为显著。

表 1 影响伊犁地区碳储量的单因子重要性及显著性¹⁾

Table 1 Importance and significance of single factors affecting carbon storage in Ili region

指示 代码	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年		平均值	
	q	P	q	P	q	P	q	P	q	P	q	P
SLOPE	0.081	0.025*	0.037	0.004**	0.078	0.009**	0.073	0.000**	0.031	0.045*	0.114	0.000**
DEM	0.322	0.000**	0.515	0.000**	0.410	0.000**	0.476	0.000**	0.517	0.000**	0.469	0.000**
GDP	0.143	0.000**	0.102	0.002**	0.072	0.000**	0.047	0.068	0.032	0.120	0.061	0.000**
PRE	0.044	0.020*	0.197	0.000**	0.075	0.000**	0.176	0.000**	0.222	0.000**	0.144	0.000**
NDVI	0.220	0.000**	0.221	0.000**	0.158	0.000**	0.187	0.000**	0.203	0.000**	0.215	0.000**
POP	0.143	0.000**	0.212	0.000**	0.063	0.000**	0.199	0.000**	0.020	0.568	0.060	0.018*
TMP	0.315	0.000**	0.481	0.000**	0.358	0.000**	0.439	0.000**	0.497	0.000**	0.442	0.000**

1) *为差异显著, **为差异极显著。

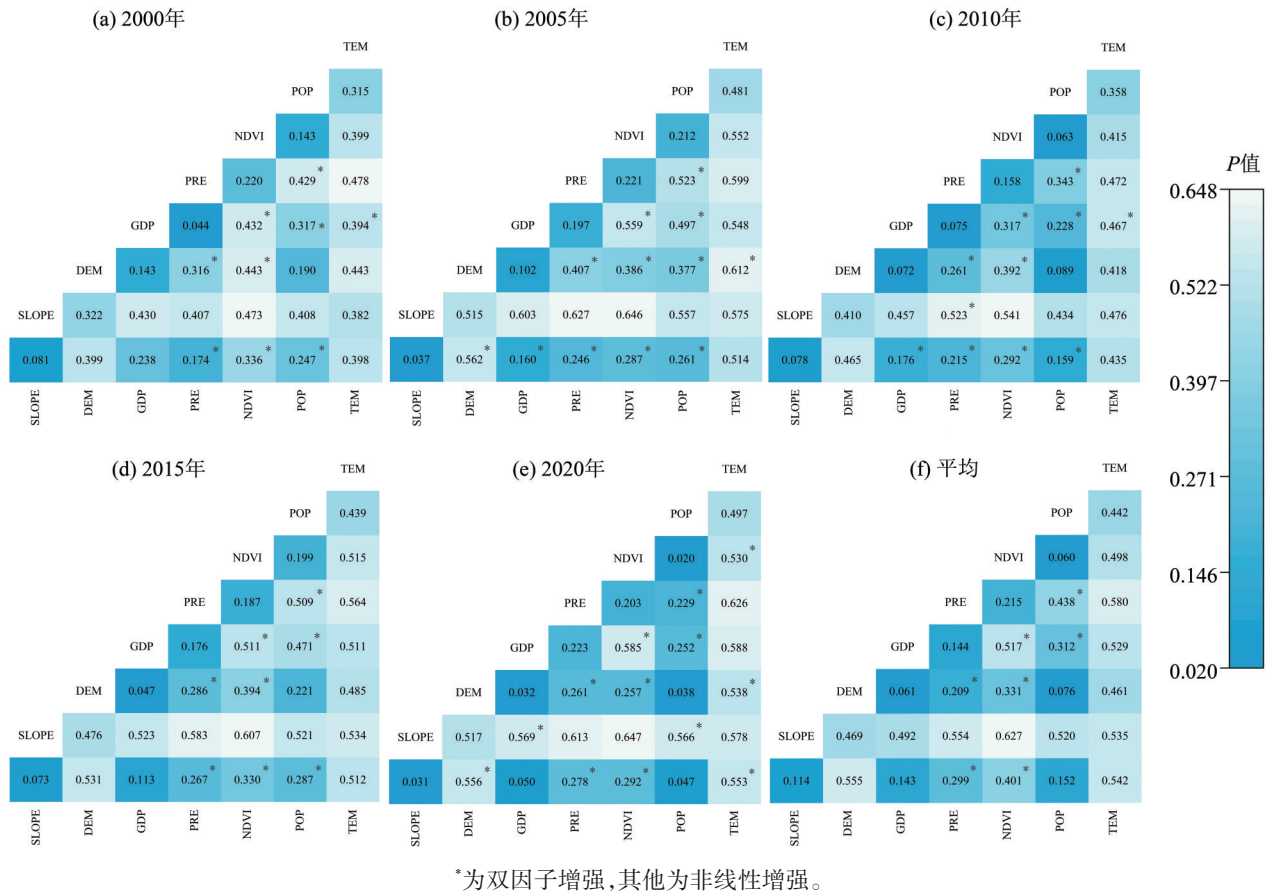
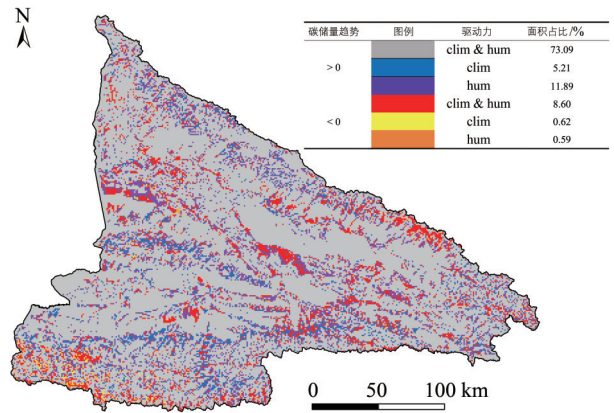


图5 伊犁地区交互探测结果
Fig. 5 Interactive detection results in Ili region

3.5 人为与自然因素对碳储量的贡献

据图6所示, 2000—2020年伊犁地区碳储量变化是气候变化与人类活动共同作用的结果。约73.09%区域碳储量的增加由两者共同驱动。在南部和北部林草区域(占总面积的5.21%), 自然因素(气候)是碳储量增加的主导力量; 而在中部平原区域(占总面积的11.89%), 人类活动促进了碳储量增加。此外, 约8.6%的区域因气候变化与人类活动的共同作用导致碳储量减少。相比之下, 由气候变化或人类活动单独作用导致碳储量减少的区域占比较小, 分别为0.62%和0.59%, 且呈分散分布。

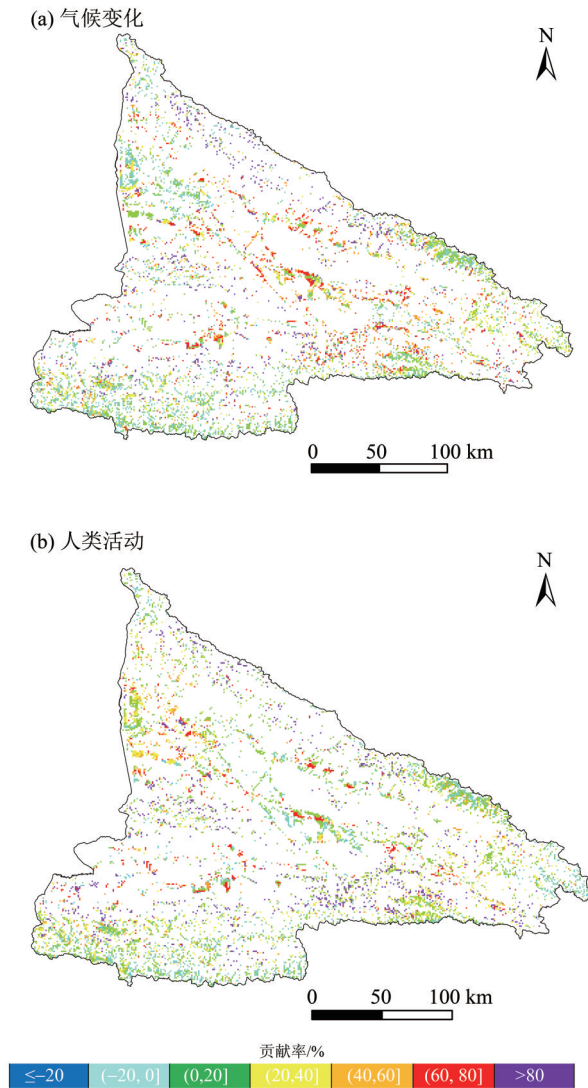
根据图7所示, 伊犁地区气候变化对碳储量正向影响的区域占气候变化影响总面积的74.26%。其中, 气候变化的贡献率在0%~20%和20%~40%的区域占43.18%, 而贡献率超过80%的区域主要位于南部和北部山地的森林区域, 占10.82%; 气候变化对碳储量负向影响的区域占25.74%。人类活动对碳储量正向影响的区域占其



审图号为GS(2024)0650号, 底图边界无修改。

图6 2000—2020年伊犁地区碳储量变化趋势
Fig. 6 Trends of carbon storage in Ili region from 2000 to 2020

影响总面积的79.92%, 其中贡献率在0%~20%的区域占比超过30%, 贡献率超过80%的区域主要分布在伊犁地区的中部和东部。人类活动负向影响的区域占20.08%, 其空间分布与气候变化相



审图号为GS(2024)0650号, 底图边界无修改。

图7 气候变化和人类活动对碳储量的贡献率空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of contribution rates of climate change and human activities to carbon storage

似。综合计算得出, 气候变化和人类活动对伊犁地区碳储量增加的贡献分别为 48.16% 和 51.84%。

4 讨论

4.1 碳储量变化原因分析

伊犁地区不同土地利用类型的碳密度从高到低依次为林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用地, 王春晓等(2024)的研究表明, 森林是陆地生态系统最大的碳库与本研究得出的林地碳密度最高的结果相符。当森林转变为草地或耕地时, 储存在植物和土壤中的碳会以 CO₂ 的形式释放到大气中, 削弱生态系统的碳储存能力(田志会等,

2015), 尤其在森林面积快速减少时, 这种效应更为显著。伊犁地区森林向草地和耕地的转变可能是其碳储量变化的关键因素。李若玮等(2021)利用 InVEST 模型对青藏高原碳储量进行研究, 发现模拟数据与实测数据高度吻合。Aldrian et al.(2003)在对印度尼西亚通唐流域的研究中, InVEST 模型的相关系数达 0.95, PMARE 指数为 12.84%, 决定系数为 0.901 1, 验证了模型的高精度。史名杰等(2021)结合 MCE-CA-Markov 与 InVEST 模型, 发现伊犁谷地的碳储量从 2000 年的 1 106.95 Tg 降至 2020 年的 1 059.56 Tg, 与本研究使用 InVEST 模型估算结果 (2000 和 2020 年分别为 1 106.60 和 1 062.14 Tg) 高度一致, 表明研究区域碳储量呈下降趋势, 验证了本研究具有较高的准确性。通过 InVEST 模型分析发现, 2020 年伊犁地区碳储量较 2000 年累计减少了 44.46 Tg。此外, 人口增长导致建设用地扩张, 加剧了对森林和草地的破坏。柯新利等(2019)的研究表明, 湖北省城市扩张导致 40.09 Tg 碳储量损失。上述结果均表明, 城市和耕地扩张是区域碳储量减少的主要驱动因素。

4.2 碳储量变化趋势及其影响因素

本研究发现, 单因子分析中 DEM 和 TMP 对伊犁地区的碳储量影响较大, 而人口密度和 GDP 等人为因子的影响不显著, 这与已有研究认为人口密度和 GDP 是主要驱动力的结论有所不同(毛永发等, 2023; 石晶等, 2024)。傅楷翔等(2024)也指出, 人口密度和 GDP 对新疆碳储量时空分异的驱动力较低。刘天弋等(2023)的研究表明, 伊犁河谷植被覆盖度主要受气温、植被类型和海拔影响, 解释力超过 40%。根据图 2 和图 3 所示, 伊犁地区植被(耕地、草地和林地)碳储量占总碳储量的 94%, 植被生长状况可直接决定碳储量。植被类型、气温和 DEM 等因素通过影响植被生长, 进而影响区域碳储量。交互作用分析表明, DEM、PRE、TMP、NDVI 等自然变量与人口密度、GDP 等社会经济指标之间存在显著交互作用, 通过复杂的生态-经济过程, 共同调节碳储量分布格局。其中, PRE∩NDVI 的交互作用出现次数最多, 对碳储量的影响最为显著。综上所述, 伊犁地区碳储量的时空变化是多种因子共同作用的结果, 未来研究需综合考虑各驱动因素, 进行多元化定量分析。

4.3 碳储量变化空间差异及人类活动与气候变化的影响

本研究通过残差分析发现,人类活动和气候变化对伊犁地区碳储量的影响存在显著差异。人类活动的正向贡献主要体现在南部和北部的低缓山坡地带,与孙国军等(2020)在研究伊犁地区植被增加的区域集中在察布查尔县、伊宁县和伊宁市南部和北部的低缓山坡地带的结果相符。这些区域耕地和草地面积增加可能与人工复垦及国家政策密切相关(陈美景等,2021)。而人类活动的负向贡献主要体现在南部和北部的森林区,2000—2020年该区域森林面积减少,耕地和草地面积增加。气候变化导致碳储量减少的区域主要分布在中部平原及南部和北部的森林区。中部平原的耕地和草地在近20年因融雪型洪水灾害导致水土流失和草地退化(田华等,2011;阿不力米提江·阿布力克木等,2015;刘鑫等,2016)。据新疆维吾尔自治区统计局的数据显示,2005—2020年南部和北部的森林区因火灾损失了19.257 2 km²的森林面积,对碳储量产生不利影响。Allen et al.(2010)的研究表明,气候变化引发的高温与干旱增加了森林树木的死亡率,尤其在干旱区,这与本研究结果一致。尽管气候变化在一定条件下可能促进植被增长和碳储量增加,但整体上其对碳储量的变化主要起负向作用。综上所述,在过去的20年中,伊犁地区的碳储量在相应减少,与杨顺法等(2025)基于PLUS与InVEST模型分析新疆的碳储量变化的结果一致,预计未来伊犁地区的碳储量仍将持续减少。

4.4 不足与展望

InVEST模型的碳储量估算依赖于碳密度参数的精确性,而本研究采用的碳密度数据主要基于前人研究结果,存在主观性(曹鹏辉等,2023)。其次,为统一GDP、土地利用、NDVI及气象数据的空间分辨率,本研究采用了重采样、投影变换、地理配准和数据融合等方法,但数据质量

和来源可能对结果产生影响。未来研究将致力于减少主观因素,提高碳密度参数的准确性,并加强对数据的质量控制,以提升研究的可靠性,同时探索与碳储量变化相关的更为客观、科学的研究方法。

5 结 论

为了深入理解伊犁地区碳储量的动态变化及其驱动因素,本研究综合气候变化和人类活动对生态系统碳循环的影响,分析了2000—2020年碳储量的时空变化趋势,并探讨了环境因子的作用机制,得出主要结论如下:

1) 2000—2020年伊犁地区的碳储量总体呈下降趋势,减少了44.46 Tg。碳储量下降的主要原因在于研究区域南部和北部山区部分碳密度高的林地和草地被转化为了碳密度小的耕地和建设用地。碳储量高值区主要分布在南部和北部的林地和草地,而低值区集中在中部平原的河谷附近。整体呈现出碳储量高值区与低值区嵌套式相间分布的模式。

2) 伊犁地区碳储量的时空变化趋势是自然环境因素和社会经济因素共同作用的结果。其中,DEM、TMP和NDVI是影响其碳储量的关键因子。单因子分析中,DEM对碳储量的影响最显著,双因子交互作用中,PRE∩NDVI对碳储量的正向影响最显著。

3) 伊犁地区的气候变化和人类活动对碳储量的影响具有显著空间差异。碳储量增加的区域中,约73.09%由气候变化和人类活动共同作用所致,其中人类活动的正面贡献更为显著。气候变化贡献率超过80%的区域主要分布在南部和北部山地的森林区,而人类活动贡献率超过80%的区域则集中在中部和东部。碳储量减少的区域中,约8.60%由气候变化和人类活动共同作用导致,主要集中在南部和北部山地的林区。

参考文献:

阿不力米提江·阿布力克木,陈春艳,玉素甫·阿不都拉,等,2015.2001—2012年新疆融雪型洪水时空分布特征[J].冰川冻土,37(1):226—232.

曹梦迪,曹姗姗,刘婷婷,等,2023.基于InVEST模型的2000—2020年新疆伊犁地区碳储量分布数据集[J].中国科学数据,8(4):426—433.

曹鹏辉,齐晓明,杨雯,等,2023.内蒙古土地利用多情景模拟与碳储量预测分析[J].干旱区资源与环境,37(9):83—90.

陈光水,杨玉盛,谢锦升,等,2007.中国森林的地下碳分配[J].生态学报,27(12):5148—5157.

陈美景,王庆日,白中科,等,2021.碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应——以贵州省为例[J].中国

- 土地科学, 35(11): 101-111.
- 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 等, 2024. 耦合 PLUS-InVEST-Geodector模型的新疆地区碳储量时空变化及驱动机制分析[J]. 环境科学, 45(9): 5416-5430.
- 韩楚翹, 郑江华, 王哲, 等, 2024. 基于 PLUS-InVEST模型吐哈盆地陆地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J]. 干旱区地理, 47(2): 260-269.
- 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等, 2020. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 75(5): 961-974.
- 柯新利, 唐兰萍, 2019. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响——以湖北省为例[J]. 生态学报, 39(2): 672-683.
- 孔蕊, 2020. 变化环境下西北地区草地地上碳储量演变及驱动力分析[D]. 南京: 南京林业大学.
- 李克让, 王绍强, 曹明奎, 2003. 中国植被和土壤碳储量[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(1): 72-80.
- 李若玮, 叶冲冲, 王毅, 等, 2021. 基于 InVEST模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J]. 草地学报, 29(S1): 43-51.
- 刘天弋, 孙慧兰, 卢宝宝, 等, 2023. 1998—2018年新疆伊犁河谷植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 东北林业大学学报, 51(4): 68-74+79.
- 刘鑫, 赵鲁强, 杨静, 等, 2016. 新疆春季融雪型洪水分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 44(30): 165-168.
- 刘洋, 张军, 周冬梅, 等, 2021. 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, 41(10): 4052-4065.
- 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等, 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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 31(2): 300-314.
- 毛永发, 周启刚, 王陶, 等, 2023. 耦合 PLUS-InVEST-Geodector模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J]. 长江流域资源与环境, 32(5): 1042-1057.
- 祁迷, 王飞, 滑永春, 等, 2023. 基于 PLUS与 InVEST模型的内蒙古自治区土地利用变化及碳储量评估[J]. 水土保持学报, 37(6): 194-200.
- 尚二萍, 张红旗, 2016. 1980s-2010s新疆伊犁河谷草地碳存储动态评估[J]. 资源科学, 38(7): 1229-1238.
- 石晶, 石培基, 王梓洋, 等, 2024. 基于 PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学, 45(1): 300-313.
- 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等, 2021. 基于 MCE-CA-Markov和 InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 38(6): 1010-1019.
- 孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等, 2020. 2000—2015年伊犁河谷植被覆盖时空变化特征[J]. 干旱区地理, 43(6): 1551-1558.
- 谈旭, 王承武, 2023. 伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 34(10): 2747-2756.
- 田华, 杨晓丹, 张国平, 等, 2011. 2009年3月中旬新疆融雪型洪水气象成因分析[J]. 气象, 37(5): 590-598.
- 田志会, 马晓燕, 刘瑞涵, 2015. 北京市农田生态系统碳足迹及碳生态效率的年际变化研究[J]. 农业资源与环境学报, 32(6): 603-612.
- 田梓祎, 高凡, 何兵, 等, 2024. 1990—2020年塔里木河流域土地利用变化及其对碳储量的影响[J]. 环境科学, 45(11): 6514-6526.
- 王春晓, 李明倩, 2024. 基于文献计量的土地利用变化与碳汇评估交叉研究进展[J]. 生态学报, 44(13): 5893-5903.
- 王劲峰, 徐成东, 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 72(1): 116-134.
- 王鑫, 杨德刚, 熊黑钢, 等, 2017. 新疆不同植被类型土壤有机碳特征[J]. 干旱区研究, 34(4): 782-788.
- 位盼盼, 咎梅, 2020. 伊犁地区土地覆被变化及其对植被碳储量的影响[J]. 西北林学院学报, 35(4): 158-166.
- 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞, 2019. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据, 4(1): 86-92.
- 解铭威, 周慧荻, 贾文贞, 等, 2025. 太原市生态系统服务时空变化及其驱动因素[J]. 环境科学, 46(3): 1597-1607.
- 徐自为, 张智杰, 2018. 基于土地利用变更调查的2010—2016年新疆尉犁县生态系统碳储量时空变化[J]. 环境科学研究, 31(11): 1909-1917.
- 杨顺法, 咎梅, 袁瑞联, 等, 2025. 基于 PLUS与 InVEST模型的新疆碳储量变化及预测[J]. 环境科学, 46(1): 378-387.
- 杨旭, 刘贤赵, 2022. 长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测[J]. 环境科学, 43(12): 5850-5860.
- 殷剑虹, 2005. 伊犁河谷气候变化与极端天气气候规律初步研究[C]//中国科学技术协会2005年学术年会——气候变化与气候变异生态-环境演变及可持续发展研讨会. 乌鲁木齐: 234-238.
- 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[J]. 生态学报, 44(13): 5476-5493.
- 张智洋, 赵颖慧, 甄贞, 2024. 基于 LUCC的1986—2022年松花江流域陆地生态系统碳储量动态监测[J]. 植物生态学报, 48(10): 1274-1290.
- 郑慧玲, 郑辉峰, 2024. 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测[J]. 环境科学, 45(4): 2321-2331.
- 周绪, 刘志辉, 菊春燕, 等, 2007. 基于 RS和 GIS分析干旱区土地利用/覆盖变化对陆地植被碳储量的影响——以新疆鄯善县绿洲为例[J]. 干旱地区农业研究, 25(6): 231-236.

- 朱超, 赵淑清, 周德成, 2012. 1997—2006年中国城市建成区有机碳储量的估算[J]. 应用生态学报, 23(5): 1195–1202.
- 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等, 2019. 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, 74(3): 446–459.
- 邹桃红, 陈鹏, 刘家福, 等, 2023. 不同土地利用情景下四平市生态系统碳储量时空演变[J]. 中国环境科学, 43(10): 5508–5518.
- 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.
- ALDRIAN E, SUSANTO R D, 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature [J]. *Int J Climatol*, 23(12): 1435–1452.
- ALLEN C D, MACALADY A K, CHENCHOUNI H, et al, 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *For Ecol Manag*, 259(4): 660–684.
- EVANS J, GEERKEN R, 2004. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. *J Arid Environ*, 57(4): 535–554.
- FANG J, ZHU J, WANG S, et al, 2011. Global warming , human-induced carbon emissions, and their uncertainties [J]. *Sci China Earth Sci*, 54(10): 1458–1468.
- LI G, FANG C, LI Y, et al, 2022. Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity [J]. *Nat Commun*, 13(1): 1628.
- PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J, et al, 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 333(6045): 988–993.
- PIAO S, FANG J, CIAIS P, et al, 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 458(7241): 1009–1013.
- SPAWN S A, SULLIVAN C C, LARK T J, et al, 2020. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010 [J]. *Sci Data*, 7: 112.
- SUN W, SONG X, MU X, et al, 2015. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agric For Meteorol*, 209: 87–99.
- WESSELS K J, PRINCE S D, MALHERBE J, et al, 2007. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa [J]. *J Arid Environ*, 68(2): 271–297.

(责任编辑 江 睿)