

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.016.

吕文宝, 徐占军, 郭琦, 等. 黄土高原陆地生态系统碳储量的时间演进与空间分异特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 252-263.

Lü Wenbao, Xu Zhanjun, Guo Qi, et al. Research on the Temporal Evolution and Spatial Differentiation Characteristics of Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 252-263.

黄土高原陆地生态系统碳储量的时间演进与 空间分异特征

吕文宝, 徐占军, 郭琦, 王俊俊, 李哲

(山西农业大学 资源环境学院, 山西 晋中 030801)

摘要: [目的]揭示土地利用变化导致黄土高原陆地生态系统碳储量的时间变化及空间分异, 为维护区域生态安全和土地管理提供理论指导。[方法]运用 GIS、统计模型和地理探测器等方法, 探究了 1985—2019 年黄土高原因 LUCC 引起的陆地生态系统碳储量的变化及空间分异的影响因素。[结果](1) 1985—2019 年黄土高原耕地减少 277.14 万 hm^2 , 林地、草地和建设用地分别增加 167.97 万 hm^2 , 119.35 万 hm^2 , 128.47 万 hm^2 , 其他土地减少 143.75 万 hm^2 。(2) 1985—2019 年黄土高原陆地生态系统碳储量共增加 5 225.51 万 t, 2002 年后, 随着还林还草等生态工程的进一步推进, 碳储量增幅明显, 尤其是植被碳储量。(3) 1985—2002 年黄土高原陆地生态系统碳储量变化热点区域主要集中在陕西、山西、宁夏和内蒙古的部分地市; 冷点区域主要集中在河南、山西、甘肃的部分地市; 2002—2019 年热点区域主要集中在陕西、甘肃、内蒙古和山西的部分地市; 冷点区域主要集中在陕西、河南、山西、内蒙古和宁夏的部分地市。(4) 黄土高原陆地生态系统碳储量空间格局受自然和人类活动的综合影响, 年 NDVI、实际蒸发量、人类活动强度、年降水量、坡度和高程是主要影响因子, 且自然因子和人为因子组合交互作用高于单类型因子之间的组合。[结论]以退耕还林还草为主的生态工程所引起的林、草地面积增加使得黄土高原陆地生态系统碳储量不断增加。在保证粮食安全的前提下, 科学制定差异化的生态治理方案, 强化推进研究区生态工程建设, 限制建设用地扩张, 有利于提高区域碳储量。

关键词: 土地利用变化; 陆地生态系统碳储量; 热点分析; 地理探测器; 黄土高原

中图分类号: F301.2; X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0252-12

Research on the Temporal Evolution and Spatial Differentiation Characteristics of Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems on the Loess Plateau

Lü Wenbao, Xu Zhanjun, Guo Qi, Wang Junjun, Li Zhe

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030801, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the time temporal changes and spatial differentiation in carbon reserves of terrestrial ecosystems on the Loess Plateau caused by land use changes and their mechanisms, and to provide theoretical guidance for maintaining ecological safety and land management on the Loess Plateau. [Methods] GIS (Geographic Information System), statistical models and geographic probes were used to investigate the temporal changes and spatial variation of terrestrial ecosystem carbon storage due to LUCC on the Loess Plateau and the influencing factors of spatial differentiation from 1985 to 2019. [Results] (1) From 1985 to 2019, arable land on the Loess Plateau decreased by 2 771 400 hm^2 , while forest land, grassland and construction land increased by 1 679 700 hm^2 , 1 193 500 hm^2 and 1 284 700 hm^2 , respectively, and other land decreased by 1 437 500 hm^2 . (2) From 1985 to 2019, the carbon stock of terres-

收稿日期: 2023-05-23

修回日期: 2023-06-08

资助项目: 国家自然科学基金(51304130); 山西政府重大决策咨询课题(ZB20211703); 山西省基础研究计划项目(20210302123403)

第一作者: 吕文宝(1999—), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 研究方向为土地生态与资源环境评价。E-mail: lw20202505@163.com

通信作者: 徐占军(1983—), 男, 山西朔州人, 博士, 教授, 主要从事土地复垦与生态修复研究。E-mail: xzju163@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

terrestrial ecosystems on the Loess Plateau increased by a total of 52.255 1 million tons. After 2002, with the further promotion of ecological projects such as returning forests to grass, the carbon storage increased significantly, especially the carbon storage of vegetation. (3) The hot spot areas for carbon stock changes in terrestrial ecosystems on the Loess Plateau from 1985 to 2002 mainly concentrated in Shaanxi, Shanxi, Ningxia and parts of Inner Mongolia. The cold spot areas mainly concentrated in parts of Henan, Shanxi and Gansu. The hot spot areas from 2002 to 2019 mainly concentrated in Shaanxi, Gansu, Inner Mongolia and some cities in Shanxi. The cold spot areas mainly concentrated in Shaanxi, Henan, Shanxi, Inner Mongolia and some cities in Ningxia. (4) The spatial pattern of carbon storage in terrestrial ecosystems on the Loess Plateau was influenced by a combination of natural and human activities, with annual NDVI, actual evapotranspiration, intensity of human activity, annual precipitation and slope gradient being the main influencing factors, and the interaction between the combination of natural factors and human factors was higher than that between single-type factors. [Conclusion] The increase in forestland and grassland area caused by the ecological project of returning farmland to forestland and grassland has led to an increase in carbon storage in terrestrial ecosystems on the Loess Plateau. With respect to the premise of ensuring food security, the scientific formulation of the differentiated ecological management plans, the promotion of the enhanced ecological engineering in the study area and the restriction of land expansion for construction are conducive to increasing regional carbon storage.

Keywords: land use change; terrestrial ecosystem carbon storage; hot spot analysis; geographic probe; Loess Plateau

陆地生态系统碳储量是地球上最主要的碳储量之一,在全球碳循环中起到十分重要的作用^[1]。土地利用/覆被变化(land use/cover change, LUCC)所带来的碳源和碳汇作为碳预算的重要组成部分,是决定陆地生态系统碳储量的关键性因素,还是研究陆地生态系统状况及其与大气之间碳平衡问题的关键^[1-2]。据估算,1850—1990年,以森林生态系统为主的土地利用变化导致124 Pg(C)排放到大气中,占人类活动所引起碳排放量的33%,约占同期能源消费导致的碳排放量的50%^[3]。我国是世界上生态脆弱区面积最大、脆弱生态类型最多的国家之一。水土流失、植被破坏,加之风沙、干旱等自然灾害,时刻危害着生态系统的生物多样性以及水、碳和养分的循环、能量平衡。作为反映生态系统健康状况的关键性指标——陆地生态系统碳储量,一旦其出现明显的变化,将会影响整个生态系统的初级生产力以及全球的碳排放和气候变化,甚至带来不可估量的全球生态危机。科学评估土地利用变化导致陆地生态系统碳储量的时空变化,探讨碳储量空间分布差异及影响因素,对于制定区域碳增汇、减排政策,保障生态安全具有重要意义。

国内外学者针对土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响已展开了多方面的研究。Houghton等^[4]对美国碳预算的土地利用变化部分进行了估算,并对目前已有的土地利用变化引起的碳排放研究进

行了比较讨论,总结了碳储量变化的主要计算方法,包括簿记模型、基于卫星数据、过程模型等。Guo等^[5]对已发表的LUCC导致土壤碳储量变化的相关文献进行了meta分析,发现一般土地利用发生变化导致土壤碳储量减少的区域,相反的土地变化过程则会提高土壤碳储量。国内曲福田等^[6]定性讨论了不同土地类型相互转化及其内部渐变所引起的碳效应,农地向非农地转换会造成碳储量流失,而耕地转换为林地、草地会增加土壤、植被中的有机碳储量。以往研究所提出的方法理论为当前对陆地生态系统碳储量的研究提供了借鉴,但也存在着一定的局限。例如,以往研究大多集中定量评估土壤^[7]、植被^[8]或者是农用地^[9]生态系统碳储量的变化。就研究的时间和空间尺度而言,以往研究往往从城市或城市群^[10]、省^[11]、国家^[12]尺度进行研究,时间跨度大多在20~30 a,较少地从长时间序列上对地理上的某一整体区域进行分析。并且以往碳储量估算中的碳密度数据大多未进行修正且较少考虑到土地利用类型发生变化后土壤碳储量需20 a左右的时间才能重新恢复平衡这一问题^[13]。

多年来,我国通过开展包括退耕还林还草、“三北”防护林等在内的一系列治理工程来改善黄土高原地区的生态环境,恢复和维护生态系统的稳定。因黄土高原地区在我国生态建设工作中的重要地位,本文选取其作为研究区域,基于ArcGIS平台,采用高分

分辨率、长时间序列的土地利用遥感数据、修正后的碳密度等数据,通过碳储量估算模型和热点分析等工具,以全面开展退耕还林还草工作 2002 年作为时间节点,探讨 1985—2019 年黄土高原地区内的土地利用及陆地生态系统碳储量的时空变化和热点、冷点分布,并应用地理探测器探究年 NDVI、人类活动强度、年降水量等自然和人为因素对碳储量空间分布的影响。以期为黄土高原地区编制治理规划、加强生态建设及应对“双碳”挑战提供重要支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于我国中部偏北(33° — 41° N, 100° — 114° E),东起太行山,西至乌鞘岭,南连秦岭,北抵长城,横跨中国青、甘、宁、蒙、陕、晋、豫 7 个省区,全区总面积约 64 万 km^2 ,是世界上面积最大的黄土区,同时也是我国生态环境最为脆弱的地区之一(图 1)。地势呈现从西北向东南递减的趋势,主要地貌类型为山地、丘陵和高原等,其中西部为黄土高原沟壑区和农灌区,中部为黄土丘陵沟壑区,北部为土石山区、农灌区以及沙地和沙漠区,东部为河谷平原区和土石山区。降水具有季节性特征,总体上呈自东南向西北递减的趋势。耕地和草地是黄土高原区的主要土地利用类型,其次为林地、其他土地,建设用地和水域。

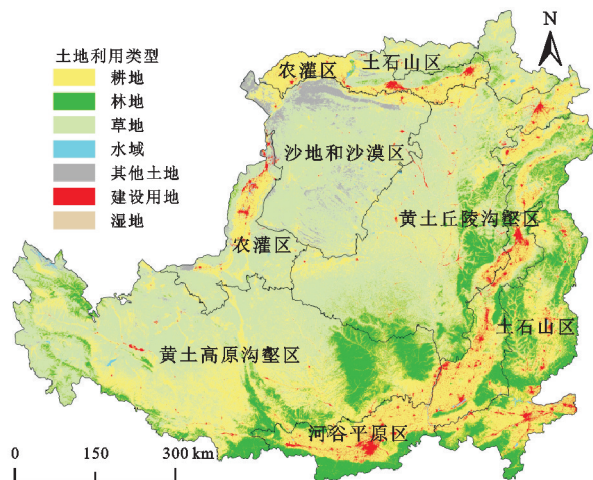


图 1 黄土高原治理分区及土地利用类型

Fig. 1 Governance zoning and land use types of Loess Plateau

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 土地利用数据 1985 年、2002 年、2019 年 3 期黄土高原土地利用数据采用 Yang 等^[14]制作的 1985—2021 年中国土地利用/覆被分类数据集,该数据集基于 Landsat 系列卫星的遥感影像制作而成,分辨率为 30 m,时间序列覆盖 1985—2021 年,整体准确性较好,精度满足本研究需要。时间选取依据:一是土壤碳储量受土地利用变化扰动后要达到新的平

衡状态需 20 a 左右的时间^[13],二是 2002 年是我国退耕还林还草工程全面启动年,有利于对比工程启动前后研究区的生态系统碳储量变化。基于 ArcGIS 平台提取黄土高原区 3 期土地利用数据,并按照第三次全国国土调查土地分类系统进行重分类(表 1)。

表 1 土地利用分类系统

Table 1 Land use classification system

编号	数据集土地分类系统	编号	三调土地分类系统
1	农田	1	耕地
2	森林	2	林地
3	灌木	3	草地
4	草地	4	水域
5	水域	5	其他土地
6	积雪冰川	6	建设用地
7	贫瘠地	7	湿地
8	建设用地		
9	湿地		

1.2.2 碳密度数据 黄土高原区内各类生态系统的碳密度数据主要参考中国陆地生态系统碳密度数据集,来源于国家生态科学数据中心(<http://www.cern.org.cn/>)。数据集中不包含的碳密度数据,参考其他研究成果,耕地植被碳密度参考李克让等^[15]对中国农田植被碳密度的研究成果,建设用地的植被、土壤碳密度以及其他土地的植被碳密度数据参考揣小伟等^[11]的研究,水域的土壤和植被密度默认为 0^[8]。采用 Alam^[16]和陈光水^[17]等的碳密度修正公式依据降水量和气温进行修正,得到符合研究区的碳密度数据。研究区实测点选取步骤:将数据集中的中国植被碳密度实测点数据导入 ArcMap 平台,通过黄土高原矢量范围筛选出研究区内的碳密度实测点,计算各类生态系统碳密度的均值并进行修正作为最终碳密度(图 2)。

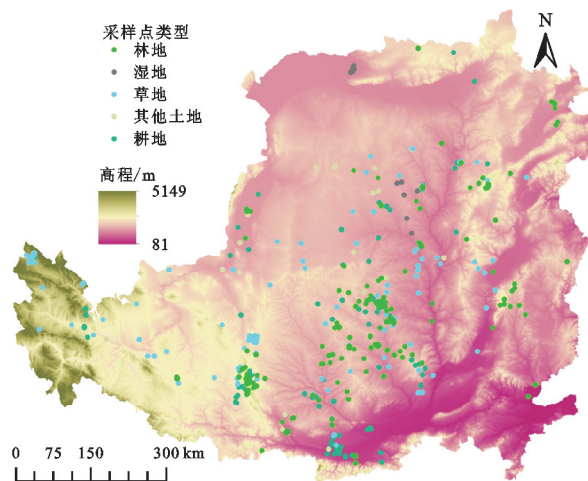


图 2 黄土高原碳密度实测样点分布

Fig. 2 Distribution map of measured samples of carbon density on the Loess Plateau

$$K_{BP} = \frac{e^{0.0054MAP_1}}{e^{0.0054MAP_2}} \quad (1)$$

$$K_{SP} = \frac{3.3968MAP_1 + 3996.1}{3.3968MAP_2 + 3996.1} \quad (2)$$

$$K_{BT} = \frac{28MAT_1 + 398}{28MAT_2 + 398} \quad (3)$$

式中: K_{BP} 、 K_{BT} 分别为植被碳密度的年均降水、年均

气温修正因子; K_{SP} 为土壤碳密度的年均降水修正因子。 MAP_1 、 MAT_1 、 MAP_2 、 MAT_2 分别为黄土高原区的年均降水(mm)、年均气温($^{\circ}C$)和对应参考文献研究区的年均降水量(mm)、年均气温($^{\circ}C$)。将计算得到的修正因子分别与其参考碳密度相乘,得到各地类的最终碳密度(表 2)。

表 2 不同土地利用类型的碳密度数据
Table 2 Carbon density data for different land use types

土地利用 类型	植被碳密度			土壤碳密度		
	X_{max}	X_{min}	X	X_{max}	X_{min}	X
耕地			2.29	208.30	9.35	62.85
林地	175.00	0.08	25.51	309.41	5.49	71.13
草地	5.43	0.06	1.05	274.90	5.73	66.95
水域			0		0	0
其他土地	2.50	0.08	0.83			52.70
建设用地			0			51.57
湿地	3.08	0.27	1.36	206.66	5.53	15.02

注: X_{max} 为研究区碳密度样点的最大值; X_{min} 为研究区碳密度样点的最小值; X 为研究区碳密度最终选取值。

1.2.3 其他数据 陆地表层人类活动强度采用徐勇等^[18]的计算模型,将研究区划分为若干个 5 km×5 km 的网格,分别计算各格网内的人类活动强度。实际蒸发量来源于哈佛大学开源数据库(<https://data-verse.harvard.edu/>);年均气温、年降水量、夜间灯光强度来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpcd.ac.cn/>);高程、坡度、年度归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)。

$$HAILS = \frac{S_{CLE}}{S} \times 100\% \quad (4)$$

$$S_{CLE} = \sum_{i=1}^n (SL_i \cdot CI_i) \quad (5)$$

式中:HAILS 为陆地表层人类活动强度; S_{CLE} 为建设用地当量面积; S 为区域总面积; n 为地类数量; SL_i 为第 i 土地利用类型的面积; CI_i 为第 i 类土地利用类型的建设用地折算系数。

1.3 研究方法

1.3.1 碳储量估算

(1) 陆地生态系统总碳储量的变化。LUCC 导致的碳储量变化主要有两个来源:植被碳储量和土壤碳储量变化^[13]。因此,土地利用变化引起的生态系统总碳储量变化的估算公式如下:

$$\Delta C = \Delta C_{VEG} + \Delta SOC \quad (6)$$

式中: ΔC 为陆地生态系统碳储量变化; ΔC_{VEG} 为植被

碳储量变化; ΔSOC 为 LUCC 引起表土的土壤碳储量变化。

(2) 植被碳储量和土壤碳储量的变化。根据不同年份黄土高原区土地利用类型变化以及各土地利用类型的植被碳密度和土壤碳密度数据来分别计算植被和土壤碳储量的变化。LUCC 导致植被和土壤碳储量变化的计算公式如下:

$$\Delta C_{VEG} = \sum_{i=1}^n [(VD_{AFTERi} - VD_{BEFOREi}) \Delta S_i] \quad (7)$$

$$\Delta SOC = \sum_{i=1}^n [(SOCD_{AFTERi} - SOCD_{BEFOREi}) \Delta S_i] \quad (8)$$

式中: VD_{AFTERi} 为土地利用类型变化后的植被碳密度数据; $VD_{BEFOREi}$ 为土地利用类型变化前的植被碳密度数据; SOC_{AFTERi} 为土地利用类型变化后的土壤碳密度数据; $SOC_{BEFOREi}$ 为土地利用类型变化前的土壤碳密度数据; ΔS 为土地利用类型发生变化的面积; i 为由一种土地利用类型转化为另一种。

1.3.2 冷热点分析 冷热点分析作为一种空间分析方法,能够有效地检验全局聚集性,目前广泛应用于社会经济和生态环境研究中,通过 ArcGIS 平台 Getis-Ord G_i^* 工具来识别热点和冷点,即统计上显著的高值空间聚集和低值空间聚集^[19]。将黄土高原区划分成若干 10 km×10 km 的网格,统计各网格内的碳储量变化并进行冷热点分析,得到 p 值和 Z 得分,比较碳储量变化的空间集聚和相关性。若 Z 得分为负值且显著,

属于碳储量减少聚集区,相反,若 Z 得分为正且显著,则属于碳储量增加聚集区。

1.3.3 地理探测器 地理探测器是一种探究空间异质性、量化其驱动因素的空间统计方法,其基本原理是将总样本划分为若干个子样本,通过方差判断空间异质性和变量关系^[20]。软件来源于(<http://www.geodetector.cn/>)。因子探测器探究人类活动强度、年均 NDVI、高程、坡度等因素对研究碳储量空间分异的解释力度,用 q 值衡量。交互探测器则用于探究不同因子之间的交互作用,即因子与因子之间组合后对因变量的解释力是增强、削弱还是相互独立。

表 3 1985—2019 年黄土高原土地利用结构及动态度

Table 3 Land use structure and dynamics of Loess Plateau from 1985 to 2019

土地类型	1985 年 面积/万 hm^2	2002 年 面积/万 hm^2	2019 年 面积/万 hm^2	1985—2002 年 动态度/%	2002—2019 年 动态度/%	1985—2019 年 动态度/%
耕地	2158.53	2043.61	1881.39	-5.32	-7.94	-12.84
林地	789.98	837.43	957.95	6.01	14.39	21.26
草地	3126.37	3203.15	3245.72	2.46	1.33	3.82
水域	27.91	26.65	33.01	-4.51	23.89	18.30
其他土地	327.11	270.94	183.36	-17.17	-32.33	-43.95
建设用地	62.89	111.02	191.36	76.52	72.37	204.26
湿地	0.001	0.001	0.004	1.49	256.62	261.94

1985—2002 年土地利用类型发生变化的面积共 922.80 万 hm^2 ,占土地总面积的 14.21%(图 3)。期间耕地面积减少 114.92 万 hm^2 ,主要流向草地,建设用地面积增加 48.13 万 hm^2 ,耕地是其主要转化来源,草地面积增加 76.78 万 hm^2 ,林地面积增加 47.45 万 hm^2 ,其他土地减少 56.17 万 hm^2 。这一阶段我国城市化发展水平稳步提高,对建设用地的需求也在不断增长,但以耕地、林地为主的农用地总体面积变化不大。2002—2019 年的土地利用类型转变方向与第一阶段相同,但变化更加剧烈,土地利用类型发生变化的土地面积共 1 068.20 万 hm^2 ,占土地总面积的 16.45%;期间耕地面积减少 162.22 万 hm^2 ,也是主要流向草地,建设用地面积增加 80.34 万 hm^2 ,草地面积增加 42.57 万 hm^2 ,林地面积增加 120.52 万 hm^2 ,主要是由草地转化而来,其他土地减少 87.58 万 hm^2 。

对空间分布进行分析发现,1985—2002 年和 2002—2019 年两个时间段内的土地利用变化在空间和类型上具有相似性(图 4)。变化最为集中的地区有陕西的西安市、榆林市和延安市,宁夏的银川市、石嘴山市和固原市,甘肃的定西市、天水市和平凉市,内蒙古的鄂尔多斯市、乌海市,山西的太原市、临汾市和大同市。从分布特点上来看,这些区域大多属于重点

2 结果与分析

2.1 黄土高原土地利用变化的时空特征分析

1985—2019 年,黄土高原地区土地利用类型发生了较为剧烈的变化,土地利用类型发生改变的土地面积共 1 369.50 万 hm^2 ,占黄土高原总面积的 21.09%,主要以耕地、林地、草地和建设用地的面积变化为主(表 3)。其中耕地面积减少 277.14 万 hm^2 ,主要流向了林地、草地及建设用地,林地面积增加 167.97 万 hm^2 ,建设用地扩张明显,增加 128.47 万 hm^2 ,草地面积增加 119.35 万 hm^2 ,其他土地减少 143.75 万 hm^2 ,水域面积增加 5.10 万 hm^2 ,湿地面积增加 0.003 万 hm^2 。

生态治理区域,基本以耕地、林地和草地之间的转换为主。此外,各省份处于平原地区的城市中心区域,尤其是省会城市,如太原市、西安市、兰州市等,存在一定数量且空间分布集中的地类变换,主要为耕地、草地等农用地转换为建设用地。

2.2 黄土高原陆地生态系统碳储量的时空变化特征分析

2.2.1 时间序列变化 黄土高原内较为剧烈的土地利用变化导致陆地生态系统的植被碳储量和土壤碳储量都发生了不同程度的变化。1985—2019 年内土壤碳储量增加 1 569.06 万 t,植被碳储量则增加 3 656.45 万 t,生态系统碳储量共增加 5 225.51 万 t,年均增加 154.00 万 t(表 4)。草地转为林地、耕地转为林地和耕地转为草地是研究区生态系统碳储量增加的主要原因。从不同土地类型的生态系统碳储量来看,草地、耕地和林地构成了黄土高原陆地生态系统碳储量的主体,其次是其他土地、建设用地和湿地。研究期间,耕地和其他土地面积的减少导致其碳储量分别减少 18 052.60 万 t,7 695.30 万 t,而林地、草地和建设用地面积的增加则导致各自碳储量分别增加 16 232.31 万 t,8 115.73 万 t,6 625.33 万 t,湿地由于面积较小,碳储量变化并不明显(图 5)。

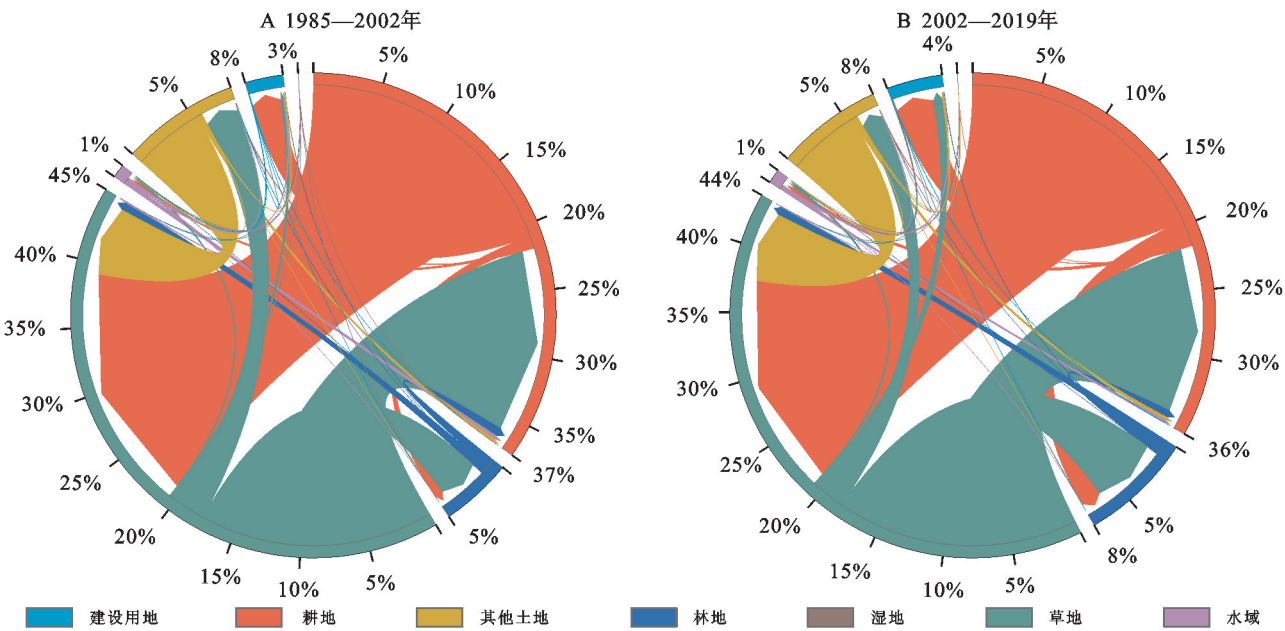


图 3 1985—2002 年和 2002—2019 年土地利用变化弦图

Fig. 3 Graph of land use changes from 1985 to 2002 and 2002 to 2019

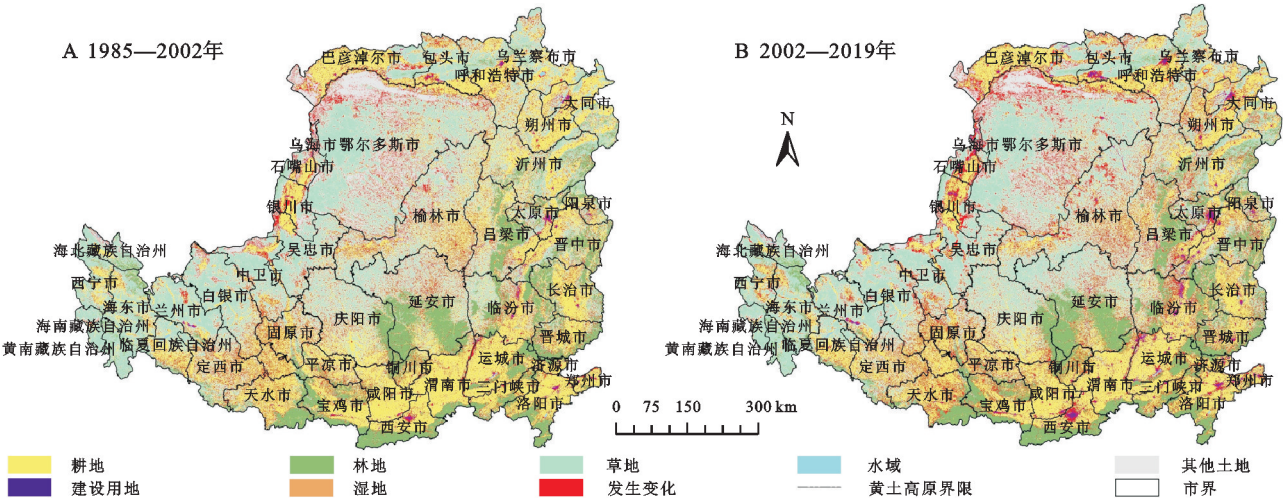


图 4 1985—2002 年和 2002—2019 年内黄土高原地区土地利用变化的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use changes in the Loess Plateau from 1985 to 2002 and from 2002 to 2019

表 4 1985—2019 年黄土高原陆地生态系统碳储量变化

Table 4 Changes in carbon storage of terrestrial ecosystems on the Loess Plateau from 1985 to 2019 10^4 t

研究阶段	陆地总碳储量	植被碳储量	土壤碳储量
1985—2002 年	1795.45	981.38	814.07
2002—2019 年	3430.06	2675.07	754.99
1985—2019 年	5225.51	3656.45	1569.06

从不同的研究阶段来看,1985—2002 年,研究区植被碳储量增加 981.38 万 t,土壤碳储量增加 814.07 万 t,生态系统碳储量共增加 1 795.45 万 t,草地转为林地、其他土地转为草地和耕地转为草地是碳储量增加的主要原因(表 4—5)。2002—2019 年,植被碳储量增加 2 675.07 万 t,土壤碳储量增加 754.99 万 t,生态系统碳储

量共增加 3 430.06 万 t,草地转为林地、其他土地转为草地和耕地转为林地是碳储量增加的主要原因(表 4、表 6)。此外值得注意的是,因为建设用地侵占的农用地面积远小于林地草地面积的增加,所以建设用地面积增加导致生态系统碳储量的流失量并不明显。

2.2.2 空间格局变化 在空间分布上,研究区两个时间段内的土地利用变化和生态系统碳储量的变化保持着一致性(图 4、图 6—7)。从黄土高原的市级行政区划和综合治理分区来看,第一个时间段内,碳储量流失主要集中在黄土高原沟壑区的中部,即甘肃的平凉市、定西市、天水市和宁夏的固原市、中卫市等地;碳储量增加则主要集中在黄土丘陵沟壑区和黄土高原沟壑区的交界、土石山区的东部,即陕西的延安市、榆林市、宝鸡市,山西的晋城市、长治市、晋中市等

地。第二个时间段碳储量流失主要集中于河谷平原区和农灌区,即山西的晋中市、临汾市、运城市和陕西的西安市、咸阳市,宁夏的吴忠市、银川市、石嘴山市,内蒙古的呼和浩特市、包头市、巴彦淖尔市等地;陕西的延安市、榆林市依旧呈现碳储量增加状态,且增幅明显,甘肃的平凉市、定西市、天水市和宁夏的固原市、中卫市明显地由碳源转为碳汇,碳储量呈增加状态,此外同样位于黄土丘陵沟壑区的山西的忻州市、吕梁市也明显表现出碳储量增加状态。

以省作为单位进行计算(图 8),1985—2019 年,陕西碳储量的增量最高,达 1 670.60 万 t,其次是山西和内蒙古,分别增加 1 603.15 万 t,1 060.66 万 t,仅河南省碳储量呈流失状态,减少 143.56 万 t。林地的碳密度最高,其次是草地和耕地,大量耕地向林草用地以及草地向林地转化是碳储量增加的主要原因。而河南的洛阳市、三门峡市等地在 2002 年以前同时

存在着大面积的耕地转为建设用地和林地转为耕地的现象,使得碳储量明显减少,但随着还林还草等政策的逐步推行加强,以林地为主的生态用地得到补充,河南碳储量略微增加。

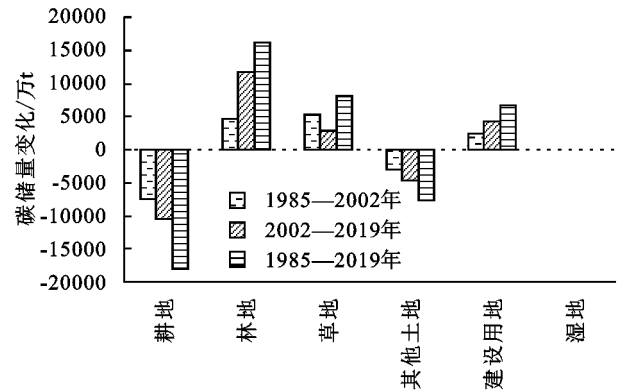


图 5 1985—2019 年黄土高原区内各类生态系统碳储量的变化
Fig. 5 Changes in carbon storage of various ecosystems in the Loess Plateau from 1985 to 2019

表 5 1985—2002 年黄土高原碳储量转移矩阵

Table 5 1985—2002 Loess Plateau carbon storage transfer matrix		10 ⁴ t						
年份	土地利用类型	2002 年						
		耕地	林地	草地	水域	其他用地	建设用地	湿地
1985	耕地	0	383.50	983.88	−247.11	−12.82	−562.06	−0.01
	林地	−384.10	0	−335.50	−3.40	0	−2.05	0
	草地	−759.25	1695.94	0	−158.34	−697.35	−71.43	−0.04
	水域	355.35	4.74	113.74	0	32.84	91.54	0
	其他土地	49.86	0.01	1431.17	−66.84	0	−3.20	0
	建设用地	2.40	0	0.35	−46.43	0.01	0	0
	湿地	0	0	0.04	0	0	0	0

表 6 2002—2019 年黄土高原碳储量转移矩阵

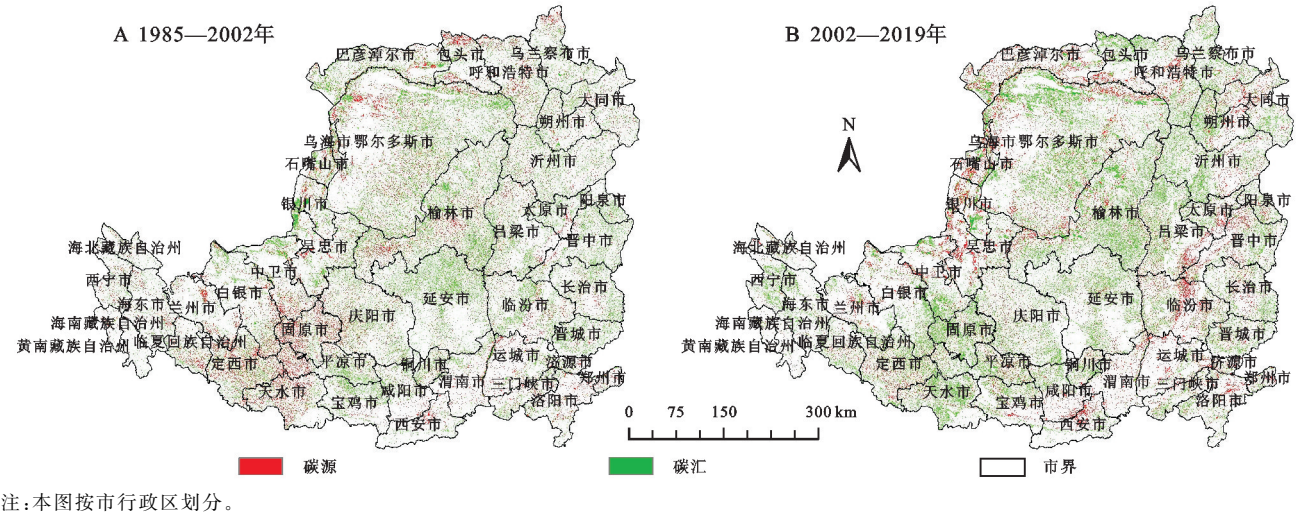
Table 6 2002—2019 Loess Plateau carbon storage transfer matrix		10 ⁴ t						
年份	土地利用类型	2019 年						
		耕地	林地	草地	水域	其他用地	建设用地	湿地
2002	耕地	0	1086.45	1020.24	−454.27	−8.78	−851.27	−0.02
	林地	−368.81	0	−402.83	−1.02	−0.11	−16.25	0
	草地	−793.92	3209.41	0	−255.50	−518.81	−261.51	−0.15
	水域	267.35	10.41	69.27	0	45.02	80.24	0
	其他土地	64.36	0.18	1677.47	−65.26	0	−4.61	0
	建设用地	7.07	0.03	0.46	−104.79	0.01	0	0
	湿地	0	0	0.02	0	0	0	0

2.2.3 冷热点分析 对黄土高原陆地生态系统碳储量变化的空间分布进行冷热点分析发现(图 9),1985—2002 年热点区域主要集中在陕西的榆林市、延安市、铜川市和宝鸡市,山西的太原市、晋中市、忻州市、阳泉市、长治市、晋城市,宁夏的银川市和中卫市,内蒙古的鄂尔多斯市等地;冷点区域主要集中在河南的郑州市、洛阳市和三门峡市,山西的临

汾市和运城市,甘肃的天水市和固原市等地。2002—2019 年生态系统碳储量变化的热点区域主要集中在陕西的延安市、榆林市、铜川市、宝鸡市和咸阳市,甘肃的天水市和平凉市,内蒙古的鄂尔多斯市,山西的忻州市、晋中市、晋城市和临汾市等地;冷点区域主要集中在陕西的西安市、渭南市和咸阳市,河南的洛阳市和郑州市,山西的晋中市、吕梁市和运

城市,内蒙古的呼和浩特市、包头市和乌海市,宁夏的银川市、石嘴山市和吴忠市。总的来看,碳储量变化由冷到热和由热到冷的区域主要集中在黄土高

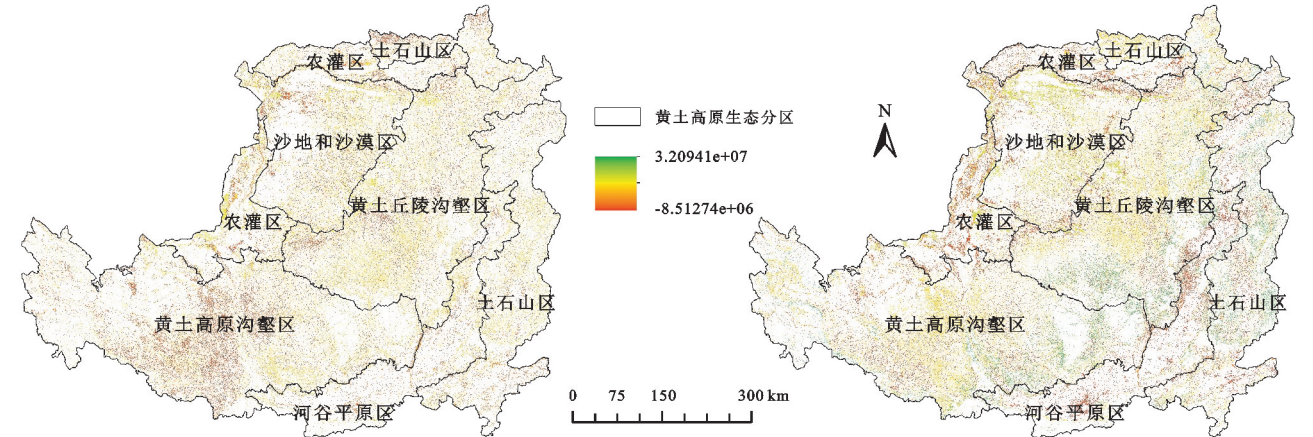
原的中部与西北部地区,即宁夏的银川市、石嘴山市、吴忠市和内蒙古的鄂尔多斯市、乌海市,甘肃的天水市、平凉市等地。



注:本图按市行政区划分。

图 6 1985—2002 年和 2002—2019 年内 LUC 导致生态系统碳储量变化的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of changes in ecosystem carbon storage caused by LUC in 1985—2002 and 2002—2019



注:本图按综合治理分区划分。

图 7 1985—2002 年和 2002—2019 年内 LUC 导致生态系统碳储量变化的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of changes in ecosystem carbon storage caused by LUC in 1985—2002 and 2002—2019

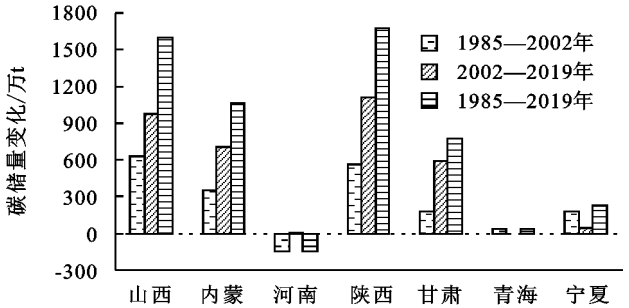


图 8 1985—2019 年黄土高原内各省份碳储量变化

Fig. 8 Changes in carbon storage in various provinces in the Loess Plateau from 1985 to 2019

2.3 黄土高原陆地生态系统碳储量空间分异的驱动因素

地理探测器结果显示,黄土高原生态系统碳储量的空间分布受自然因素、人为因素的综合影响。选

取的 8 个因子对于碳储量的空间分异均有显著影响 ($p<0.05$),但不同的因子之间解释力相差较大(表 7)。1985—2019 年,年度 NDVI 的 3 年 q 值最高,其次是实际蒸发量、人类活动强度、年降水量和坡度, q 值多在 0.2~0.5 区间,是研究区碳储量的空间分异的主要驱动因子,此外年 NDVI、实际蒸发量、年降水量随时间变化解释力略微下降。高程、年均气温和夜间灯光强度的 q 值均小于 0.1,是影响研究区碳储量空间分异的次要因子。

交互探测器结果显示,1985—2019 年驱动因子对碳储量的影响展现协同增强的作用效果,并分为双因子和非线性两种形式的增强(表 8,仅按影响力大小列出部分)。自然因素和人为因素组合后的交互作用明显强于单类型因子组合,如人类活动强度作为社

会经济活动的直接体现,分别与年 NDVI、年降水量和实际蒸发量组合,解释力均超过了 0.6,位于历年前三,而年 NDVI、高程、坡度等自然因子内部组合的解释力明显变弱。

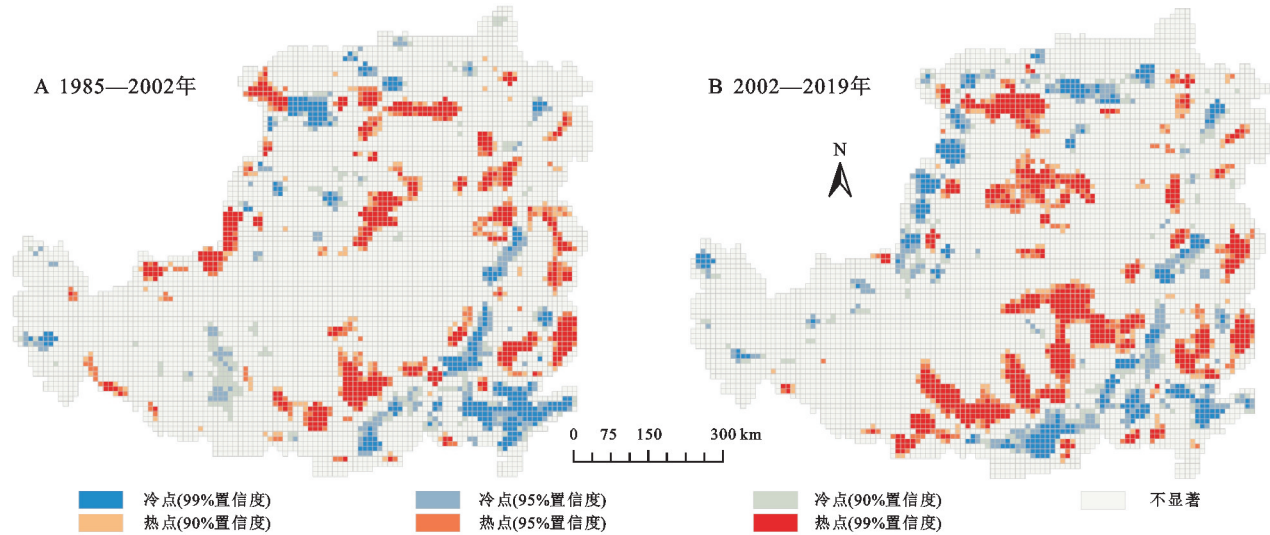


图 9 1985—2019 年黄土高原陆地生态系统碳储量变化热点和冷点空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of hot spots and cold spots for changes in carbon storage of terrestrial ecosystems on the Loess Plateau from 1985 to 2019

表 7 黄土高原碳储量空间分异影响因子探测 q 值统计

Table 7 Statistics of the detection q value of the influence factor of spatial differentiation of carbon storage on the Loess Plateau

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
1985	0.2146	0.0180	0.0348	0.2712	0.3888	0.4836	0.4115	0.0371
2002	0.1973	0.0329	0.0405	0.3072	0.2880	0.4417	0.3979	0.0385
2019	0.1985	0.0364	0.0551	0.3379	0.2956	0.4336	0.3585	0.0453

注: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$ 分别代表坡度、夜间灯光强度、高程、人类活动强度、年降水量、年 NDVI、实际蒸发量、年均气温,下表同。

表 8 主要交互因子及其变化

Table 8 The main interaction factors and associated changes

序号	1985 年	2002 年	2019 年
1	$X_5 \cap X_4 (0.7304)$	$X_4 \cap X_7 (0.6962)$	$X_6 \cap X_4 (0.6766)$
2	$X_6 \cap X_4 (0.7299)$	$X_5 \cap X_4 (0.6941)$	$X_7 \cap X_4 (0.6620)$
3	$X_7 \cap X_4 (0.7163)$	$X_6 \cap X_4 (0.6895)$	$X_4 \cap X_5 (0.6363)$
4	$X_6 \cap X_3 (0.6091)$	$X_3 \cap X_6 (0.5845)$	$X_6 \cap X_7 (0.5802)$
5	$X_4 \cap X_1 (0.5972)$	$X_1 \cap X_4 (0.5807)$	$X_1 \cap X_7 (0.5612)$
6	$X_8 \cap X_6 (0.5706)$	$X_3 \cap X_7 (0.5709)$	$X_6 \cap X_3 (0.5520)$

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 土地利用与碳储量的时空变化 近 40 a 的研究期间内,黄土高原内耕地、林地、草地以及建设用地等地类发生了较为剧烈的变化,转变类型以耕地转为草地、林地和建设用地,草地转为耕地、林地为主,这与目前大部分研究的结果保持一致^[21]。其背后的主要原因有:随着我国经济快速发展,研究区内的人口不断增长,城市化快速提升,在此背景下,导致大量以耕地为主的农用地转化为非农建设用地,以满足不断增长的城市扩张需求^[22];以及从 20 世纪 80 年代开

始在该区域开展的一系列以水土保持为主的生态建设工作,如防护林建设、退耕还林还草工程、封山还草工程等^[23]。这些活动也从空间上解释了土地利用变化为何主要集中分布在城市周围以及重要生态治理区域。此外,以降水量为代表的自然因素也是影响研究区土地利用变化的重要因素,一般降水量和气温的增加有助于植被恢复,但过高的气温会加剧土壤的干燥程度,抑制植被生长^[24]。

碳储量方面,黄土高原内的植被碳储量与土壤碳储量在两个时间段均出现了不同程度的净增加。主要得益于研究区开展的退耕还林还草、防护林建设等重要生态保护工作,促使大量碳密度较低的坡耕地、裸土地和沙地等地类经过退耕或开发治理转换为高碳密度的林草用地^[23],三十多年来黄土高原内上升的气温和增加的降水量,也进一步促进了森林、草地植被的生长恢复和覆盖度的提高^[25],这都使得研究区内的植被和土壤碳储量不断增加。尤其是 2002 年后退耕还林还草工作的全面开展、“西北”防护林四期、五期工程和太行山绿化工程的推进,耕地、林地和草地等地类转换更加剧烈,使得生态植被面积在

2000年后的20 a里快速增长,因此第二阶段内植被碳储量的累计速度和总量都明显高于第一阶段,形成明显对比,这也一定程度上解释了为何碳储量增加在空间上主要集中于山西、陕西和甘肃等省份。碳密度较高的地类转为碳密度较低的地类则会造成碳储量流失,西安市、太原市和兰州市等省会城市周边较为集中但幅度较小的碳储量流失,这是因为城区扩张导致其周围的农用地转化为建设用地,导致地上地下碳储量的流失^[6];鄂尔多斯市和巴彦淖尔市等地在空间上表现为较为分散的碳储量流失和增加状态,原因是放牧、砍伐等人类活动和气候因素造成的水土流失和荒漠化等土地退化问题,使得大量的草地、林地转化沙地、裸土地等其他土地,造成碳储量流失,同时在经过大范围的植树种草、轮封轮牧等生态综合治理措施下,也存在耕地、其他土地转化为草地和草地转化为林地等地类转化活动,致使碳储量增加^[26]。提高区域生态系统碳储量,一方面应在保证粮食安全的前提下,进一步稳定和扩大还林还草范围,持续推进国土绿化、防护林建设等生态工程,以此促进环境条件较差的坡耕地、沙地等地类转为林草用地,提高林草质量,利于碳储量积累;另一方面也需要严格限制区域新增建设用地规模,强化用途管制,防止生态空间占用,造成碳储量流失。

3.1.2 碳储量空间分异的驱动因素 地理探测器的结果表明,自然因素和人为因素都会对碳储量空间分布格局产生重要影响,且二者组合会产生协同增强的效果。NDVI是影响碳储量空间分异的主要影响因素,其次是人类活动强度和年降水量。NDVI反映了植被覆盖度,是量化植被生长状况的重要指标和生态环境的基础,可以估测地上生物量的高低。人类活动强度越高,则表示人类自然改造活动越强,导致地表自然覆被受到破坏,土壤表层的水分、养分和空气交流受到干扰,不利于土壤碳储量和植被碳储量的累计^[6,18]。蒸发量与降水量是衡量、评估区域水量盈亏程度的重要指标,对于植被生产力、生物量的累计具有重要影响^[27]。坡度代表地表倾斜程度,坡度越大尤其是大于25°的地区,经过退耕还林还草等活动后,往往都变成了碳密度较高的林地、草地^[23]。黄土高原内不同的空间位置,其降水、人类活动、温度、坡度等环境条件存在着较大的差异,因此根据其外部条件制定相应的生态保护措施,对于区域碳汇能力提升具有重要帮助。如降水量少、蒸发量高且植被覆盖度较低的沙地和沙漠区等地区,可以实施以沙地生态修复、草原保护修复、水土流失治理等为主的植被恢复工程;对于降水量充足且植被覆盖度较高的土石山区

等地区,优先实行林草质量提升、生物多样性保护等提质增效类生态工程;对于水系流域发达、人类活动强度较大的地区,则主要开展沿河耕地保护、流域治理、城市绿化等生态工程。

3.1.3 研究不足与展望 陆地生态系统碳储量的内部组成和反馈机制非常复杂,不同的估算方法和不确定性都会导致碳储量的估算值有很大的差异^[28]。这也是与已有部分研究结果存在差异的主要原因,如Feng等^[29]研究发现黄土高原区生态系统从2000年开始由碳源转为碳汇,并在随后的八年里固碳量增加了9 610万t,退耕还林还草是其增加的主要原因;彭文英等^[30]则预测2000—2020年黄土高原在退耕还林实施后土壤碳储量将增长13 140万t左右。在数据与方法方面,本文采用的植被碳密度、土壤碳密度等数据较依赖于已有研究,存在样点较少、时间序列较短等问题。因此未来通过获取适用性、代表性更好的基础数据,可以进一步提高研究精度,更好地服务研究区的生态建设。

3.2 结论

(1) 1985—2019年,黄土高原耕地、林地、草地和建设用地的面积变化最为明显,其中耕地减少277.14万hm²,主要流向了林地、草地及建设用地;林地、草地分别增加167.97万hm²,119.35万hm²,建设用地扩张明显,增加128.47万hm²,其他土地减少143.75万hm²,主要流向了耕地、草地。

(2) 1985—2019年,黄土高原生态系统碳储量净增加5 225.51万t,其中土壤碳储量增加1 569.06万t,植被碳储量则增加3 656.45万t;且以2002年作为时间节点分析发现,随着以退耕还林还草、防护林建设等为主的生态恢复工程的进一步推进,第二个阶段碳储量的增幅高于第一阶段,尤其是植被碳储量。热点分析的结果表明,两个阶段内冷热点的空间分布存在一定差异。1985—2002年热点区域集中在陕西、山西、宁夏和内蒙古的部分地市;冷点区域集中在河南、山西、甘肃的部分地市;2002—2019年热点区域集中在陕西、甘肃、内蒙古和山西的部分地市;冷点区域集中在陕西、河南、山西、内蒙古和宁夏的部分地市。

(3) 黄土高原陆地生态系统碳储量空间格局受自然和人类活动综合影响,其中年度NDVI、实际蒸发量、人类活动强度、年降水量和坡度是主要影响因子,夜间灯光强度和高程是次要因子,此外,自然因素和人为因素组合后的交互作用明显强于单类型因子组合。研究结果可为黄土高原生态建设效益评估,以及未来生态工程布局、制定差异化的生态治理方案提供一定的参考,以此提高区域生态系统碳储量,促进生态环境好转。

参考文献(References):

- [1] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1385-1390.
Yang J C, Han X G, Huang J H, et al. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1385-1390.
- [2] Houghton R A. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2010, 62(5): 337-351.
- [3] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850—1990[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1999, 51(2): 298-313.
- [4] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change[J]. Science, 1999, 285(427): 574-578.
- [5] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, 8(4): 345-360.
- [6] 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 76-83.
Qu F T, Lu N, Feng S Y. Effects of land use change on carbon emissions[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(10): 76-83.
- [7] 王晓, 于兵, 李继红. 土地利用和土地覆被变化对土壤有机碳密度及碳储量变化的影响: 以黑龙江省大庆市为例[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(11): 76-83.
Wang X, Yu B, Li J H. Effects of land use and land cover change on soil organic carbon density and carbon storage: A case study of Daqing, Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(11): 76-83.
- [8] 孟祥江, 何丙辉, 马正锐, 等. 重庆市 2005—2013 年土地利用变化对植被碳储量的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 75-81.
Meng X J, He B H, Ma Z R, et al. Impact of land use change on forest carbon storage during 2005—2013 in Chongqing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 75-81.
- [9] 姜群鸥, 邓祥征, 战金艳, 等. 黄淮海平原耕地转移对植被碳储量的影响[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 839-846, 975.
Jiang Q O, Deng X Z, Zhan J Y, et al. Impacts of cultivated land conversion on the vegetation carbon storage in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Geographical Research, 2008, 27(4): 839-846, 975.
- [10] 赫晓慧, 徐雅婷, 范学峰, 等. 中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2965-2976.
He X H, Xu Y T, Fan X F, et al. Temporal and spatial variation and prediction of regional carbon storage in Zhongyuan Urban Agglomeration[J]. China Environmental of Science, 2022, 42(6): 2965-2976.
- [11] 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1932-1939.
Chuai X W, Huang X J, Zheng Z Q, et al. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu Province[J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1932-1939.
- [12] Lai L, Huang X J, Yang H, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010[J]. Science Advances, 2016, 2(11): e1601063.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change. Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change And Forestry[R]. Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies IPCC, 2003.
- [14] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [15] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(1): 72-80.
Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2003, 33(1): 72-80.
- [16] Alam S A, Starr, M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 89: 67-76.
- [17] 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5148-5157.
Chen G S, Yang Y S, Xie J S, et al. Total below-ground carbon allocation in China's forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5148-5157.
- [18] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1068-1079.
Xu Y, Sun X Y, Tang Q. Human activity intensity of land surface: Concept, method and application in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(7): 1068-1079.
- [19] 陈万旭, 李江凤, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187.
Chen W X, Li F J, Zeng J F, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China[J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2173-2187.
- [20] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.

- [21] 周书贵,邵全琴,曹巍.近20年黄土高原土地利用/覆被变化特征分析[J].地球信息科学学报,2016,18(2):190-199.
Zhou S G, Shao Q Q, Cao W. Characteristics of land use and land cover change in the Loess Plateau over the past 20 years[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(2):190-199.
- [22] 汤青,徐勇,刘毅.黄土高原地区土地利用动态变化的空间差异分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(8):15-21.
Tang Q, Xu Y, Liu Y. Spatial difference of land use change in Loess Plateau region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,24(8):15-21.
- [23] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
Liu G B, Shangguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2017,32(1):11-19.
- [24] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,209/210:87-99.
- [25] 赵宏飞,何洪鸣,白春昱,等.黄土高原土地利用变化特征及其环境效应[J].中国土地科学,2018,32(7):49-57.
Zhao H F, He H M, Bai C Y, et al. Spatial-temporal characteristics of land use change in the Loess Plateau and its environmental effects[J]. China Land Science, 2018,32(7):49-57.
- [26] Xiu L N, Yan C Z, Li X S, et al. Monitoring the response of vegetation dynamics to ecological engineering in the Mu Us Sandy Land of China from 1982 to 2014[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018,190(9):543.
- [27] 李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J].生态学报,2021,41(17):6786-6799.
Li M Y, Shangguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(17):6786-6799.
- [28] 周健.陆地生态系统碳储量的模拟不确定性及其成因溯源[D].上海:华东师范大学,2021.
Zhou J. The Uncertainty of Simulation of Carbon Storage in Terrestrial Ecosystem and Its Causes Traceability [D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [29] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. Scientific Reports, 2013, 3:2846.
- [30] 彭文英,张科利,杨勤科.退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J].地域研究与开发,2006,25(3):94-99.
Peng W Y, Zhang K L, Yang Q K. Forecast of impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of Loess Plateau[J]. Areal Research and Development, 2006,25(3):94-99.

(上接第251页)

- [31] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,等.黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素:以延安市为例[J].生态学报,2019,39(10):3443-3454.
Sun Y J, Ren Z Y, Hao M Y, et al. Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem services, and its influencing factors in Yanan, Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10):3443-3454.
- [32] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性[J].中国沙漠,2021,41(6):78-87.
Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem services trade-off synergy in the Yellow River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2021,41(6):78-87.
- [33] 潘竞虎,李真.干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J].农业工程学报,2017,33(17):280-289.
Pan J H, Li Z. Analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in arid inland river basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(17):280-289.
- [34] 段宝玲,冯强,原燕燕,等.钱江源国家公园体制试点区生态系统服务权衡与协同分析[J].旅游科学,2021,35(5):11-31.
Duan B L, Feng Q, Yuan Y Y, et al. Ecosystem Services Trade-offs and Synergies in Qianjiangyuan National Park System Pilot [J]. Tourism Science, 2021,35(5):11-31.
- [35] Zhang Y, Lu X, Liu B, et al. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: A case study in the Yellow River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2021,766:142480.
- [36] Wu F, Liang Y, Peng S, et al. Challenges in trade-off governance of ecosystem services: Evidence from the Loess Plateau in China [J]. Ecological Indicators, 2022,145:109686.