

基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估

姚楠¹, 刘广全², 姚顺波¹, 邓元杰¹, 侯孟阳³, 张晓¹

(1.西北农林科技大学 经济管理学院, 陕西 杨凌 712100;

2.中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 3.河北大学 经济学院, 河北 保定 071000)

摘要: [目的] 定量评估退耕还林还草工程对黄土丘陵沟壑区生态系统碳储量的影响, 为区域生态建设提供理论基础。[方法] 采用 GIS 空间分析法与 InVEST 模型相结合, 研究 2000—2020 年黄土丘陵沟壑区土地利用及碳储量变化。[结果] ①研究区 2000—2020 年耕地转为林、草地面积分别占耕地转出量的 20.75%, 86.56%, 区域林、草地覆盖率增加了 1.76%; ②退耕还林工程显著提升了黄土丘陵沟壑区碳汇功能, 碳储量由 2000 年的 8.22×10^8 t 增长至 2020 年的 8.26×10^8 t, 2010 年碳储量达到峰值, 为 8.35×10^8 t; ③研究区净增加碳储量远远抵消了碳流失量, 其中还林还草的碳储量贡献率最大, 分别是 38.82%, 22.58%。[结论] 实施退耕还林还草工程对区域生态系统碳储量具有显著的正面作用, 林、草地建设均可增强生态系统碳储存服务。未来研究应重点关注生态修复工程的碳汇贡献, 科学管理林、草植被, 提高区域生态系统服务功能。

关键词: 退耕还林(草)工程; 黄土丘陵沟壑区; 土地利用; 碳储量; InVEST 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0329-08

中图分类号: X171.1

文献参数: 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 329-336. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.040; Yao Nan, Liu Guangquan, Yao Shunbo, et al. Evaluating on effect of conversion from farmland to forest and grassland project on ecosystem carbon storage in loess hilly-gully region based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5)329-336.

Evaluating on Effect of Conversion from Farmland to Forest and Grassland Project on Ecosystem Carbon Storage in Loess Hilly-gully Region Based on InVEST Model

Yao Nan¹, Liu Guangquan², Yao Shunbo¹, Deng Yuanjie¹, Hou Mengyang³, Zhang Xiao¹

(1.College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research,

Beijing 100048, China; 3.School of Economics, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: [Objective] The impact of the project to convert farmland to forest and grassland on terrestrial ecosystem carbon storage in the loess hilly-gully region was quantitatively evaluated in order to provide a basis for regional ecological construction. [Methods] The GIS spatial analysis method and the InVEST model were used to study changes in land use and carbon storage in the loess hilly-gully region from 2000 to 2020. [Results] ① From 2000 to 2020, the conversion area of cultivated land to forest and grass land accounted for 20.75% and 86.56%, respectively, of the total conversion amount of cultivated land, and the coverage rate of forest and grassland increased by 1.76%. ② The conversion of farmland to forest significantly improved the carbon storage service in the loess hilly and gully region, and carbon storage increased from 8.22×10^8 t in

收稿日期: 2022-02-28

修回日期: 2022-05-02

资助项目: “十三五”国家重点研发计划项目“水蚀风蚀交错区植被群落构建与沙棘产业化技术及示范”(2016YFC0501705); 中国水科院 R&D 项目(SC0145B012022, SC0202A012018)

第一作者: 姚楠(1997—), 女(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 研究方向为资源经济与环境保护。Email: yaonan@nwfu.edu.cn。

通信作者: 姚顺波(1964—), 男(汉族), 湖南省益阳市人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事林业经济政策、资源经济与环境管理研究。Email: yaoshunbo@163.com。

2000 to 8.26×10^8 t in 2020, and reached a peak of 8.35×10^8 t in 2010. ③ The increase in net carbon storage of the study area was more than offset the carbon loss, and the contribution rate of carbon storage returning forest and grassland was the largest, which was 38.82% and 22.58%, respectively. [Conclusion] Implementing the project of returning farmland to forest and grassland has had a significant positive effect on the carbon storage of the regional ecosystem. Forest and grassland construction can enhance ecosystem carbon storage services. Future research should focus on the carbon sequestration contribution of ecological restoration projects, the scientific management of forest and grass vegetation, and improving regional ecosystem services.

Keywords: the project to convert farmland to forest and grassland; loess hilly-gully region; land utilization; carbon storage; InVEST model

气候变化问题引起了国际科学组织和各国政府高度关注^[1],碳排放不仅影响着全球气候变化,同时也影响着各国的政治、经济发展。因此,如何减少大气中的碳排放,提高生态系统碳储量是当前急需解决的重要问题。土地利用变化是影响陆地生态系统碳储量变化的重要因素^[2],森林、草地和耕地等陆地生态系统通过吸收 CO₂ 等温室气体来调节区域气候^[3],碳储存作为生态系统重要的生态服务功能之一,对调节全球气候变化和碳循环方面起着巨大作用^[4]。因此,定量评估退耕还林还草工程对黄土丘陵沟壑区碳储量变化的影响,对区域生态修复工程实施和经济社会发展具有重要意义。

自 1999 年退耕还林还草工程启动以来,20 a 间中国政府累计实施退耕还林还草 3.43×10^7 hm²。黄土丘陵沟壑区作为工程实施的核心区^[5],经过 20 a 的发展境内植被覆盖大幅提升,研究表明植树造林是陆地生态系统碳汇增加的主要路径,林草增长对生态系统碳储量贡献达 25%~75%^[6],工程实施对研究区陆地生态系统碳循环及水土保持功能产生深远的影响。目前,关于陆地生态系统碳储量的研究较多^[7-9]。从碳储量的估算方法来看,一般多通过传统的森林资源清查、样地调查等进行样地、流域的碳储量估算^[10-12],此类方法精度高,但操作过程费时费力,仅适用于中小尺度碳储量估算,且研究结果无法准确反映碳储量的动态变化和空间格局。随着 3S 技术的发展,大量学者通过运用模型模拟、评估和预测不同尺度下区域碳储量并用空间化的形式表示出来^[13],其中用于量化多种生态系统服务功能的综合评估 InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型中的 Carbon 模块应用最为典型,用户仅需要根据自己的研究目的输入土地利用图和相应的土地利用类型碳密度表,便能简洁、快速地估算出该区域陆地生态系统碳储量,也能精准显示研究区陆地生态系统碳储量空间变化的动态过程,模拟结果也被证实具有较高的准确性和实用性^[14],因此被

广泛地应用到探究土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响分析中。如 Leh 等^[15]、Wang 等^[16]将 InVEST模型应用于土地利用和土地覆盖变化的利益相关者场景,为提升区域生态效益和加强生态系统建设管理提供了有效支撑;张文华等^[17]、王渊刚等^[18]、徐自为等^[19]运用 InVEST 模型研究草原、县域和流域等不同区域土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响;在此基础上,赫晓慧等^[20]和朱志强等^[21]通过 Dyna-CLUE 模型、FULS 模型耦合 InVEST模拟研究区未来情境下土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响。

综上所述,以往关于碳储量的研究较多地侧重于土地利用变化对生态系统碳储量的影响,鲜有学者运用 InVEST 模型研究退耕还林还草工程对研究区陆地生态系统碳储量的影响。此外,受“增汇”为新目标的退耕还林还草政策和人类活动的影响,导致黄土丘陵沟壑区的土地利用类型发生明显改变,林、草蓄积量持续增加,引起碳汇功能的不确定性,因此研究如何量化退耕还林还草工程对黄土丘陵沟壑区碳储量的影响是当前亟待解决的科学问题。基于此,本文将 ArcGIS 与 InVEST 模型相结合,精准地评估黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对陆地生态系统碳储量的影响。为实现国家“双碳”目标,充分发挥林、草业碳汇价值,合理开发黄土丘陵沟壑区自然资源和增强生态系统碳汇功能提供科学指导。

1 研究区概况

黄土丘陵沟壑区(35°53′—40°48′ N, 107°12′—114°36′ E)位于黄土高原中部,是黄土高原最典型的地貌类型和空间单元^[22],包括内蒙古南部,山西西部、北部,陕西、宁夏南部、甘肃中部,境内共 62 个县,总面积约 1.40×10^7 hm²(图 1)。研究区受大陆性季风气候影响,降水偏少且主要集中在 7—9 月,气候温暖干燥,年平均降水量为 300~600 mm。黄土丘陵沟壑区地形破碎且沟壑纵横,加之长期受人类活动以及自然条件等多方面因素影响,自然植被遭到严重破

坏,造成区域内土壤侵蚀与水土流失现象严重^[23],生态环境严重退化。自退耕还林还草工程实施以来,黄土丘陵沟壑区作为工程实施的核心区,工程区生态修复明显加快,生态环境状况显著改善。

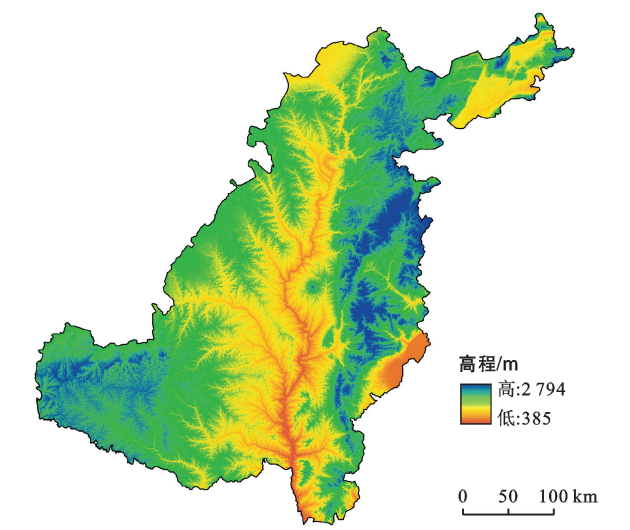


图 1 黄土丘陵沟壑区地形图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所使用的黄土丘陵沟壑区土地利用数据来源于地理监测云平台(<http://www.dsac.cn>),共包括 2000,2010,2020 年 3 期,其空间分辨率为 100 m。该数据集的生产是以各期 Landsat TM,ETM⁺ 及 OLS 遥感影像为数据源,通过人工目视解译生成,并经过实地验证,误差修正后的土地利用以及类型综合评价精度达到 93% 以上^[24]。同时,为了确保异常区域,本文利用 Google Earth 高分辨率卫星历史影像与同期 Landsat 系列卫星影像,结合该地区的实际情况对影像进行了修正,确保数据准确性和客观性。土地利用类型根据“国家资源环境遥感宏观调查与动态研究”项目所建立的中国土地资源分类系统标准^[25],并参考研究区实际情况重新分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类^[26]。基础地理信息包括黄土高原分区、黄土丘陵沟壑区县域边界数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台—黄土高原科学数据中心(<http://loess.geodata.cn>)。研究区的 DEM 数据下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),数据类型为 GDEM V2,其分辨率为 100 m。本研究所使用的空间坐标系为 WGS_1 984_UTM_zone_49 N。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵能够揭示研究区土地利用的变化过程,以此分析工程实施

引起的土地利用变化对区域碳储量的影响。土地利用转移矩阵能够清晰展示区域不同年份各地类面积及其面积变化动态信息^[27],通过土地利用类型面积作为转移矩阵中的向量,可以很好地揭示一定时间间隔内区域土地利用类型的格局特征和时空演变过程,其公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: S 为面积; n 为转移前后土地利用类型数; i, j ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$) 分别表示转移前后的土地类型; S_{ij} 表示转移前的 i 类土地转换成转移后 j 类土地类型的面积。

2.2.2 InVEST 碳储量模型 InVEST 模型是生态系统服务和权衡的综合评估模型,本研究使用 InVEST 模型中的碳储量模块进行陆地生态系统碳储量估算。陆地生态系统的碳密度主要由地上生物碳密度(C_{above})、地下生物碳密度(C_{below})^[28-32]、土壤碳密度(C_{soil})^[33-34]、死亡有机质碳密度(C_{dead})^[35-37] 4 部分组成,碳密度系数参考相关文献,由于数据获取的局限性,研究假设建设用地碳密度为 0(表 1)。碳储量基本公式:

$$C_i = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead} \tag{2}$$

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \tag{3}$$

式中: C_i 为某类土地利用类型; $C_{i-above}$, $C_{i-below}$, C_{i-soil} 和 C_{i-dead} 别表示土地利用类型的地上、地下、土壤和死亡有机质的碳密度(t/hm^2); C_{tot} 为陆地生态系统总碳储量(t); S_i 为土地利用类型 i 的面积(hm^2); n 表示土地利用类型的数量,本文为 6。

表 1 黄土丘陵沟壑区各土地利用类型碳密度

土地利用类型	碳密度/($t \cdot hm^{-2}$)			
	地上生物	地下生物	土壤	死亡有机质
耕地	4.70	1.43	33.64	0
林地	30.21	10.63	68.79	13.00
草地	2.45	6.06	44.04	3.42
水域	0	0	118.24	0.35
建设用地	0	0	0	0
未利用地	5.4	1.24	0	0

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

2020 年黄土丘陵沟壑区主要以耕地、草地和林地为主(图 2),其面积分别为 4.69×10^6 , 2.46×10^6 , 5.69×10^6 hm^2 ,其次是未利用地(4.90×10^5 hm^2)和建设

用地($4.61\times 10^5\text{ hm}^2$),水域面积最少为 $1.46\times 10^5\text{ hm}^2$ 。2000—2020 年在工程实施的影响下,黄土丘陵沟壑区土地利用发生了剧烈变化,主要以耕地减少,林、草

地和建设用地增加为主要特征,20 a 来耕地面积减少了 $459\,311\text{ hm}^2$,建设用地面积增加了 $308\,602\text{ hm}^2$,林地和草地覆盖面积共增加 $244\,558\text{ hm}^2$ 。

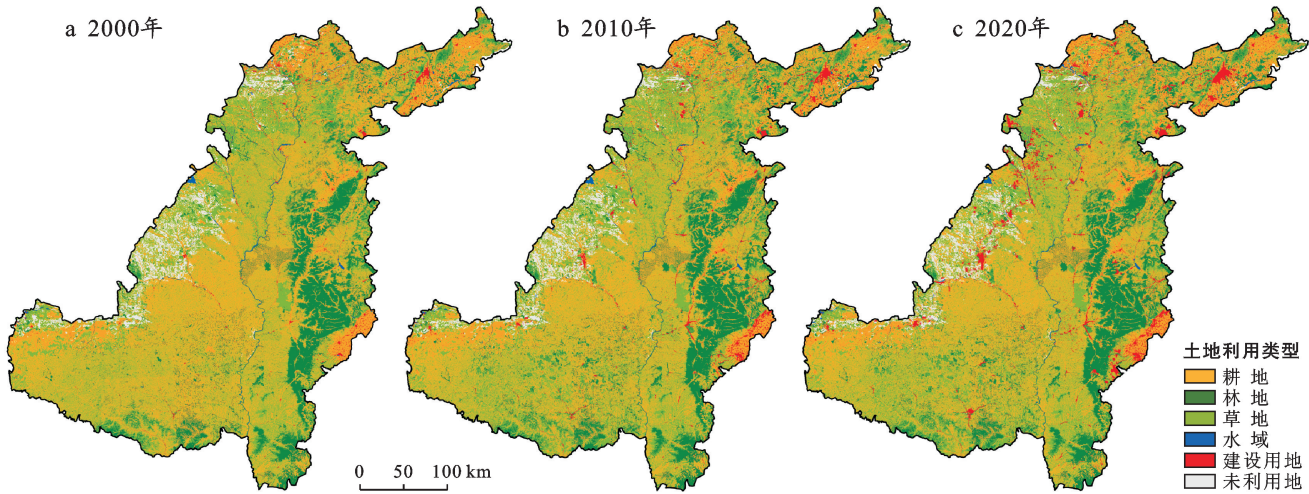


图 2 黄土丘陵沟壑区 2000,2010,2020 年土地利用变化

从研究区土地利用转移来看(图 3),2000—2020 年黄土丘陵沟壑区耕地、林地、草地和建设用地 4 种地类转移的数量最明显,主要以耕地、草地转出,林地、建设用地转入为主导转移方向。2000—2010 年内耕地转出最多约 $11.7\times 10^5\text{ hm}^2$,主要流向林地和草地,其次约有 $2.45\times 10^5\text{ hm}^2$ 耕地和 $1.63\times 10^5\text{ hm}^2$ 草地转为林地。2010—2020 年处于退耕还林管护阶段,此时各地类的转移数量较前一阶段明显减少,具体表现为:耕地转出 $7.91\times 10^5\text{ hm}^2$,主要流向草地($5.54\times 10^5\text{ hm}^2$)和林地($1.22\times 10^5\text{ hm}^2$);

耕地和草地流向林地的数量共 $2.50\times 10^5\text{ hm}^2$; 2000—2020 年建设用地面积持续增长,共增加 $3.08\times 10^5\text{ hm}^2$,主要来源于耕地、林地、草地和未利用地的开发。总体来看,退耕还林还草工程在黄土丘陵沟壑区取得了显著成效,20 a 内研究区土地利用转移类型以碳密度低的地类向碳密度高的地类转移为主,工程实施(2000—2010 年)期间区域碳储量和碳密度达到最大,主要表现在“还林还草”部分;此外建设用地的扩张也侵占了较多的耕地、林地和草地。

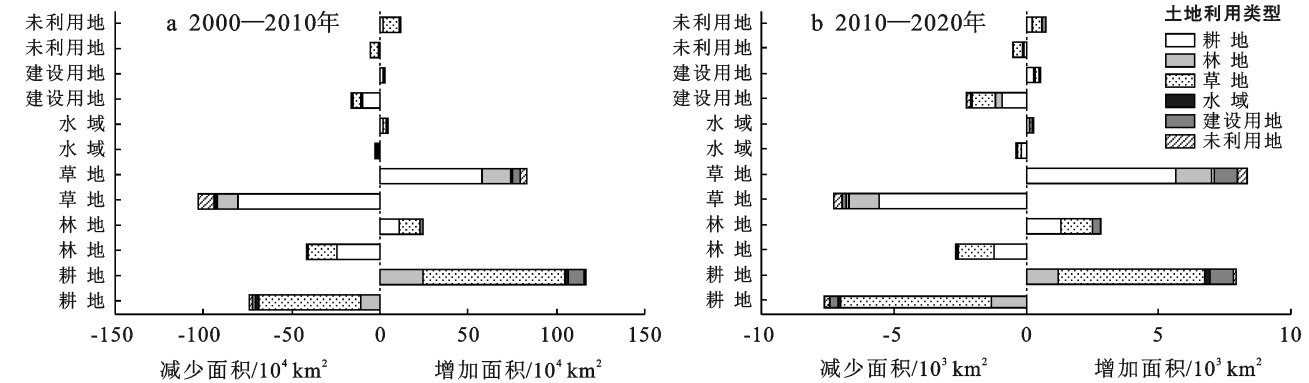


图 3 2000—2020 年黄土丘陵沟壑区土地利用变化趋势

3.2 碳储量变化

经 InVEST 模型计算得到黄土丘陵沟壑区 2000—2020 年碳储量和碳密度变化(图 4),研究区碳储量和碳密度呈显著上升后微弱下降的倒“V”型趋势。总碳储量从 2000 年的 $8.22\times 10^8\text{ t}$ 增长至 2010

年的 $8.35\times 10^8\text{ t}$,到 2020 年减少至 $8.26\times 10^8\text{ t}$;地均碳密度从 2000 年 58.95 t/hm^2 升高到 59.90 t/hm^2 ,到 2020 年降至 59.22 t/hm^2 。这种变化与研究区土地利用结构的变化有关,2000—2010 年总碳储量增加了 $1.32\times 10^7\text{ t}$; 2010—2020 年总碳储量减少 9.53

$\times 10^6$ t。究其原因 2000—2010 年是工程的主要实施阶段,林、草地净增加面积占研究区总面积的 2.63%;而 2010—2020 年第一轮退耕还林工程基本结束,林草面积净流失比例为 0.87%,工程推进强度远不如实施初期,加之城市化过程中建设用地的扩张,导致研究区累计碳储量的减少。总的来看,碳储量最高的是草地和林地,碳储量均保持在 3.00×10^8 t 左右,林地碳密度最大,水域、草地次之;其次是耕地,其碳储量稳定在 1.85×10^8 t 左右,水域和未利用地为碳储量最少的地类,依次是 1.67×10^7 t, 3.24×10^6 t,研究区的固碳能力与土地利用结构以及变化存在显著的相关关系。分析土地利用变化的碳汇效益,对研究区科学实施退耕还林工程,提高区域生物量和生态系

统固碳能力,对于区域碳平衡和碳达峰具有一定指导意义。

图 4 为研究区 2000—2020 年碳储量的空间变化情况。由图 4 可知,研究区碳储量的空间分布较为稳定,且碳储量的增加区域与退耕还林工程实施区间一致。区域内碳储量高值区主要集中在陕西省延安市的宝塔区、子长县等多个县域及山西吕梁山一带,且碳储量高值区均为森林覆盖的主要区域;碳储量低值区分散在陕西省榆林市北部、内蒙古自治区等,此区域主要为沙漠、荒滩,植被覆盖率低,生态环境脆弱。自退耕还林工程实施以来,研究区耕地向林、草生态系统的转化使该区域的固碳能力显著增强,有效提升了生态系统的稳定性和固碳能力。

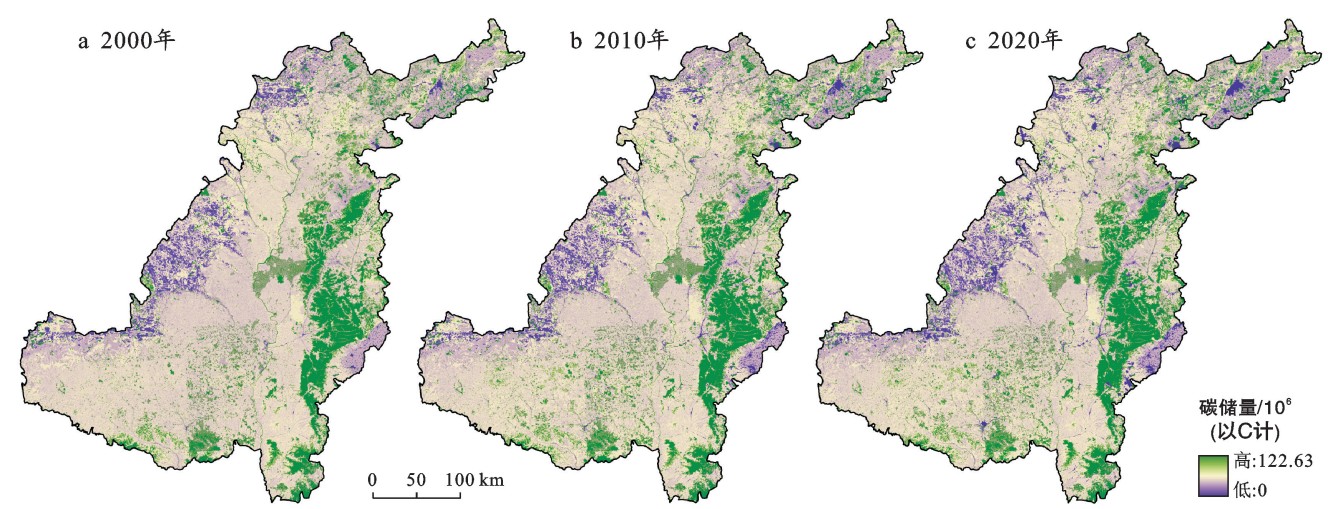


图 4 2000—2020 黄土丘陵沟壑区碳储量空间分布

3.3 退耕还林还草工程对碳储量的影响

退耕还林还草工程通过人工干预和改变陆地生态系统,以期提高陆地生态系统植被覆盖度。黄土丘陵沟壑区在工程实施期间,区域内土地利用发生了剧烈变化,这对区域生态系统碳储存服务造成了巨大的影响。由表 2 可知,黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程固碳量显著增加。研究区 2000—2020 年共退耕 1.73×10^6 hm^2 ,其中退耕还草面积最大,占退耕总面积的 79%;20 a 间退耕还林还草碳储量共计增加 5.27×10^4 t,其中林地增加的固碳量最多,占总碳储量的 57.76%。从不同退耕的时段来看,2000—2010 年是工程实施强度最大阶段,同时也是黄土丘陵沟壑区碳储量增长最快的阶段。这一时期共退耕 1.05×10^6 hm^2 ,促使研究区碳储量增加了 3.35×10^4 t,其中林地的碳汇贡献率最大;还林面积约 24.26 万 hm^2 ,碳汇贡献为 38.39%,还草面积约 8.06×10^5 hm^2 ,碳汇贡献仅占 24.96%。2010—2020 年处于工程实施

管护阶段,主要以激励补偿为主,退耕强度逐渐放缓,这一阶段共退耕 6.76×10^5 hm^2 ,主要以退耕还草为主,还草面积占总退耕面积的 82%,然还草的碳汇贡献率约 25.12%,还林的碳汇贡献率约 28.10%,不同时段退耕还林的碳汇贡献率均高于草地。

图 5 反映了 2000—2020 年退耕还林还草工程实施期间,黄土丘陵沟壑区由于土地利用更迭引起的区域碳储量的变化。能够明显看出退耕还林还草工程在 2000—2010 年实施力度最强,涉及面最广,植被恢复过程和碳汇效应特征最具代表性的区域包括北部的右玉县、左云县、平鲁区等地,南部安塞县、子长县、延川县等地;工程实施后期(2010—2020 年)主要是巩固和管护前一阶段的退耕成果,并对不适宜耕作的坡耕地进行退耕,退耕强度和面积明显低于第一阶段,主要以退耕还草为主,碳储量增加范围由南北向中间转移,主要集中在陕北和山西的交界处,包括兴县、柳林县、佳县等地。通过 InVEST 模型计算得到

态系统碳密度数据在时间尺度上保持不变,但实际结果显示存在变化^[42],使用不变的碳密度会影响研究区碳储量计算的准确性;研究所用的碳密度数据均参考前人的相关研究,在模拟过程中忽略了碳密度的变化,但也能较好地评估退耕还林还草工程对碳储量变化的影响。在今后的研究中,应通过实地调研获取实测数据对碳密度值的合理性进行验证,并对研究区不同土地利用类型碳密度进行连续监测,提高土地利用数据的精度,进而提高碳储量估算精度^[43]。

4.2 结 论

本文基于退耕还林还草工程实施背景,利用 GIS 技术,借助 InVEST 模型中的 Carbon 模块估算了 2000—2020 年黄土丘陵沟壑区土地利用变化对碳储量的影响。

(1) 黄土丘陵沟壑区 2000—2020 年退耕还林还草工程实施效果显著,20 a 间有 763 114 hm² 耕地转为林、草地,区域内林草覆盖率由 2000 年的 56.71% 增长至 2020 年 58.47%。土地利用类型更迭最明显的是耕地和草地,两者之间有超过 691 811 hm² 的相互转化。

(2) 2000—2020 年研究区碳储量和碳密度整体表现为增加态势,且在 2010 年碳储量达到峰值 8.35 × 10⁸ t,此时地均碳密度最高 59.9 t/hm²。研究区碳汇时空变化与退耕还林实施重点相一致,耕地向林、草生态系统的转化使该区域的固碳能力显著增强。

(3) 2000—2020 年退耕还林还草工程的实施促使黄土丘陵沟壑区碳储量显著增加,且主要集中在工程实施的前一阶段(2000—2010 年),区域碳储量在该时期共增加 1.32 × 10⁷ t,其中还林的碳储量贡献率最大约 38.39%,此外,工程实施增加的碳储量远远抵消了碳损失量,退耕还林还草工程对改善区域生态环境、维护区域生态系统碳循环具有重要意义。

[参 考 文 献]

[1] Canadell J G, Raupach M R. Managing forests for climate change mitigation [J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1456-1457.

[2] Aminu M D, Nabavi S A, Rochelle C A, et al. A review of developments in carbon dioxide storage [J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 1389-1419.

[3] 戴尔阜,黄宇,吴卓,等.内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J].*地理学报*, 2016, 71(1): 21-34.

[4] 张凯琪,陈建军,侯建坤,等.耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储可持续发展研究[J].*中国环境科学*, 2022, 42(6): 2799-2809.

[5] Deng Lei, Liu Guobin, Shangguan Zhouping. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.

[6] Chen Chi, Park T, Wang Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.

[7] 张云倩,张晓祥,陈振杰,等.基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J].*水土保持研究*, 2016, 23(3): 100-105.

[8] 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.

[9] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].*热带地理*, 2019, 39(3): 397-409.

[10] 方精云,陈安平,赵淑清,等.中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明[J].*植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.

[11] Oubrahim H, Boulmane M, Bakker M R, et al. Carbon storage in degraded cork oak (*Quercus suber*) forests on flat Lowlands in Morocco [J]. *Forest-Biogeosciences and Forestry*, 2016, 9(1): 125-137.

[12] 张景群,苏印泉,康永祥,等.黄土高原刺槐人工林幼林生态系统碳吸存[J].*应用生态学报*, 2009, 20(12): 2911-2916.

[13] 柳梅英,包安明,陈曦,等.近 30 年玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对植被碳储量的影响[J].*自然资源学报*, 2010, 25(6): 926-938.

[14] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.

[15] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.

[16] Wang Jinzhu, Zhang Qian, Gou Taoji, et al. Spatial-temporal changes of urban areas and terrestrial carbon storage in the Three Gorges Reservoir in China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 343-352.

[17] 张文华,贾志斌,卓义,等.InVEST 模型对锡林郭勒草原碳储量研究的适用性分析[J].*地球环境学报*, 2016, 7(1): 87-96.

[18] 王渊刚,罗格平,冯异星,等.近 50 a 玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对碳储量的影响[J].*自然资源学报*, 2013, 28(6): 994-1006.

[19] 徐自为,张智杰.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*, 2018, 31(11): 1909-1917.

[20] 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.
- [21] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2021,41(2):222-229.
- [22] 刘彦随,冯巍仑,李裕瑞.现代农业地理工程与农业高质量发展:以黄土丘陵沟壑区为例[J].地理学报,2020,75(10):2029-2046.
- [23] 李晶,任志远.陕北黄土高原生态系统涵养水源价值的时空变化[J].生态学杂志,2008,27(2):240-244.
- [24] Liu Jiuyan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995—2000 [J]. Science in China (Earth Science), 2003,46(4):373-384.
- [25] 刘纪远.中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M].北京:中国科学技术出版社,1996.
- [26] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].地理学报,2018,73(5):789-802.
- [27] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.
- [28] 程积民,程杰,杨晓梅.黄土高原草地植被与土壤固碳量研究[J].自然资源学报,2011,26(3):401-411.
- [29] 程积民,程杰,杨晓梅,等.黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征[J].生态学报,2012,32(1):226-237.
- [30] 高阳.黄土高原地区林草生态系统碳密度和碳储量研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [31] Wen Wen, Zhou Baotong, Wang Yafeng, et al. Effects of spatio-temporal changes of land-use on soil organic carbon in Yangjuangou watershed in Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(18):6060-6069.
- [32] Li Kongming, Cao Jianjun, Adamowski J F, et al. Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: A case study in Huining County, China [J]. Environmental Development, 2021,39:100641.
- [33] 曹扬,陈云明,晋蓓,等.陕西省森林植被碳储量、碳密度及其空间分布格局[J].干旱区资源与环境,2014,28(9):69-73.
- [34] 马琪,刘康,张慧.陕西省森林植被碳储量及其空间分布[J].资源科学,2012,34(9):1781-1789.
- [35] 米楠,卜晓燕,米文宝.宁夏旱区湿地生态系统碳汇功能研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(7):52-55.
- [36] 罗怀良.中国农田作物植被碳储量研究进展[J].环境学报,2014,23(4):692-697.
- [37] 王静,冯永忠,杨改河,等.山西农田生态系统碳源/汇时空差异分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(1):195-200.
- [38] Zhu Enyan, Deng Jingsong, Zhou Mengmeng, et al. Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China [J]. Science of the Total Environment, 2019,646:930-939.
- [39] 包玉斌.陕北黄土高原退耕还林还草工程固碳效应研究[J].安徽农业科学,2021,49(17):55-60.
- [40] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响:以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J].自然资源学报,2020,35(4):826-844.
- [41] 张影,谢余初,齐姗姗,等.基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J].资源科学,2016,38(8):1585-1593.
- [42] Zhou Junju, Zhao Yaru, Huang Peng, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China [J]. Ecological Indicators, 2020,118:106803.
- [43] 朱文博,张静静,崔耀平,等.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,2019,74(3):446-459.

(上接第 255 页)

- [11] 吴海萍,刘彦花.基于 PSR 模型的区域土地利用可持续水平测度[J].水土保持通报,2018,38(1):270-275.
- [12] 王莹,郭晨星.陕西省土地可持续利用综合评价与时空分析[J].中国农业资源与区划,2018,39(9):113-122.
- [13] 侯佳,赵静,刘亚.基于乡村振兴的河北省农业资源可持续利用评价[J].中国农业资源与区划,2020,41(3):243-251.
- [14] 韩锦辉,赵文晋,杨天通,等.基于改进 TOPSIS 法的东北农牧交错区土地可持续利用评价及障碍因子诊断[J].水土保持研究,2018,25(3):279-284.
- [15] 韩博,金晓斌,孙瑞,等.基于冲突—适配视角的土地利用可持续性评价[J].地理学报,2021,76(7):1763-1777.
- [16] 李文辉,周兴,钟锦玲.2009—2018 年中国农用地多功能利用与乡村发展的时空耦合关系[J].水土保持通报,2021,41(5):244-254.
- [17] 钟锦玲,周兴,李文辉.广西高质量发展与土地资源可持续利用的耦合协调性[J].水土保持通报,2021,41(3):247-257.
- [18] 郑岚,张志斌,笪晓军,等.嘉峪关市土地生态安全动态评价及影响因素分析[J].干旱区地理,2021,44(1):289-298.
- [19] 赵浩楠,赵映慧,宁静,等.基于 TOPSIS 法的长三角城市群土地利用效益评价[J].水土保持研究,2021,28(5):355-361.
- [20] 韩楠,刘玉红,刘艳娟.我国乡村发展驱动因素与区域差异分析[J].中国农业资源与区划,2021,42(4):40-48.
- [21] 洪名勇,何玉凤,宋恒飞.中国农地流转与农民收入的时空耦合关系及空间效应[J].自然资源学报,2021,36(12):3084-3098.
- [22] 李志龙,陈慧灵,刘迪.基于能值理论武陵山片区旅游生态化水平测度与空间异质性分析[J].自然资源学报,2021,36(12):3203-3214.