

DOI: 10.20103/j.stxb.202411122761

刘雪霞, 郝媛媛, 孟哲, 何生申, 安春春, 陈松清, 楚彬, 花立民. 1990—2022 年祁连山国家公园碳储量时空变化及其驱动因素. 生态学报, 2025, 45 (11): 5263-5276.

Liu X X, Hao Y Y, Meng Z, He S S, An C C, Chen S Q, Chu B, Hua L M. Spatiotemporal variation of carbon storage and its driving factors in Qilian Mountain National Park from 1990 to 2022. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5263-5276.

1990—2022 年祁连山国家公园碳储量时空变化及其驱动因素

刘雪霞^{1,2,3}, 郝媛媛^{1,2,3,*}, 孟哲^{1,2,3}, 何生申^{1,2,3}, 安春春^{1,2,3}, 陈松清^{1,2,3}, 楚彬^{1,2,3}, 花立民^{1,2,3}

1 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070

2 甘肃农业大学草业生态系统教育部重点实验室, 兰州 730070

3 甘肃农业大学国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心, 兰州 730070

摘要: 全球气候变暖和冰雪融化等现象日益加剧, 加速了生态系统的退化, 特别是在“双碳”战略背景下, 明确碳储量对气候变化和人类活动的响应变得尤为重要。目前在碳储量方面的研究未充分考虑碳储量在不同时间段内逐年碳储量的动态变化, 无法有效捕捉碳储量的细节变化特征, 此外, 影响因素维度较为单一, 从而难以明确碳储量变化的关键因素。基于 1990—2022 年逐年土地利用/覆被数据, 应用 InVEST 模型计算了逐年碳储量, 并结合 Sen+MK 趋势分析和 Spearman 相关性分析, 探讨了祁连山国家公园碳储量的变化趋势及其驱动因素。结果表明: (1) 过去 33 年间该地区碳储量空间差异明显, 平均碳储量为 112.12 t, 碳储总量呈轻微上升趋势, 显著变化的区域面积仅占 1.11%; (2) 在不同土地利用/覆被类型中, 森林具有最强的碳储能力, 而草原由于其广泛的分布, 碳储总量最大; (3) 地形 (不包括坡向因素)、土壤、气候及土壤因子均与碳储量显著相关。尤其是气温 ($r=0.489$)、蒸散发量 ($r=0.406$) 和人类足迹 ($r=0.460$) 对碳储量的正向驱动作用显著高于降水量、粘土和细粉砂等因子, 而海拔对碳储量呈负向驱动 ($r=-0.514$)。研究揭示了该区域碳储量的时空变化规律, 并深入探讨了影响碳储量的关键因素, 为未来生态保护与碳汇管理提供了重要的科学依据。

关键词: 碳储量; 时空动态; 驱动因素; 祁连山国家公园

Spatiotemporal variation of carbon storage and its driving factors in Qilian Mountain National Park from 1990 to 2022

LIU Xuexia^{1,2,3}, HAO Yuanyuan^{1,2,3,*}, MENG Zhe^{1,2,3}, HE Shengshen^{1,2,3}, AN Chunchun^{1,2,3}, CHEN Songqing^{1,2,3}, CHU Bin^{1,2,3}, HUA Limin^{1,2,3}

1 College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

3 National Engineering Technology Research Center for Rodent Pest Control in Alpine Grassland, State Forestry and Grassland Administration, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: In recent years, the continuous increase in greenhouse gas concentrations, particularly the rising emissions of carbon dioxide, has exacerbated global climate warming, accelerated ice and snow melting, and intensified ecosystem degradation. Carbon storage, as a critical component of ecosystem regulatory functions, plays a vital role in mitigating

基金项目: 甘肃省教育厅高校科研创新平台重大培育项目 (2024CXPT-07); 草业生态系统教育部重点实验室“揭榜挂帅”项目 (KLGE-2024-06); 甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目 (2025CXZX-851); 国家林业和草原局草地啮齿动物危害防控创新团队

收稿日期: 2024-11-12; **网络出版日期:** 2025-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haoyy@gsau.edu.cn

climate issues such as the greenhouse effect by absorbing and storing atmospheric carbon dioxide. Since the 1860s, the frequency of human activities has significantly increased, accelerating changes in land use patterns and contributing to a series of environmental challenges, including global climate change. To address these issues, various countries and regions have formulated carbon neutrality goals and strengthened land management and planning. Particularly under the “dual-carbon” strategy, understanding the response of carbon storage to climate change and human activities has become increasingly important. Current research on carbon storage has not adequately addressed the dynamic changes in carbon storage on an annual basis across different time periods, thus failing to capture the detailed changes in carbon storage. Additionally, the factors influencing carbon storage are often considered from a limited perspective, making it challenging to identify the key drivers of changes in carbon storage. This study, utilizing annual land use/land cover data from 1990 to 2022, employs the InVEST model to calculate yearly carbon storage, and combines Sen+MK trend analysis and Spearman correlation analysis to explore the trend of carbon storage changes and their driving factors in the Qilian Mountain National Park. The findings indicate that: 1) Over the past 33 years, there has been significant spatial variation in carbon storage in the region, with an average carbon storage of 112.12 t. The total carbon storage has shown a slight upward trend, with areas of significant change accounting for only 1.11% of the total area. 2) Among different land use/land cover types, forests exhibit the highest carbon storage capacity, while grasslands, due to their extensive distribution, account for the largest total carbon storage. 3) Topography (excluding aspect), soil, climate, and soil factors are all significantly correlated with carbon storage. Specifically, temperature ($r = 0.489$), evapotranspiration ($r = 0.406$), and human footprint ($r = 0.460$) have a significantly stronger positive driving effect on carbon storage than precipitation, clay, and fine silt, while altitude negatively drives carbon storage ($r = -0.514$). This study reveals the spatiotemporal variation of carbon storage in the region and provides an in-depth analysis of the key factors influencing carbon storage, offering important scientific support for future ecological protection and carbon sink management.

Key Words: carbon stock; spatiotemporal dynamics; driving forces; Qilian Mountains National Park

近年来温室气体浓度不断增加,尤其是二氧化碳排放量持续上升^[1],致使全球气候变暖,冰雪融化等问题愈发严重,加剧了生态系统的退化^[2]。碳储存作为生态系统调节功能的重要组成部分,主要通过吸收和储存碳等方式调节大气二氧化碳浓度,进而缓解温室效应等气候问题^[3]。此外,陆地生态系统作为主要的碳库,碳储量远远高于大气中的碳含量^[4],对维持生态系统平衡和稳定方面具有极其重要的作用,而土地作为陆地生态系统碳储存功能的关键载体^[5-7],其动态变化直接影响生态系统的功能和结构,进而影响碳储量的动态变化。从 18 世纪 60 年代以来,人类活动频率显著上升,加速了土地利用结构的转变^[8],从而导致全球气候变化等一系列环境问题频发。为了应对这一问题不同国家不同区域制定碳中和目标,并加强国土管理和规划^[9],以推动可持续发展和减少碳排放。因此,基于逐年土地利用/覆被数据明晰碳储量的变化,并进一步追溯引起这一变化的主要根源,可以有效的缓解及保障区域生态安全,并为政策制定提供理论依据。

祁连山国家公园作为中国西北重要的生态功能区,对维持区域生态安全具有极其重要的作用^[10-12]。目前大量学者基于 InVEST 模型在全球、国家以及不同区域探究不同时段碳储量的变化特征及影响因素,例如在全球层面,Byrne 等发现北温带地区碳储量呈增加趋势,而热带区域的碳储量呈减少趋势^[13],且 Beillouin 等^[14]发现气候和土地管理均影响碳储量的变化。国家层面,魏英等^[15]指出中国和美国是碳储量变化较大的国家,关注其变化趋势至关重要。保护地层面,杨明新等^[16]应用遥感数据估算黄河源区草地碳储量发现土壤与草地碳密度关系密切;贾天朝等^[17]基于间隔为 5 年的土地利用数据发现三江源国家公园碳储量整体上呈增加趋势;在城市层面,许灵凤等基于不同土地利用/覆被类型发现碳储量整体呈增长的变化趋势^[18];范强等^[19]基于时间间隔为 10 年的土地利用数据发现山东省 2000—2020 年碳储量整体呈减少趋势;在祁连山及附近区域,唐建亭等^[20]基于间隔为 10 的土地利用数据发现祁连山南坡碳储量呈增加趋势;刘梦圆^[21]基于时

段土地利用数据发现河西地区碳储量呈增加趋势;而在影响因素方面相关学者基于气温、降水、经济等^[22-23]影响因子探究碳储量的变化特征。尽管上述研究从不同区域探讨了不同年份碳储量的变化特征及影响因素,但未充分考虑碳储量在不同时间段内逐年碳储量的动态变化,无法有效捕捉碳储量的细节变化特征;此外,影响因素主要聚焦于气候因素,考虑的影响维度较为单一,未能全面涵盖其它影响因素,从而难以明确碳储量变化的关键因素。

鉴于此,本研究以中国西北重要生态功能区——祁连山国家公园为例,基于 1990—2022 年逐年土地利用数据,综合气象、地形、人类活动以及经济发展水平四个驱动因子维度,应用 Sen+MK 趋势法和 Spearman 相关性探讨碳储量的时空变化趋势、不同土地利用/覆被类型的碳储量变化特征及影响因素。最终目的是进一步阐明祁连山国家公园碳储量的动态变化,并进一步追溯引起这一变化的主要根源,可以有效地保障区域生态安全,以期祁连山国家公园的保护提供理论支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

祁连山国家公园是中国西北重要的生态功能区^[24],位于甘肃和青海省的交汇地带^[25],地理坐标 $94^{\circ}00'—103^{\circ}20'E, 36^{\circ}05'—40^{\circ}00'N$,总面积约 $5.02 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均海拔 4555 m(图 1),东西跨度大,气候差异明显,属大陆性高寒半湿润山地气候^[26],其含有丰富的森林、草原和生物资源^[27],对于维护中国西北生态安全,保障区内资源供给等具有重要的作用,在国家生态建设中具有十分重要的战略地位^[28]。

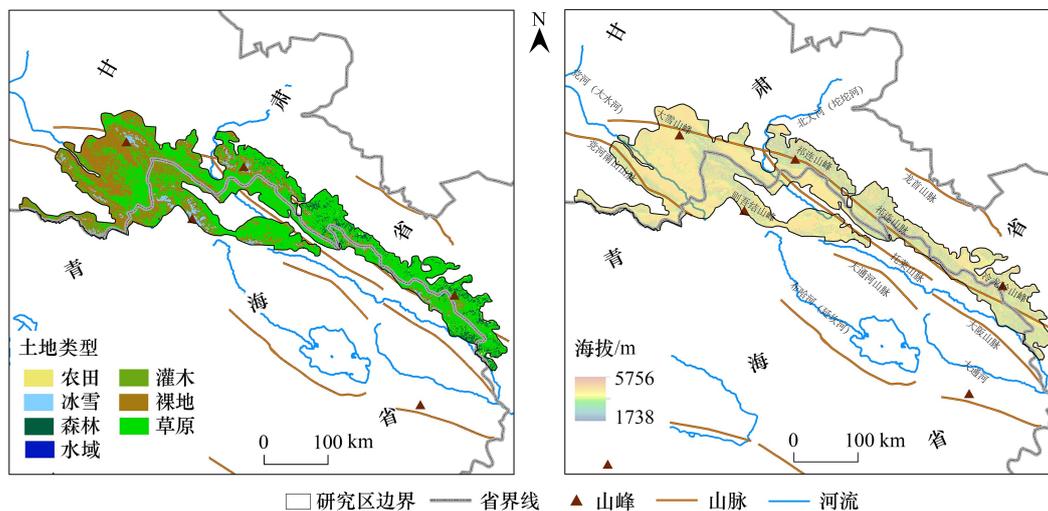


图 1 研究区地理概况

Fig.1 Geographic overview of the study area

1.2 数据来源及预处理

本研究所采用的数据主要有土地利用/覆被^[29]、气象^[30-31](降雨量、气温和蒸散发)、地形(海拔、坡度和坡向)、土壤(粘粒、砂粒和细粉粒)、人类活动(人类足迹和人口密度)和经济发展水平(GDP)数据;此外所有栅格数据均重采样至 1 km 分辨率(表 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 碳储存模型

应用 InVEST 模型中的碳储量模块计算 1990—2022 年祁连山国家公园碳储量的时空演变过程,其中在碳储量模块计算中主要涉及地上、地下、土壤和死亡有机碳储量^[19,32]。

$$C_{QT} = C_{QA} + C_{QB} + C_{QS} + C_{QD} \quad (1)$$

式中, C_{QT} 、 C_{QA} 、 C_{QB} 、 C_{QS} 和 C_{QD} 分别表示祁连山国家公园总碳储量、地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机碳储量,单位均为 t/km^2 ,其中除总碳储量外其余碳密度数据均参考前人研究成果^[33-35]。

表 1 数据来源及详细信息

Table 1 Data sources and detailed information

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source	分辨率 Resolution
气象 Meteorology	降雨量、潜在蒸散发和气温	国家地球系统科学数据中心共享服务平台 (http://www.geodata.cn)	1 km
土地利用/覆被 Land use/cover	LUCC	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)	1 km
土壤 Soil	粘土、砂粒和细粉粒	基于世界(HWSD)土壤数据库 (https://poles.tpdc.ac.cn)	1 km
地形 Topography	DEM、坡度和坡向	中科院地理空间数据云平台 (https://www.gscloud.cn)	30 m
生物物理表 Biophysical table		文献及 InVEST 指南	
人类活动 Human activity	人类足迹指数	中国农业大学 (https://www.x-mol.com)	1 km
	人口密度	https://landscan.ornl.gov/	1 km
经济发展水平 Level of economic development	GDP	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)	1 km

LUCC:土地利用/覆被 Land use/cover;DEM:数字高程模型 Digital elevation model; GDP:经济发展水平 Level of economic development

1.3.2 碳储存趋势分析

Theil-Sen 和 Mann-Kendall 两种方法结合可以有效衡量碳储量的变化趋势和波动范围(极显著: $Z \geq 12.581$; 显著: $|1.96| \leq Z < 12.581$; 微显著: $|1.65| \leq Z < 1.961$; 不显著: $|0.001| \leq Z < 1.651$; 基本不变: $-0.001 \leq Z < 0.001$)^[36],其中正负号分别表示增加和减少。且对时间序列中的线性和非线性检测均适用^[37-38]。

$$\beta = \text{median} \left(\frac{X_b - X_a}{b - a} \right) \quad 1 < a < b < n \quad (2)$$

$$S = \sum_{a=1990}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \text{sgn}(X_b - X_a) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(X_b - X_a) = \begin{cases} 1 & (X_b - X_a) > 0 \\ 0 & (X_b - X_a) = 0 \\ -1 & (X_b - X_a) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{ar}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_{ar}S}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_{ar}S}} & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, β 表示碳储量的变化趋势, X_b 和 X_a 分别为 a 和 b 年的碳储量, $1 \leq a < b \leq 33$; S 、 sgn 、 $V_{ar}(S)$ 和 Z 分别为年份、检验统计量、符号函数、方差和统计量趋势。

1.3.3 Spearman 相关性分析

基于 R 语言采用 Spearman 相关性探究任意影响因子与碳储量之间的总体特征,能够更好的反映两两之间的相关性^[39]。

$$p_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (7)$$

式中, p_s 表示相关性系数, d_i 为二列成对变量的等级差数, n 为检测的相关性因子; 其中置信度 $P < 0.05$ 和 $P < 0.001$ 分别表示显著和极显著。相关性的强弱根据 r 绝对值划分, 主要表示为无相关或极弱相关(0—0.2)、弱相关(0.2—0.4)、中等程度相关(0.4—0.6)、强相关(0.6—0.8)和极强相关(0.8—1.0)。

2 结果与分析

2.1 碳储量时空分布及变化特征

1990—2022 年祁连山国家公园的平均碳储量为 112.12 t, 具有明显的空间差异性(图 2), 尤其在冷龙岭山峰以及靠近托莱山脉区域的碳储量最大, 沿着祁连山脉从冷龙岭山峰至党河南山山脉碳储量逐渐减小, 而在党河流域碳储量达到最小值, 整体上呈“东南高, 西北低”的分布格局; 从碳储存总量来看整体呈上升趋势, 多年平均碳储总量为 5.93×10^8 t, 其中有 14 年碳储总量大于平均值, 可以明显看出分别在 1990 年和 1996 年达到最小值(5.81×10^8 t), 2018 年达到最大值, 最大值较最小值高 0.32×10^8 t。

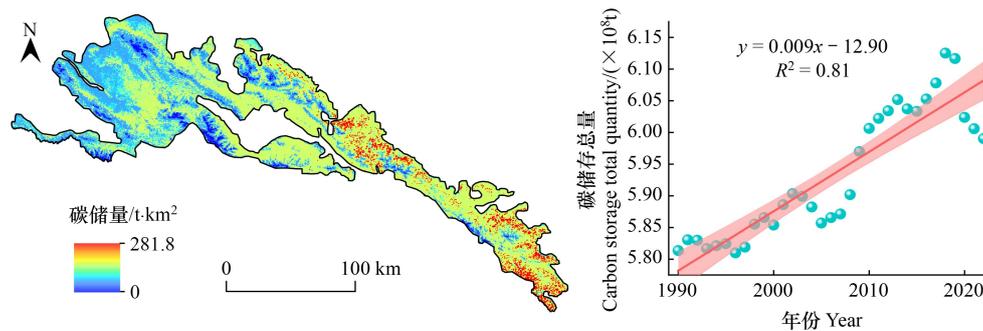


图 2 1990—2022 年平均碳储量和逐年碳储总量

Fig.2 The average carbon storage and the total annual carbon storage from 1990 to 2022

粉红色区域为 95% 置信区间, 斜率显著且不等于 0

2.2 不同土地利用/覆被类型碳储量

近 33 年祁连山国家公园不同土地利用/覆被类型的碳储量具有明显的差异性(图 3)。从碳储存总量来看, 草原的碳储总量最大, 年均碳储存总量为 429×10^8 t, 其次是裸地和森林, 年均碳储总量分别为 91.32×10^8 t 和 28.12×10^8 t, 农田和灌木的碳储总量最小, 二者之和仅占草原年均碳储总量的 2.05%。从碳储量的变化趋势来看, 草原和森林呈上升趋势, 且草原较森林增率更大; 农田、灌木和裸地均呈下降趋势, 其中裸地整体下降趋势较农田和灌木显著。

2.3 碳储量趋势变化

近 33 年祁连山国家公园碳储量整体上没有发生变化(图 4), 无变化区域高达 98.90%, 几乎覆盖了整个研究区, 而发生显著变化区域仅占 1.10%, 极显著增加和极显著减少区域面积占比分别为 0.95% 和 0.15%, 以点状零星分布于党河南山山脉以及祁连山脉一带, 其中极显著增加区域主要位于党河区域, 极显著减少则主要位于冷龙岭山峰区域。

2.4 驱动因素

碳储量与三个气象因子(降水、气温和蒸散发量)、两个地形因子(海拔和坡度)、三个土壤因子(粘土、砂土和细粉砂)、两个人类因子(人类活动指数和人口密度)以及经济发展水平 GDP 均具有相关性(图 5)。碳储量与气温($r=0.489$)、人类足迹($r=0.460$)和蒸散发量($r=0.406$)均呈中等正相关, 与降水量($r=0.336$)、细粉砂($r=0.343$)和粘土($r=0.319$)均呈弱正相关, 与人口密度($r=0.054$)、坡度($r=0.049$)、GDP($r=0.042$)和砂

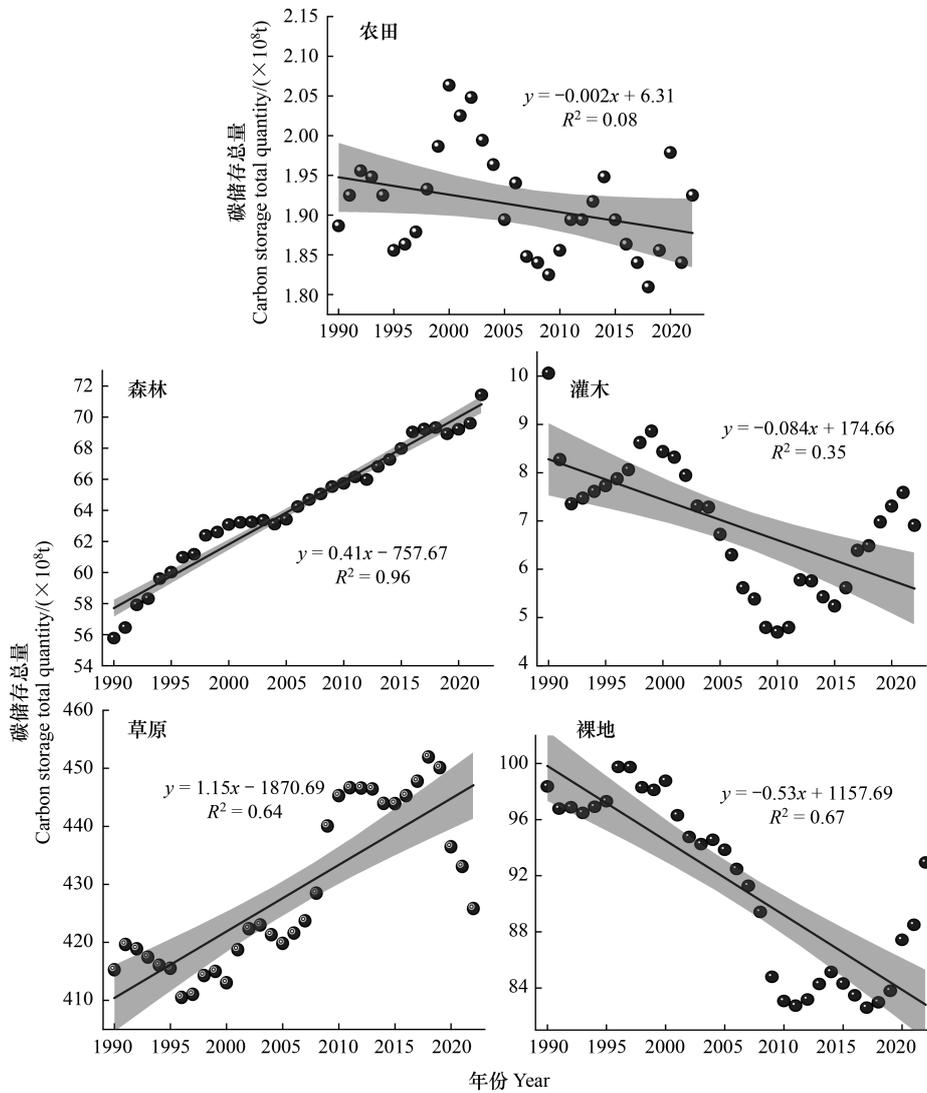


图3 不同土地利用/覆被类型碳储存总量

Fig.3 Total carbon stocks in different land use/cover types

浅灰色区域为 95% 置信区间,斜率显著且不等于 0

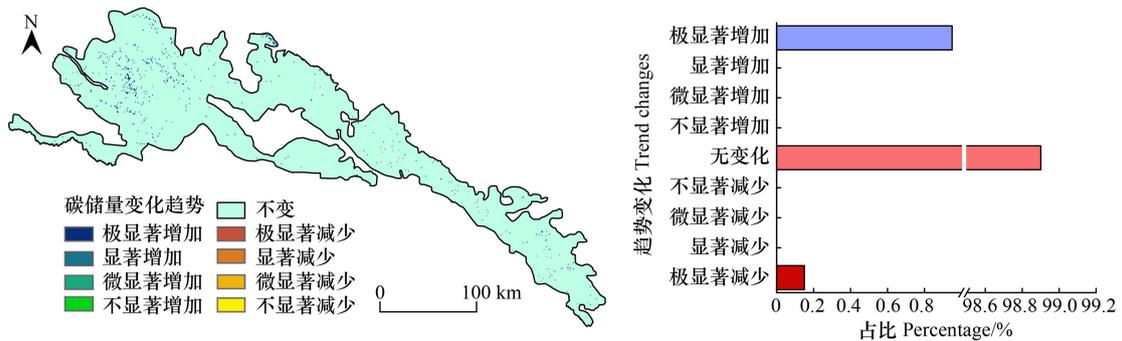


图4 碳储量变化趋势及面积占比

Fig.4 Carbon stock trends and area percentage

土($r=0.027$)均呈极弱正相关,而与海拔($r=0.514$)呈中等负相关,与坡向无线性关系。

此外,蒸散发量与温度呈极显著强正相关($r=0.963$),与海拔($r=-0.926$)呈极显著强负相关,与粘土呈极显著中等正相关($r=0.594$),与坡度、坡向、人口密度、GDP 和砂土呈极显著极弱相关($r<0.21$)。气温与海拔呈极显著强负相关($r=-0.963$),与粘土和细粉砂呈极显著中等正相关($r<0.6$)。海拔与粘土和人类足迹呈及极显著中等负相关($r=-0.625$ 和 $r=-0.506$)。

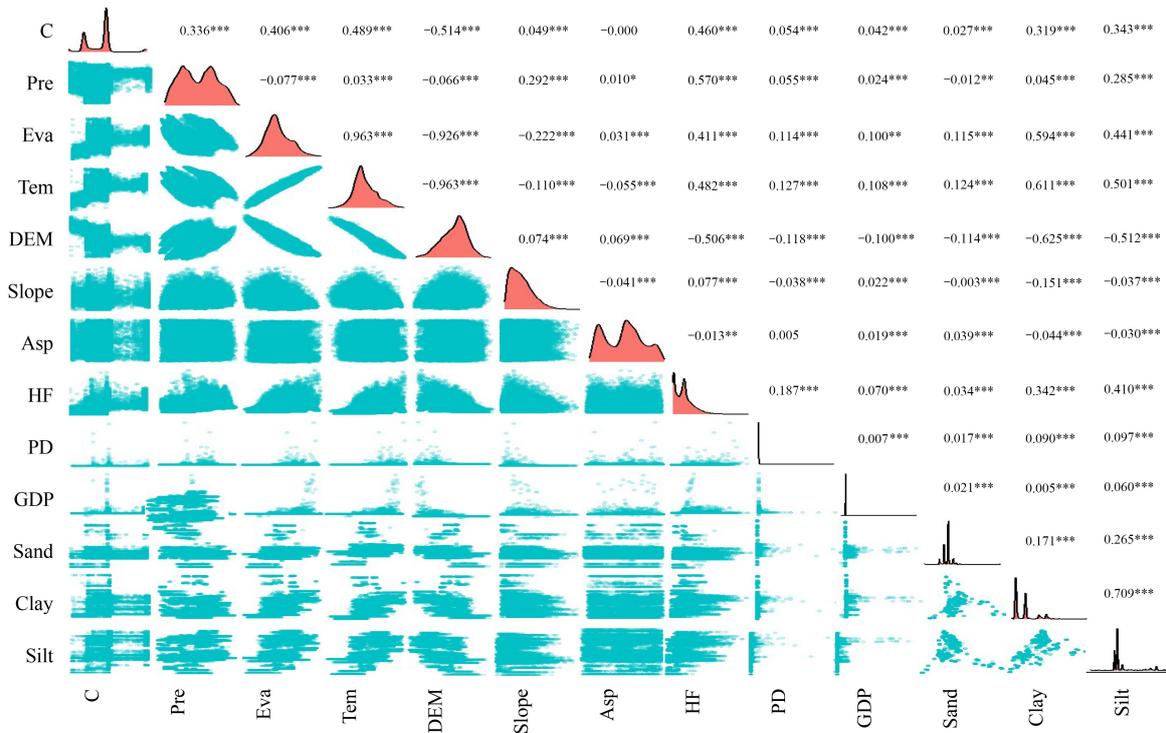


图5 不同因子与碳储量的相关性特征

Fig.5 Characteristics of correlation between different factors and carbon stock

C:碳储量 Carbon storage; Pre:降水量 Precipitation; Eva:蒸散发量 Evapotranspiration; Tem:气温 Temperature; DEM:数字高程模型 Digital Elevation Model; Slope:坡度 Slope; Asp:坡向 Aspect; HF:人类足迹 Human footprint; PD:人口密度 Population density; GDP:经济发展水平 Level of economic development; Sand:砂土; Clay:黏土; Silt:细粉砂; ***表示 $P<0.001$, **表示 $P<0.05$, *表示 $P<0.01$

3 讨论

近年来,全球气候变暖和冰雪融化等现象日益加剧,加速了生态系统的退化^[2]。为了应对这一问题全球许多国家制定了碳中和目标,并加强国土管理和规划^[9],以推动可持续发展和减少碳排放。因此,进一步明晰碳储量应对气候变化和人类活动的响应已变得尤为紧迫和必要。基于此,本文以中国西北重要生态功能区——祁连山国家公园为例,探讨了该区域碳储量的变化趋势,并进一步分析了碳储量变化的主要原因。本研究发现该区域的碳储量具有明显的空间异质性,呈“东南高,西北低”的分布格局;多年平均碳储总量为 5.93×10^8 t,整体呈略微上升趋势;对比不同土地类型的碳储量发现森林的碳储存能力最强而草原的总碳储量最大;碳储量发生显著变化的面积仅占 1.1%,而呈无变化的几乎涵盖了整个研究区;最后探讨引起碳储量变化的根源发现碳储量与三个气象因子(降水、气温和蒸散发量)、两个地形因子(海拔和坡度)、三个土壤因子(粘土、砂土和细粉砂)、两个人类因子(人类活动指数和人口密度)以及经济发展水平 GDP 均具有显著相关性。本研究可以有效的保障区域生态安全,并为政策制定提供理论依据。

3.1 碳储量模型验证与精度分析

本研究发现近 33 年间平均碳储量为 112.12 t,整体上呈“东南高,西北低”的分布格局;从碳储存总量来

看整体呈显著上升趋势,多年平均碳储总量为 5.93×10^8 t,为了验证本研究应用 InVEST 模型的精确性,分别对比本研究与其他学者在祁连山区域的研究结果,发现本研究与胡鑫^[40]在祁连山对碳储量的结果对比精度达 93.20%(表 2),与唐建亭等^[20]在祁连山南坡、刘洋等^[41]在疏勒河以及唐娜等^[42]在黑河流域对碳储量的结果对比精度达 74.00%以上。同时,碳储量的空间分布格局与之前相关学者在中国不同区域的研究结果具有一致性^[43—45]。

表 2 精度验证
Table 2 Accuracy verification

研究区 Study area	研究时段 Study period	多年平均碳储存总量/t Multi-year average total Carbon stocks	精度/% Precision
祁连山国家公园(本研究) Qilian Mountains National Park (This study)	1990—2022 年(逐年)	5.93×10^8	
祁连山 Qilian Mountain	1990—2016 年(1990、2000、2016 年)	5.53×10^8	93.20
祁连山南坡 South Slope of Qilian Mountains	2000—2020 年(隔 10 年)	4.49×10^8	75.72
疏勒河流域 Shule River Basin	1990—2015 年(间隔 5 年)	8.02×10^8	74.10
黑河流域 Black River Basin	1992、2000、2010、2020 年	7.62×10^8	77.80

3.2 不同土地利用/覆被类型水源涵养量的差异性

本研究发现不同土地利用/覆被类型具有明显的空间差异性(图 6),森林的碳储能力最强,而草原的碳储总量最大。这主要源于不同土地类型的面积及分布特征,以 2022 年祁连山国家公园土地利用情况为例,草原分布面积达 58.86%,而森林面积不足草原面积的 1/10。因此,尽管森林的碳储存能力最强,但由于其分布稀疏且面积占比较小,碳储总量仅为 64.29×10^8 t。本研究结果与相关研究具有一致性,例如,赵方圆等^[46]、刘建泉等^[47]和李娜等^[48]以祁连山邻近区域为研究区发现森林碳储存能力强。而在不同国家不同区域相关学者均发现森林碳储存能力显著高于草原^[49—51]。

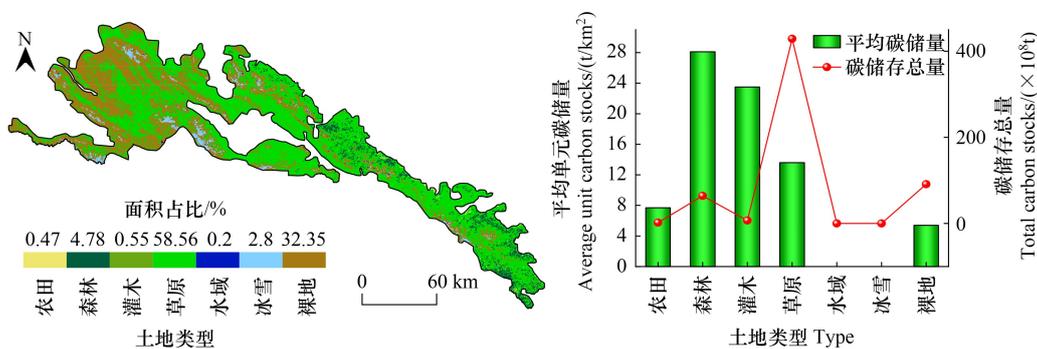


图 6 不同土地利用/覆被类型空间分布特征和碳储量差异

Fig.6 Spatial distribution characteristics and carbon storage differences of different land use/cover types

3.3 影响根源

3.3.1 地形因素

碳储量与海拔呈中等负相关($r=0.514$),与坡度呈极弱正相关($r=0.049$),与坡向无线性关系。进一步分析发现该区域海拔在 3000—4000 m 的面积占比高达 47.66%(图 7),坡度在 0—10°的面积占比超过 1/2;海拔在 2000—3000 m 区域的碳储能力最强,而 3000—4000 m 区域的碳储总量最大,且随着海拔升高,碳储能力逐渐降低;坡度在 40°—50°的碳储能力最强,而 0—10°的碳储总量最大,随着坡度升高,碳储总量逐渐降低。相关研究结果与本研究结论一致,如 Dieleman 等^[49]和 Charan 等^[52]发现随着海拔的升高碳储能力逐渐降低,

Gebrehiwot 等^[53]、Che 等^[54] 和 McEwan 等^[55] 发现碳储量与坡度呈正相关关系,但随着坡度的增加碳储总量逐渐降低;这主要归因于海拔的变化会影响气温、降水和土壤类型等因素,进而影响碳储量的变化,而高坡度地区由于水土流失等原因,通常土壤疏松,碳储总量较低。低坡度地区植被适宜生长,因此碳储能力较强。

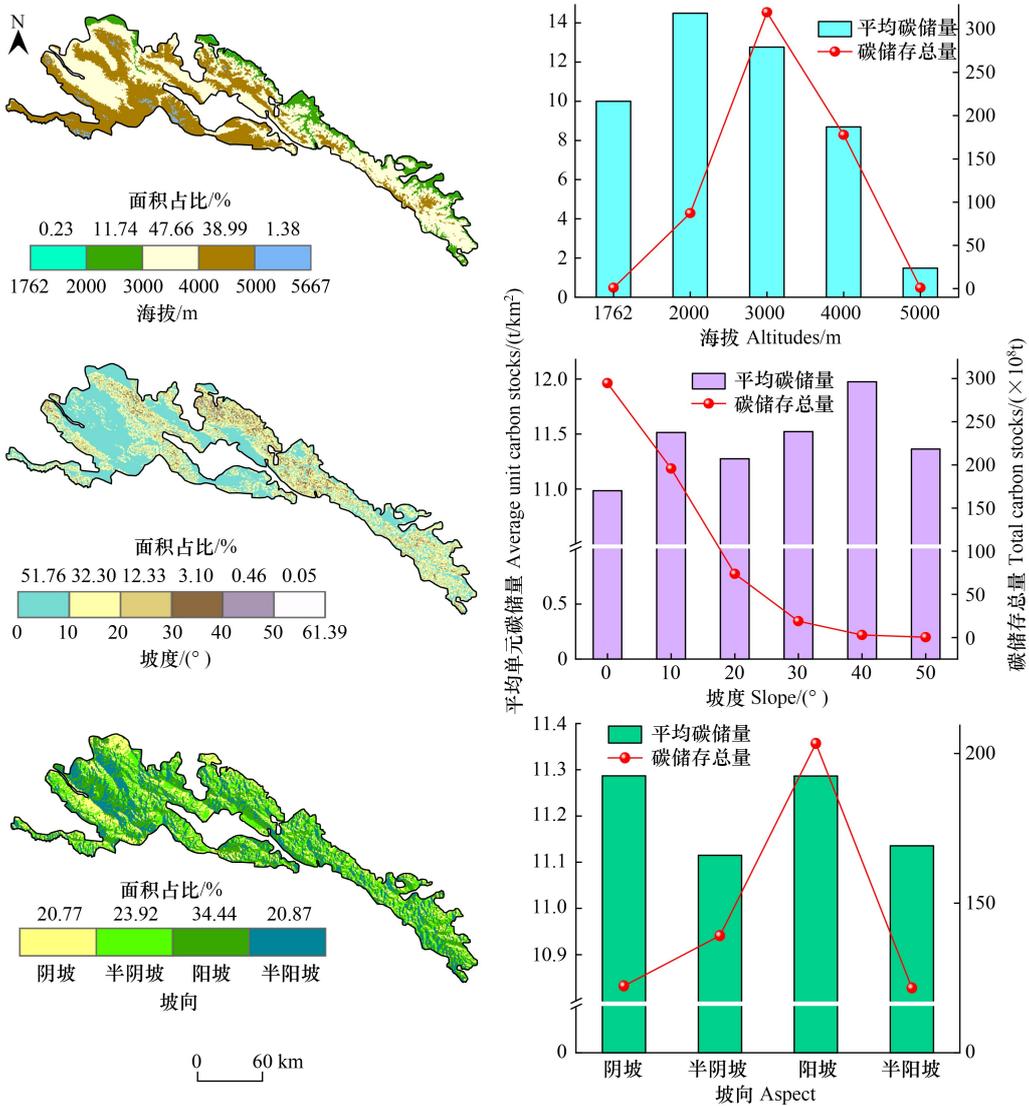


图 7 不同地形因子空间分布特征和碳储量差异

Fig.7 Spatial distribution characteristics and carbon storage differences of different topographic factors

3.3.2 土壤因素

碳储量与细粉砂($r=0.343$)和粘土($r=0.319$)均呈弱正相关,与砂土($r=0.027$)均呈极弱正相关。进一步分析发现该区域粘土含量在 0—5.00% 的面积几乎占整个研究区的 1/2 (图 8),砂土含量主要集中在 15.00%—30.00%,细粉砂的含量主要在 15.00%—20.00%。进一步分析发现粘土含量在 15.00%—35.00% 碳储能力最强,而在 0—5.00% 碳储总量最大;砂土含量在 60.00%—75.00% 碳储能力最强,而在 15.00%—30.00% 碳储总量最大;细粉粒含量在 45.00—52.80% 碳储能力最强,而在 15.00%—25.00% 时碳储总量最大。相关学者在不同研究区域同样发现碳储量与砂土和粘土之间存在显著相关性^[56—58],细粉粒在特定条件下也能增加碳储量^[59]。因研究区的不同在该研究区内,砂土和细粉粒对碳储量的影响较大,而粘土影响程度较小;主要归因于砂土具有较好的透水性,其碳储量受植物根系活跃度和土壤微生物活动的影响。

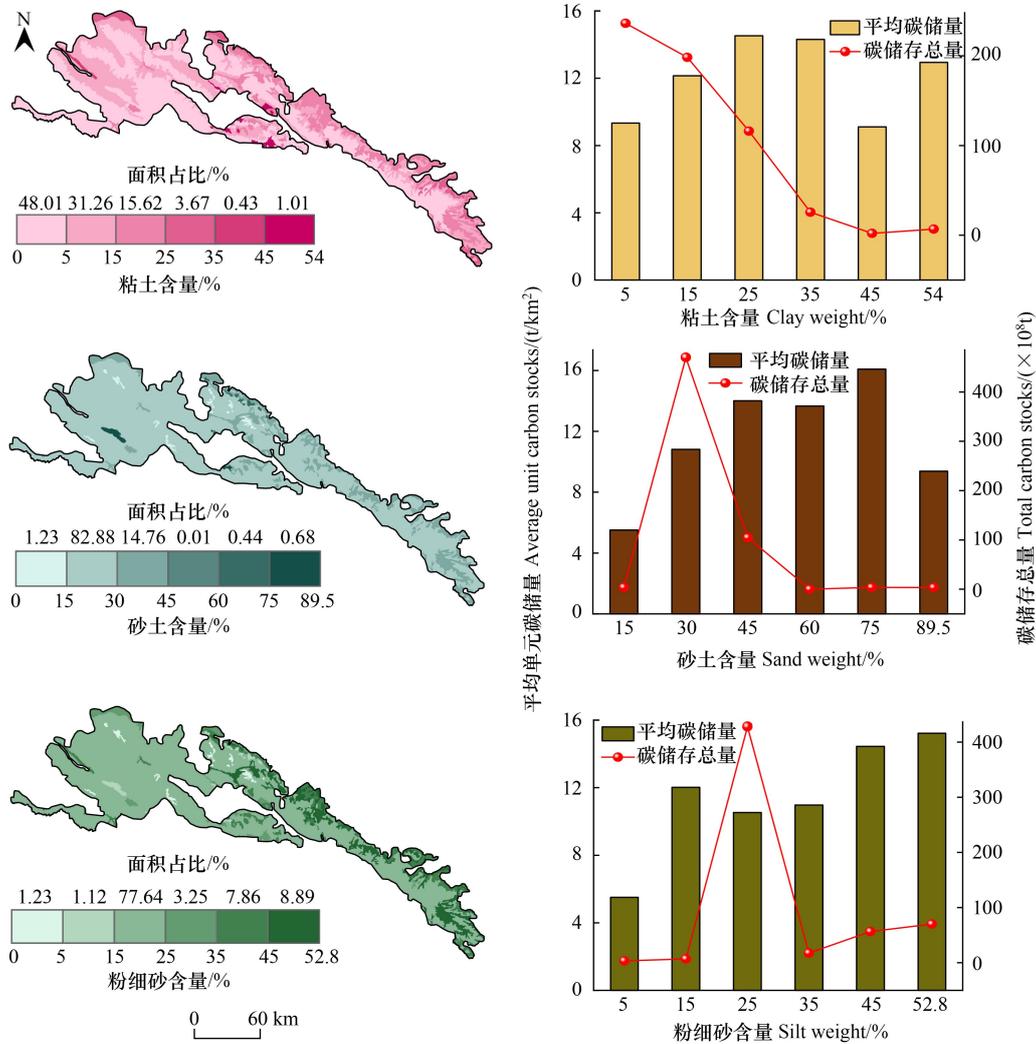


图 8 不同土壤因子空间分布特征和碳储量差异

Fig.8 Spatial distribution characteristics and carbon storage differences of different soil factors

3.3.3 气象因素

碳储量与气温($r=0.489$)和蒸散发量($r=0.406$)均呈中等正相关,与降水量($r=0.336$)呈弱正相关。进一步分析发现该区域降雨量在 200.00—300.00 mm 的面积占比为 26.71% (图 9),气温在 -10.00—-5.00℃ 的面积占比高达 53.34%,蒸散发量在 400.00—600.00 mm 的面积占比超过 1/2。降水量在 400.00—500.00 mm 碳储量能力最强且碳储量总量最大;气温在 0—5.00℃ 碳储能力最强,而在 -10.00—-5.00℃ 碳储总量最大;蒸散发量在 600.00—800.00 mm 碳储能力最强,而在 400.00—600.00 mm 时碳储总量最大,可以看出碳储总量与不同气象因子的面积占比紧密相关。彭卓越等^[60]、邓诗宇等^[61]和相关学者^[62-63]均发现碳储量与气温和降水量呈正相关;此外,大量研究表明在一定范围内降水量(400.00—500.00 mm)、蒸散发量(600.00—800.00 mm)和气温(0—5.00℃)增加能够促进碳的吸收,从而使碳储量的增加^[64-66];进一步说明过高或过低的气温和降水量都会对碳储量产生负面影响,因此这些范围内的变化有助于促进植物生长和碳的积累。

3.3.4 人类因素

在极显著水平下($P<0.001$),碳储量与人类足迹($r=0.460$)呈中等正相关,与人口密度($r=0.054$)和 GDP ($r=0.042$)呈弱正相关。进一步分析发现该区域人类活动指数像元在 1.00—26.80 占比达 76.98%,说明该区域受人类活动影响较大,人口数量较低,GDP 主要集中在 100—2000 万元;降雨量在 200.00—300.00 mm 的

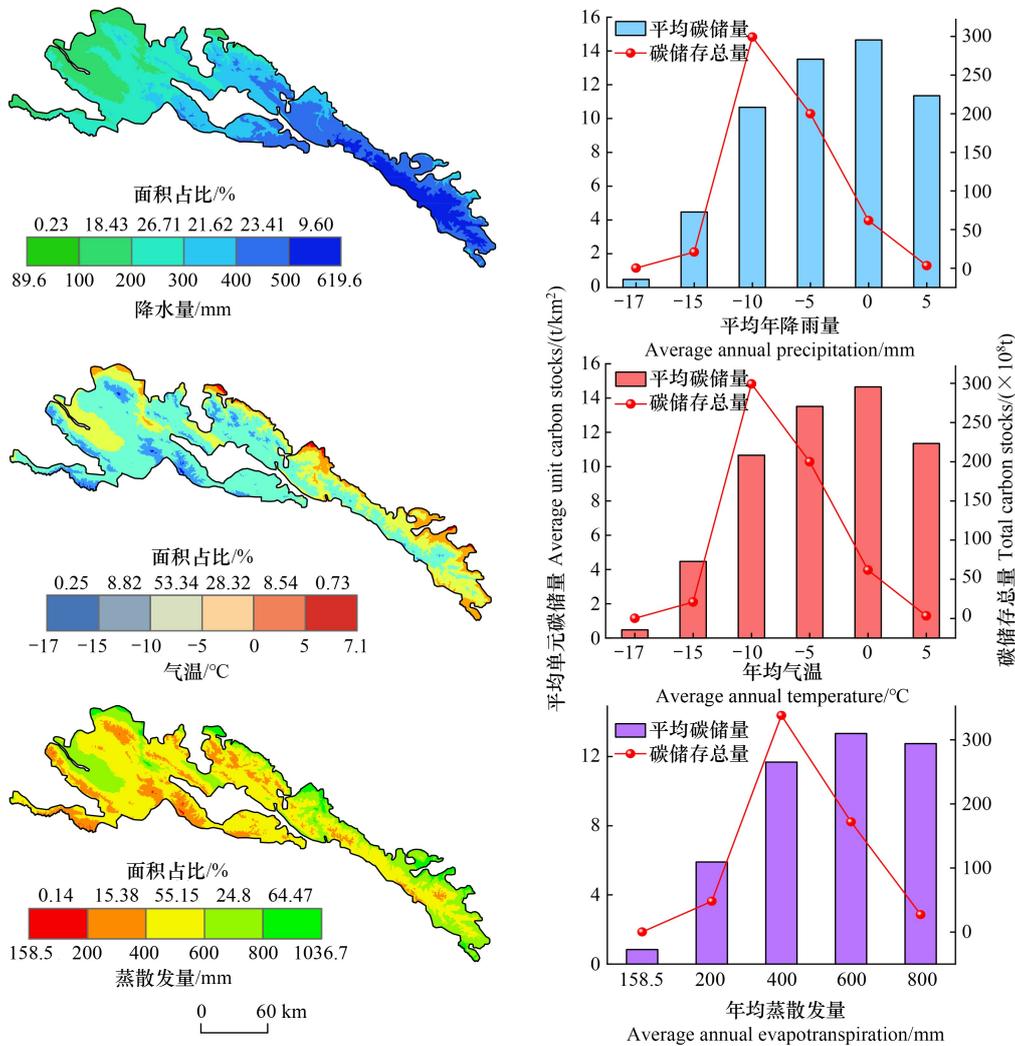


图 9 不同气象因子空间分布特征和碳储量差异

Fig.9 Spatial distribution characteristics and carbon storage differences of different meteorological factors

面积占比为 26.71%(图 10),在人类活动强度较大的区域,碳储存能力较强且碳储总量较大^[67];同时,人口密度较高的地区碳储能力也较强,而经济发展水平较高的地区则表现出更强的碳储能力^[68]。这主要与近年来国家为保护祁连山国家公园生态系统的完整性,实施的一系列生态工程密切相关,如退耕还林还草、三北防护林建设、草原围栏建设以及人工草地的恢复等措施^[69—71]。

4 结论

本研究发现该区域的碳储量具有明显的空间异质性,呈“东南高,西北低”的分布格局;多年平均碳储总量为 5.93×10^8 t,总碳储量呈轻微上升趋势,显著变化的区域面积仅占 1.11%;对比不同土地类型的碳储量发现森林具有最强的碳储能力,而草原由于其广泛的分布,拥有最大的碳储总量;碳储量变化的与三个气象因子(降水、气温和蒸散发量)、两个地形因子(海拔和坡度)、三个土壤因子(粘土、砂土和细粉砂)、两个人类因子(人类活动指数和人口密度)以及经济发展水平 GDP 均具有显著相关性。尤其是气温($r=0.489$)、蒸散发量($r=0.406$)和人类足迹($r=0.460$)对碳储量的正向驱动作用显著高于降水量、粘土和细粉砂等影响因子,而海拔对碳储量呈中等负相关($r=-0.514$),表明在高海拔地区碳储量较低。本研究不仅揭示了该区域碳储量的时空变化规律,并深入探讨了影响碳储量的关键因素,为未来生态保护与碳汇管理提供了重要的科学依据。

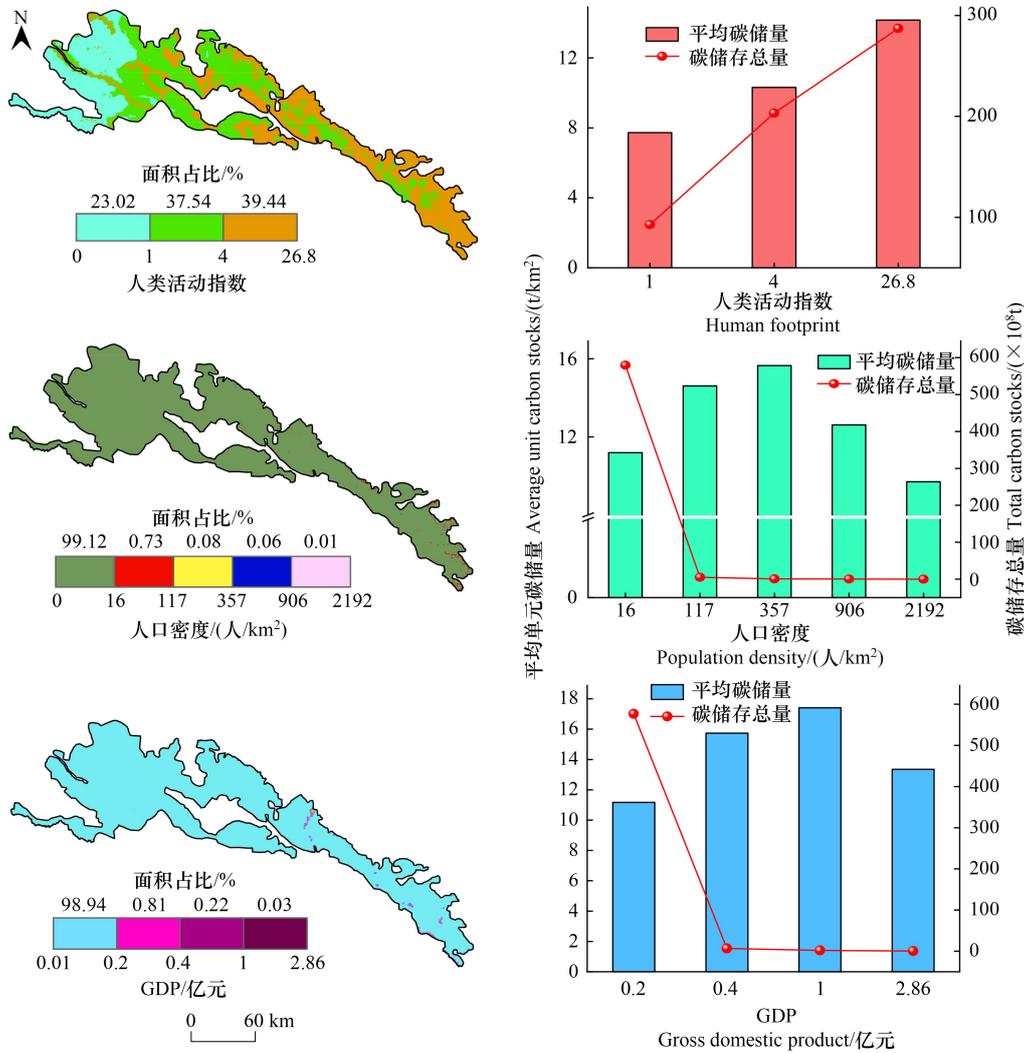


图 10 人类活动和经济发展水平因子空间分布特征和碳储量差异

Fig.10 Spatial distribution characteristics and carbon storage differences of human activity and economic development level factors

参考文献 (References):

- [1] Stocker T. Climate Change 2013-The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 苏勃, 高学杰, 效存德. IPCC《全球 1.5℃ 增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 395-404.
- [3] 刘志坚, 史建公, 张毅. 二氧化碳储存技术研究进展. 中外能源, 2017, 22(3): 1-9.
- [4] Imran M, Din N U. Geospatially mapping carbon stock for mountainous forest classes using InVEST model and Sentinel-2 data: a case of Bagrote valley in the Karakoram range. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(9): 756.
- [5] Xiong X, Grunwald S, Myers D B, Ross C W, Harris W G, Comerford N B. Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. Science of the Total Environment, 2014, 493: 974-982.
- [6] Li Y, Brando P M, Morton D C, Lawrence D M, Yang H, Randerson J T. Deforestation-induced climate change reduces carbon storage in remaining tropical forests. Nature Communications, 2022, 13(1): 1964.
- [7] Wang H Y, Wu L S, Yue Y S, Jin Y Y, Zhang B B. Impacts of climate and land use change on terrestrial carbon storage: a multi-scenario case study in the Yellow River Basin (1992—2050). Science of the Total Environment, 2024, 930: 172557.
- [8] Chuai X W, Huang X J, Lai L, Wang W J, Peng J W, Zhao R Q. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China. Environmental Science & Policy, 2013, 25: 50-61.
- [9] 丁明磊, 杨晓娜, 赵荣钦, 张战平, 肖连刚, 谢志祥. 碳中和目标下的国土空间格局优化: 理论框架与实践策略. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1137-1147.

- [10] 韩武宏. 基于 InVEST 模型的祁连山国家公园生态系统服务功能评估及其驱动力研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [11] 王晓琪, 赵雪雁. 人类活动对国家公园生态系统服务的影响——以祁连山国家公园为例. 自然资源学报, 2023, 38(4): 966-982.
- [12] Yan K, Ding Y. The exploration of China's National Park system pilot project: taking Qilian Mountain National Park as an example. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 2020, 8(4): 210-214.
- [13] Byrne B, Baker D, Basu S, Bertolacci M, Bowman K, Carroll D, Chatterjee A, Chevallier F, Ciais P, Cressie N, Crisp D, Crowell S, Deng F, Deng Z, Deutscher N, Manvendra, Dubey K, Feng S, García O, Griffith D, Herkommer B, Hu L, Jacobson A, Janardanan R, Jeong S, Johnson M S, Dylan B, Jones A, Kivi R, Liu J J, Liu Z Q, Maksyutov S, Miller J B, Scot, Miller M, Morino I, Notholt J, Oda T, O'Dell C, Oh Y, Ohyama H, Patra P, Peiro H, Petri C, Philip S, Pollard D, Poulter B, Remaud M, Schuh A, Sha M, Shiomi K, Strong K, Sweeney C, Té Y, Tian H, Velazco V, Vrekoussis M, Warneke T, Worden J, Wunch D, Yao Y Z, Yun J, Zammit-Mangion A, Zeng N. National CO₂ budgets (2015—2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stocktake. *Earth System Science Data*, 2023.
- [14] Beillouin D, Cardinael R, Berre D, Boyer A, Corbeels M, Fallot A, Feder F, Demenois J. A global overview of studies about land management, land-use change, and climate change effects on soil organic carbon. *Global Change Biology*, 2022, 28(4): 1690-1702.
- [15] Wei Y, Yi M, Yu Y, You Y, Zhang W, Li R, Yu C, Wang S. Global drivers of timber carbon stock from income-based perspective. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1149492.
- [16] 杨明新, 杨秀春, 赵云, 黄青东智, 李成先, 曹文强, 陈昂, 谷强, 李泽宇, 王守兴. 黄河源园区高寒草地碳储量估算及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(9): 3546-3557.
- [17] 贾天朝, 胡西武. 基于 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三江源国家公园碳储量时空变化及驱动力. 环境科学, 2024, 45(10): 5931-5942.
- [18] 许灵凤, 陈皖玲, 朱红梅, 王卫林, 罗飞雪. 湖南省不同土地利用类型碳排放特征与影响因素分析. 环境科学. 2024;1-20. DOI: 10.13227/j.hjx.202406034
- [19] 范强, 孙虎虎, 孙爽, 张津宁. 生态-耕地保护情景下的山东省碳储量估算与演变分析. 生态学报, 2025, 45(4): 1-11. DOI: 10.20103/jstxb.20240521115.
- [20] 唐建亭, 袁杰, 陈宗颜, 李晓燕. 祁连山南坡土地利用变化及碳储量研究. 生态环境学报, 2024, 33(9): 1353-1361.
- [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]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [22] 钟萍. 桂西北干热河谷典型森林类型碳储量特征及其影响因素[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [23] Pan Y D, Birdsey R, Hom J, McCullough K. Separating effects of changes in atmospheric composition, climate and land-use on carbon sequestration of U.S. Mid-Atlantic temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2009, 259(2): 151-164.
- [24] Yan K, Ding Y. The exploration of China's National Park system pilot project: taking Qilian Mountain National Park as an example. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 2020, 8(4): 210-214.
- [25] Wang W, He Z B, Du J, Ma D K, Zhao P. Altitudinal patterns of species richness and flowering phenology in herbaceous community in Qilian Mountains of China. *International Journal of Biometeorology*, 2022, 66(4): 741-751.
- [26] Fang J, Tian Q Y, He Z B, Du J, Chen L F, Lin P F, Zhu X. Response of sap flow in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) to environmental variables in the Qilian Mountains of China. *Trees*, 2022, 36(4): 1261-1272.
- [27] 边瑞. 基于多源遥感数据的祁连山国家公园森林生物量估算研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [28] 徐冬平, 张婉璐, 赵力, 王静. 国家公园与乡村社区融合发展评价研究——以祁连山国家公园青海片区为例. 生态经济, 2024, 40(11): 128-134.
- [29] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [30] Peng S Z, Ding Y X, Li Z. 1-km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901—2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [31] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(1): 79-94.
- [32] 詹远增, 王兴坤, 马彦, 冯存均, 周伟, 邓小渊, 徐盼. 多尺度地表覆盖下的碳储量变化监测对比. 测绘通报, 2024(10): 138-143, 150.
- [33] 赵文鹏, 吕荣芳, 庞吉丽, 张建明, 王乃昂. 2000—2020 年祁连山生态系统服务时空分异研究. 冰川冻土, 2023, 45(4): 1367-1378.
- [34] Ma L B, Zhu Z H, Li S X, Li J Y. Analysis of spatial and temporal changes in human interference in important ecological function areas in China: the Gansu section of Qilian Mountain National Park as an example. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(9): 1029.
- [35] 苏军德, 赵晓阔, 李国霞. 基于 InVEST-FLUS 模型的祁连山国家公园碳储量演化分析及预测. 环境工程, 2024, 42(7): 190-199.
- [36] 刘晶, 鲍振鑫, 刘翠蓉, 王国庆, 刘悦, 王婕, 管晓祥. 近 20 年中国水资源及用水量变化规律与成因分析. 水利水运工程学报, 2019(4): 31-41.
- [37] Hamed K H, Ramachandra Rao A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1/2/3/4): 182-196.
- [38] Halecki W, Bedla D, Ryzek M, Radecki-Pawlik A. Effects of Land Use on the Ecohydrology of River Basin in Accordance with Climate Change. Basel: MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022.
- [39] Schober P, Boer C, Schwarte L A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 2018, 126(5): 1763-1768.
- [40] 胡鑫. 祁连山生态系统服务功能时空变化及价值分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [41] 刘洋, 张军, 周冬梅, 马静, 党锐, 马靖靖, 朱小燕. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究. 生态学报, 2021, 41(10):

4052-4065.

- [42] 唐娜, 张震域, 廉耀康, 董国涛, 高喆, 李凯. 基于 InVEST 模型的黑河流域碳储量时空变化分析. 人民黄河, 2024, 46(8): 99-103, 122.
- [43] 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. 生态学报, 2021, 41(1): 360-373.
- [44] 林晓婉. 基于土地利用变化的城市碳储量时空演变及预测——以重庆市为例[D]. 昆明: 云南师范大学, 2024.
- [45] 郝嘉元, 智烈慧, 李晓文, 董世魁, 李巍. 青藏高原土地利用格局和生态系统服务的时空演变特征及关系. 应用生态学报, 2023, 34(11): 3053-3063.
- [46] 赵方圆, 王琼芳, 张华堂, 陈智平, 张璐. 基于 InVEST 模型的甘肃省祁连山林区乔木林碳储量时空变化研究. 西北林学院学报, 2023, 38(4): 233-240.
- [47] 刘建泉, 李进军, 邸华. 祁连山森林植被净生产量、碳储量和碳汇功能估算. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 1-7, 42.
- [48] 李娜, 李清顺, 李宏韬. 祁连山国家公园青海片区森林植被碳储量与碳汇价值研究. 浙江林业科技, 2021, 41(2): 41-46.
- [49] Dieleman W I J, Venter M, Ramachandra A, Krockenberger A K, Bird M I. Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. *Geoderma*, 2013, 204: 59-67.
- [50] 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. 测绘科学, 2023, 48(8): 153-162.
- [51] Padbhushan R, Sharma S, Rana D, Kumar U, Kohli A, Kumar R. Delineate soil characteristics and carbon pools in grassland compared to native forestland of India: a meta-analysis. *Agronomy*, 2020.
- [52] Charan G R, Bharti V K, Jadhav S E, Kumar S, Anghok D, Acharya S, Kumar P, Srivastava R B. Altitudinal variations in soil carbon storage and distribution patterns in cold desert high altitude microclimate of India. *African Journal of Agricultural Research*, 2012, 7(47): 6313-6319.
- [53] Gebrehiwot K, Desalegn T, Woldu Z, Demissew S, Teferi E. Soil organic carbon stock in Abune Yosef afroalpine and sub-afroalpine vegetation, northern Ethiopia. *Ecological Processes*, 2018, 7(1): 6.
- [54] Che M X, Gong Y B, Xu M J, Kang C F, Lv C, He S Q, Zheng J K. Effects of elevation and slope aspect on the distribution of the soil organic carbon associated with Al and Fe mineral phases in alpine shrub-meadow soil. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 141933.
- [55] McEwan R W, Lin Y C, Sun I F, Hsieh C F, Su S H, Chang L W, Song G M, Wang H H, Hwang J L, Lin K C, Yang K C, Chiang J M. Topographic and biotic regulation of aboveground carbon storage in subtropical broad-leaved forests of Taiwan. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(9): 1817-1825.
- [56] Yang X M, Drury C F, Reynolds W D, Yang J Y. How do changes in bulk soil organic carbon content affect carbon concentrations in individual soil particle fractions? *Scientific Reports*, 2016, 6: 27173.
- [57] Schweizer S A, Mueller C W, Höschen C, Ivanov P, Kögel-Knabner I. The role of clay content and mineral surface area for soil organic carbon storage in an arable toposequence. *Biogeochemistry*, 2021, 156(3): 401-420.
- [58] Yost J L, Roden E E, Hartemink A E. Geochemical fingerprint and soil carbon of sandy alfisols. *Soil Systems*, 2019, 3(3): 59.
- [59] Miller K G, Browning J V, Sugarman P J, Monteverde D H, Andreassen D C, Lombardi C, Thornburg J, Fan Y, Kopp R E. Lower to mid-Cretaceous sequence stratigraphy and characterization of CO₂ Storage potential in the mid-Atlantic U.S. coastal plain. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(6): 609-629.
- [60] 彭卓越, 梁煜彬, 方红远, 李梦婷. 南水北调东线江苏-山东段受水区的碳储量时空演变与驱动因子. 南水北调与水利科技: 中英文, 2024, 22(6): 1080-1090.
- [61] 邓诗宇, 张明芳, 侯怡萍, 余恩旭, 李强, 刘子佩, 胡嘉毅, 田洲, 徐亚莉. 气候变化下川西地区森林碳储量对森林管理措施和干扰的长期响应. 生态学报, 2025, 45(1): 210-226.
- [62] 王磊, 高阳, 沈振. 气候变化背景下农田土壤碳储量评估方法研究进展. 农业工程学报, 2024, 40(16): 1-11.
- [63] 杨振奇, 郭建英, 汤鹏程, 刘心宇. 黄河上游十大孔兑生态服务功能协同演变规律及驱动因素分析. 内蒙古水利, 2024(S2): 3-5.
- [64] Oishi A C, Miniati C F, Novick K A, Brantley S T, Vose J M, Walker J T. Warmer temperatures reduce net carbon uptake, but do not affect water use, in a mature southern Appalachian forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 252: 269-282.
- [65] Liu Y, El-Kassaby Y A. Evapotranspiration and favorable growing degree-days are key to tree height growth and ecosystem functioning: Meta-analyses of Pacific Northwest historical data. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 8228.
- [66] Del Grosso S J, Parton W J, Derner J D, Chen M S, Tucker C J. Simple models to predict grassland ecosystem C exchange and actual evapotranspiration using NDVI and environmental variables. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 1-10.
- [67] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. The impact of human disturbance on vegetative carbon storage in forest ecosystems in China. *Forest Ecology and Management*, 2001, 148(1/2/3): 117-123.
- [68] Yang H, Huang J L, Liu D F. Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: Analysis of their concurrent effects on carbon storage. *Applied Geography*, 2020, 115: 102135.
- [69] 单姝瑶, 徐浩杰, 杨磊, 齐效镰, 陈甜, 陈生云, 高雅月. 祁连山国家公园生态承载力年际变化特征及其影响因素分析. 草地学报, 2022, 30(8): 2191-2198.
- [70] 王晓琪, 赵雪雁. 人类活动对国家公园生态系统服务的影响——以祁连山国家公园为例. 自然资源学报, 2023, 38(4): 966-982.
- [71] 田畅, 王让会, 彭擎, 刘春伟, 周丽敏. 基于不同干旱指数的祁连山国家公园水热特征分析. 遥感技术与应用, 2023, 38(1): 200-213.