

陕北黄土高原退耕还林还草工程固碳效应研究

包玉斌 (宁夏回族自治区遥感调查院, 宁夏银川 750021)

摘要 以陕北黄土高原为研究区, 利用 InVEST 固碳功能评价模块, 定量评价了退耕还林还草工程背景下土地利用/覆被变化对研究区碳固定效益的影响。结果表明: 研究区 2000—2010 年草地、灌丛、林地面积分别增加了 3 204.0、285.3 和 122.7 km², 耕地面积减少了 3 984.5 km², 退耕还林还草工程土地覆被变化显著。研究区 10 年间碳固定能力整体提升, 其中, 延安市境内各流域平均固碳增加量为 3.3 t/hm², 固碳总增加量为 13.3×10⁶ t, 榆林市境内各流域平均固碳增加量为 4.0 t/hm², 固碳总增加量为 14.5×10⁶ t, 退耕还林还草工程固碳效益显著。耕地、草地、荒漠向林地的转化固碳效益最大, 其单位面积固碳增量达 100 t/hm² 以上, 耕地向林灌草的转变使研究区固碳总量增加达 3 405.77×10⁴ t, 其中 73.37% 的总固碳量比重来自耕地向草地的转化。通过生态系统碳固定重要性分级和空间分区为退耕还林还草工程的科学实施、维持区域碳平衡和碳达峰, 保障区域民生福祉具有重要的指导意义。

关键词 退耕还林还草; 碳固定; 土地覆被变化; InVEST 模型; 黄土高原

中图分类号 S 774 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)17-0055-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.17.016



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Carbon Storage Benefits of the Grain for Green Program in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province

BAO Yu-bin (Ningxia Institute of Remote Sensing, Survey and Mapping, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract The effect of land use/cover change on the carbon fixation benefit of the study area was quantitatively evaluated by using the InVEST carbon fixation function evaluation module in the Loess Plateau of Northern Shaanxi Province. The main conclusions are as follows: The area of grass, scrub and woodland increased by 3 204 km², 285.3 km² and 122.7 km² respectively during 2000–2010 in this area. However, farmland reduced a large area of 3 984.5 km² mainly converted to above types of land use. The action of the Grain for Green Program (GFGP) has begun to show its effects. During this 10 years, carbon storage of the research area displayed an increasing tendency. The average carbon sequestration increased by 3.3 t/hm² and the total carbon sequestration increased by 13.3 × 10⁶ tons in Yan'an region, meanwhile, the same increased by 4.0 t/hm² and 14.5 × 10⁶ tons in Yulin region. The carbon sequestration benefit of the Grain for Green Program (GFGP) was significant. The conversion of cultivated land, grassland and desert to forest land has the greatest carbon sequestration benefit, and the increment of carbon sequestration per unit area is more than 100 t/hm². The conversion of cultivated land to forest, shrub and grass makes the total carbon sequestration increase to 3 405.77 × 10⁴ t. Among them, 73.37% of the total carbon sequestration came from the conversion of cultivated land to grassland. This study has important guiding significance for the management of ecosystems and the scientific implementation of the GFGP in the Loess Plateau of Northern Shaanxi Province, meanwhile, it has the same important guiding significance for maintaining regional carbon balance and reaching carbon peak.

Key words The Grain for Green Program (GFGP); Carbon storage; Land use/cover change; InVEST model; Loess Plateau

自 2005 年千年生态系统评估 (millennium ecosystem assessment, MA) 报告发布以来, 有关于人类福祉与健康的生态系统服务及其功能变化的国内外研究文献大幅增加, 全球及区域生态系统服务功能的退化直接影响到人类的可持续发展^[1]。全球气候变化是国际科学组织和各国政府高度关注的全球性重大环境问题之一^[2-3], 陆地生态系统对维持碳循环和碳平衡、调节气候变化具有重要作用^[4-5], 加强区域生态系统管理和保护以提高固碳服务能力, 对保障区域可持续发展和民生福祉^[6-7], 实现国家碳达峰和碳平衡目标意义重大。目前, 随着人类工农业活动的加剧, 不合理的土地利用和生态资源的过度利用, 使得区域碳排放和生态系统碳固定难以平衡, 温室效应加剧和人地矛盾关系突出^[8-9]。InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) 模型通过不同土地利用情景的服务功能量化评估, 能够很好地权衡生态系统管理与区域经济社会发展之间的关系^[10-11]。如国外学者 Leh 等^[12-14] 利用 InVEST 模型对相关流域产水量的时空变化进行了评估, 为提升流域生态系统水源涵养能力及加强生态系统管理提供了有效支撑。国内学者 Su 等^[15-20] 利用 InVEST 相关功能模块对汶川

地震灾区、三江源区、黄土高原和秦岭山地等区域的碳固定、土壤保持、水源涵养等生态系统服务功能展开了量化评估, 评价结果为生态系统科学管理、人地矛盾协调及区域可持续发展提供很好的权衡价值。

我国黄土高原地区人口较多、农业活动强度大、可持续发展能力面临挑战。为此, 国家实施了天然林保护、三北防护林建设和退耕还林还草等工程, 以及时遏制生态环境退化和协调区域可持续发展, 而退耕还林还草工程是优化土地利用结构和方式, 推进生态系统恢复, 提升生态系统服务功能, 促进碳达峰和碳平衡, 协调人地矛盾关系的有效途径。土地利用变化与生态系统固碳能力之间具有高度的耦合关系^[21], 对退耕还林还草工程的碳固定效益进行量化评估, 是权衡好人类发展与自然资源管理之间关系的有力支撑。目前, 许多学者围绕区域或流域生态系统碳固定能力开展相关科学研究, 如张优等^[21-22] 分别对延安市延河流域和成都平原地区的生态系统固碳能力进行了量化评估, 但对退耕还林还草工程碳固定效益的量化评估鲜有研究。

陕北黄土高原境内的黄土丘陵、沟壑、梁、塬、峁及其复合地貌所构成的不同地貌单元和生态环境地域, 对整个黄土高原具有很好的代表性和典型性, 选择在该研究区开展退耕还林还草工程固碳效应研究, 对于揭示整个黄土高原土地利用/覆被变化所产生的生态系统碳固定能力和生态系统建设

作者简介 包玉斌(1988—), 男, 宁夏海原人, 工程师, 硕士, 从事生态评价与规划研究。

收稿日期 2021-01-18

具有较高的参考价值,也可为这一区域科学合理推进退耕还林还草工程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 笔者所研究的陕北黄土高原区仅为延安市和榆林市辖全部区域,地理坐标为 $107^{\circ}30' \sim 111^{\circ}15'E$, $34^{\circ}10' \sim 39^{\circ}35'N$ 。研究区总面积为 $79\,981.9\text{ km}^2$,占黄土高原总面积的 12.6%,是陕西黄土高原总面积的 89.5%,陕西省土地面积的 38.9%。境内海拔 $1\,000 \sim 1\,600\text{ m}$,年均降水量为 $400 \sim 600\text{ mm}$,降水空间分布由东南向西北逐渐减少,区域蒸发量在 $1\,000\text{ mm}$ 左右,蒸发强度较大,境内黄土丘陵沟壑纵横、水土流失严重^[23]。

1.2 InVEST 碳储量模型 陆地生态系统通过对大气 CO_2 的吸收、转化为自身生物量的方式,实现碳固定与碳封存,从而维持碳循环平衡,起到调节全球气候的作用^[20]。生态系统碳储存由地上生物量(树干、枝和叶、灌丛、草本)、地下生物量(植物根系)、地表枯枝落叶、土壤有机碳构成。土地利用变化是引起陆地生态系统格局和质量变化的主要驱动力,

从而影响生态系统的固碳服务能力。InVEST 固碳模型能够针对不同土地利用类型的地上物质、地下物质、枯枝落叶和土壤有机碳量化评估总固碳能力,从而实现碳平衡视角下的陆地生态系统优化管理和决策支撑。具体计算如下式:

$$C_{\text{stored}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}$$

式中, C_{stored} 为总碳储量; C_{above} 为地上物质碳储量 (t/hm^2); C_{below} 为地下物质碳储量 (t/hm^2); C_{soil} 为土壤碳储量 (t/hm^2); C_{dead} 为枯枝落叶碳储量 (t/hm^2)。

1.3 数据来源与处理 研究数据主要包括 2000 年和 2010 年土地利用/覆被类型数据,各土地覆被类型的碳储量。土地利用/覆被类型数据来自“全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估项目”,其中 2000 年土地利用/覆被数据采用 30 m 分辨率 Landsat TM 影像解译获取,2010 年采用 30 m 分辨率 HJ-1 卫星 CCD 影像解译获取。各部分碳储量参数根据文献资料^[24-30],并参考《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[31] 转化计算获得。各土地覆被类型碳储量参数计算结果见表 1。

表 1 土地覆被类型各部分碳储量参数

Table 1 Carbon storage parameters of different parts of land cover types

t/hm^2

I 级 Level I	II 级 Level II	III 级 Level III	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
森林 Forest	阔叶林	落叶阔叶林	30.55	14.66	82.29	13.00
	针叶林	常绿针叶林	29.79	6.84	55.29	13.00
	针阔混交林	针阔混交林	30.17	10.40	68.79	13.00
灌丛 Shrub	阔叶灌丛	落叶阔叶灌木林	7.14	3.09	64.29	2.00
	稀疏灌丛	稀疏灌木林	1.31	2.42	29.90	0.35
草地 Grass	草地	草原	2.33	7.30	43.72	3.80
		草丛	3.37	7.48	44.36	4.47
		稀疏草地	1.66	3.41	10.93	2.00
		湿地 Wetland	沼泽	4.23	0	152.65
湿地 Wetland	湖泊	湖泊	2.75	0	144.13	0
		水库/坑塘	2.30	0	146.26	0
		河流	3.25	0	0	0
		运河/水渠	1.31	2.42	29.90	0.35
		农田 Farmland	耕地	4.70	0	33.46
农田 Farmland	园地	水田	4.70	0	33.46	0
		旱地	18.30	8.69	82.29	13.00
		乔木园地	18.30	8.69	82.29	13.00
城镇 Town	居住地	居住地	0	0	0	0
		城市绿地	18.30	8.69	82.29	13.00
		草本绿地	1.52	3.11	34.80	1.99

2 结果与分析

2.1 土地利用/覆被变化 由表 2 可知,研究区以草地、林地、灌丛、农田生态系统为主,其中草地面积所占比重最大。2000—2010 年草地和农田生态系统发生变化最大,其中草地比重增加了 4.01%,农田比重减少了 4.98%,同时,林地和灌丛的比重共增加了 0.51%。由表 3 可知,上述变化主要为农田大规模向草地、林地的单一转化为主,10 年间农田转向林地、灌丛和草地的总面积为 $3\,903.6\text{ km}^2$,林灌草增加的面积和农田减少的面积基本相当,因此陕北黄土高原自 2000 年以来大规模实施退耕还林还草工程致使研究区土地覆被发

展显著变化。此外,荒漠生态系统也不同程度的向林灌草转化,主要与榆林地区大规模实施沙化土地植被恢复有关。从以上数据变化可以得出,研究区 10 年间退耕还林还草工程成效显著,农田面积明显下降,而以草地为主的林、灌、草面积显著增加。

由图 1 可知,陕北黄土高原主要在北洛河上游、延河流域、无定河流域及其他各流域下游近黄河区域大规模实施了退耕还林还草工程,农田大面积被以草地为主的林、灌、草所取代,演变为以草地为主的新土地利用/覆被分布格局,其中延河流域工程实施规模最为显著。以重点流域为主,黄河干

流各流域整体推进退耕还林还草工程,有效控制了人类耕作活动对地表植被的破坏,耕地向林灌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功能效益。

表 2 不同年份各用地类型的面积及其变化

Table 2 The area and changes of each land use type in different years

植被类型 Vegetation types	2000 年		2010 年		2000—2010 年变化值 Change during 2000—2010	
	面积 Area/km ²	比例 Proportion//%	面积 Area/km ²	比例 Proportion//%	面积 Area/km ²	比例 Proportion//%
林地 Forestland	6 812. 3	8. 52	6 935. 0	8. 67	122. 7	0. 15
灌丛 Shrubbery	9 995. 8	12. 50	10 281. 0	12. 86	285. 2	0. 36
草地 Grassland	40 116. 2	50. 16	43 320. 2	54. 17	3 204. 0	4. 01
湿地 Wetland	306. 3	0. 38	301. 1	0. 38	-5. 2	-0. 01
农田 Farmland	19 979. 7	24. 98	15 995. 2	20. 00	-3 984. 5	-4. 98
城镇 Town	461. 1	0. 58	911. 5	1. 14	450. 4	0. 56
荒漠 Desert	2 303. 3	2. 88	2 230. 6	2. 79	-72. 7	-0. 09

表 3 2000—2010 研究区土地利用/覆被转移矩阵

Table 3 Transition matrix of land use change during 2000—2010

类型 Type	末期林地 Late forestland	末期灌丛 Late shrubbery	末期草地 Late grassland	面积变化 Area change
初期草地 Initial grassland	6. 5	45. 6	—	52. 1
初期农田 Initial farmland	123. 8	284. 3	3 495. 5	3 903. 6
初期荒漠 Initial desert	0. 5	1. 4	21. 2	23. 1
面积变化 Area change	130. 8	331. 3	3 516. 7	3 978. 8

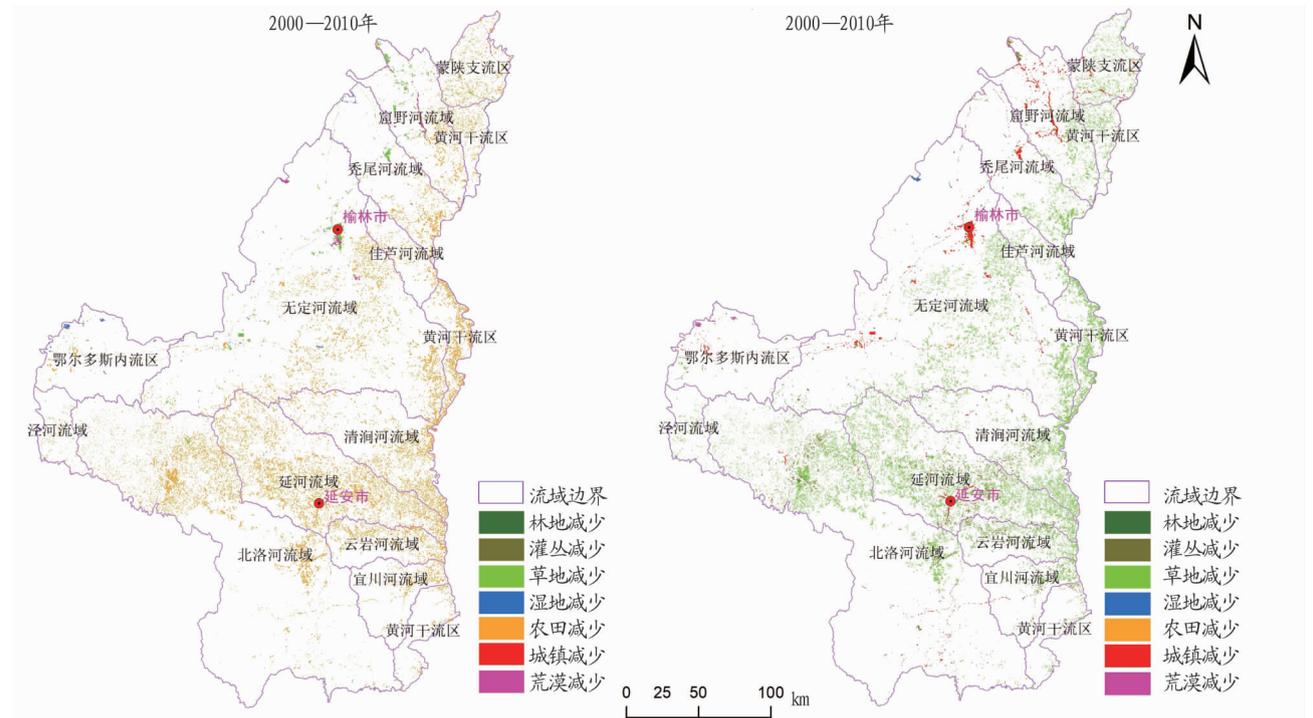


图 1 2000—2010 年研究区土地利用/覆被变化空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of land use/cover change from 2000 to 2010

2.2 固碳效应评估

2.2.1 流域碳储量时空变化。从图 2 可以看出,陕北黄土高原各流域平均碳储量均有不同程度增加,平均碳储量较高的区域主要分布在延安市境内,至 2010 年宜川河流域和云岩河流域平均碳储量达到 20 t/hm² 以上,北洛河流域、延河流域和黄河干流区平均碳储量在 14~20 t/hm²;其他各流域平均碳储量均在 14 t/hm² 以下,主要分布在榆林市境内。从

各流域碳储量 10 年变化可以看出,变化值在 4 t/hm² 以上的为延河流域、清涧河流域、泾河流域、蒙陕支流区、佳芦河流域及窟野河流域,碳储量增加的区域和退耕还林还草工程实施区域一致,退耕还林还草工程固碳效益显著。

从图 3 可以看出,陕北黄土高原各流域总碳储量均呈现不同程度的增加,其中增加最为显著的为北洛河流域、无定河流域和延河流域,增加量分别为 4.9×10⁶、8.2×10⁶、3.3×

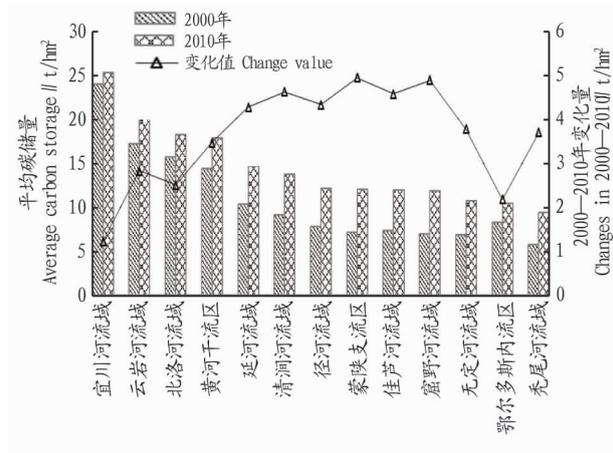


图2 研究区各流域平均碳储量及其变化

Fig. 2 Average carbon storage and its change of each watershed in the study area

10^6 t。至2010年流域总碳储量最大的为北洛河流域,达到 35.3×10^6 t;总碳储量在 5.0×10^6 t以上的区域主要分布在以森林草原和森林灌丛为主的延安市境内,依次为延河流域、黄河干流区、清涧河流域和宜川河流域。其他各流域均在 5.0×10^6 t以下,主要分布在以荒漠草原和干旱草原为主的榆林市境内。

由图4可知,陕北黄土高原碳储量增加的区域和退耕还林还草工程实施区域一致。10年间,以北洛河流域上游、延

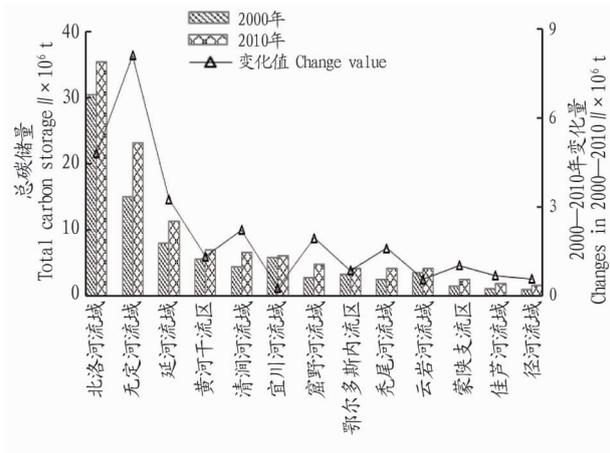


图3 研究区各流域总碳储量及其变化

Fig. 3 Total carbon storage and its change of each watershed in the study area

河流域、清涧河流域和无定河流域为主的陕北中东部区域碳储量增加显著,增加量达 15 t/hm^2 以上。以森林灌丛生态系统为主的延安地区南部碳储量增加较少,其中西南部子午岭区和东南地区增加量在 $0 \sim 5 \text{ t/hm}^2$,东南部的宜川河流域和黄河干流区局部减少 $0 \sim 5 \text{ t/hm}^2$ 。北洛河中游河谷坡耕地碳储量增加相对明显,增加量为 $5 \sim 15 \text{ t/hm}^2$ 。综上,耕地向林、灌、草的转化直接促使该区域固碳量增加,陕北黄土高原退耕还林还草工程固碳效益显著。

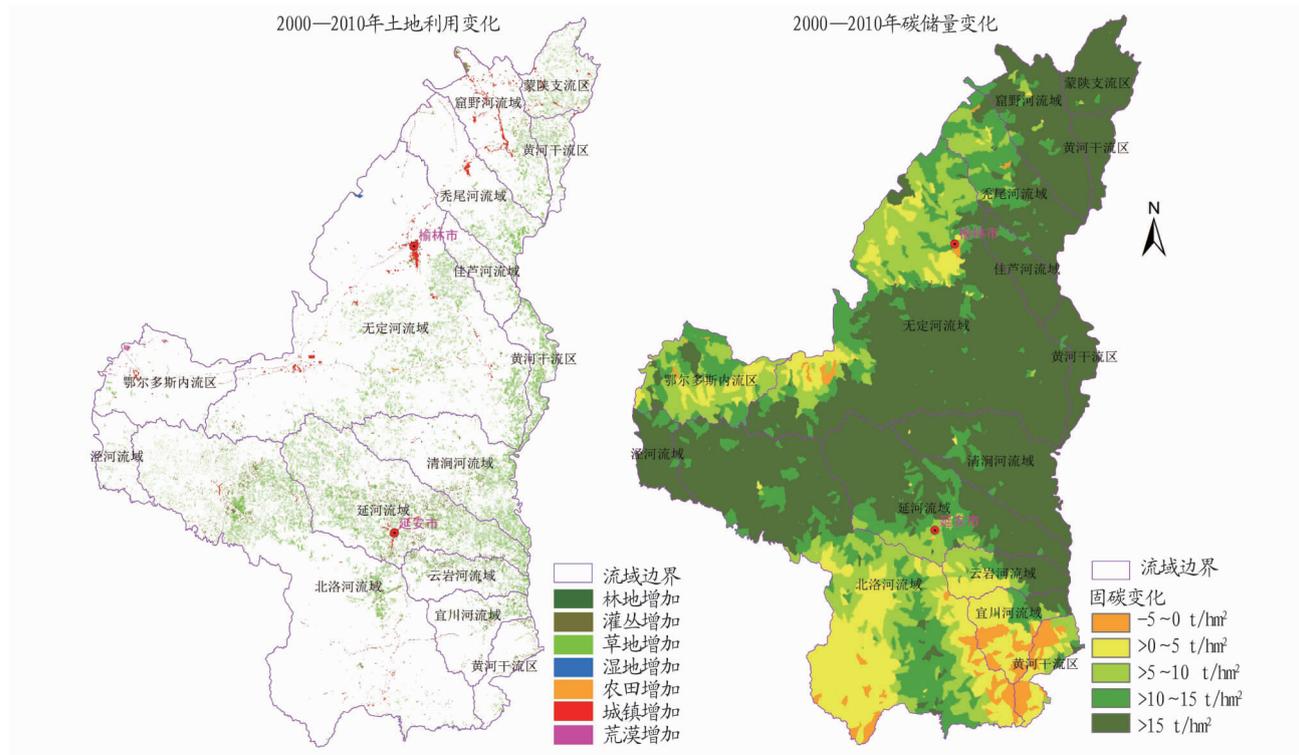


图4 2000—2010年研究区碳储量变化格局空间分布

Fig. 4 Changes in the pattern and spatial distribution of carbon storage in the study area during 2000—2010

2.2.2 土地利用变化碳储量效益。退耕还林还草工程是对生态系统的人工干预和改变,陕北黄土高原退耕还林还草工程涉及的土地利用变化包括耕地向林地、灌丛、草地的转换,

草地向林地和灌丛的转变,荒漠向林地、灌丛和草地的转变3种方式^[23-24]。该研究利用InVEST固碳模型,基于2000年和2010年土地利用/覆被变化数据计算了研究区的碳密度,在

此基础上采用土地利用空间转化数据对相应年份固碳量进行空间提取和统计分析,结果见表4。陕北黄土高原退耕还林还草工程固碳效益显著,耕地、草地、荒漠向林地的转化碳固定效益最大,其单位面积固碳增量达 100 t/hm² 以上,耕地、草地、荒漠向灌丛的转变次之,其单位面积固碳增量为 38.35~67.59 t/hm²,耕地、荒漠向草地的转变固碳效益相对较低,其单位面积固碳增量在 18.33、28.39 t/hm² 以下。从退耕还林还草工程总固碳量变化看出,耕地向林灌草的转变使陕北黄土高原固碳总量增加达 3 405.77×10⁴ t,固碳效益

显著,尤其耕地向草地大面积转化的固碳量最大,占总增加量的 73.37%,其次为耕地向灌丛和林地的转变,固碳比重分别为 12.14%和 14.22%。

综上,陕北黄土高原耕地向林灌草的转化固碳效益最为显著,退耕还林还草工程固碳效益先后次序为荒漠、草地、耕地→林地>草地、耕地,荒漠→灌丛>耕地,荒漠→草地(表4)。因此,分析土地利用变化的固碳效益,对研究区科学实施退耕还林还草工程,增加植被覆盖度,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。

表 4 2000—2010 年土地利用变化碳储量
Table 4 Carbon storage of land use change during 2000—2010

I 级转化 Primary transformation	单位面积碳储量 Carbon storage per unit area//t/hm ²			总碳储量 Total carbon storage//×10 ⁴ t		
	2000 年	2010 年	增加量 Increment	2000 年	2010 年	增加量 Increment
耕地(2000)→草地(2010) Cultivated land→Grassland	36.68	55.01	18.33	4 997.63	7 496.49	2 498.86
耕地(2000)→灌丛(2010) Cultivated land→Shrubbery	37.65	76.00	38.35	414.69	837.35	422.66
耕地(2000)→林地(2010) Cultivated land→Forestland	38.28	138.93	100.65	184.17	668.43	484.25
草地(2000)→灌丛(2010) Grassland→Shrubbery	25.28	75.50	50.22	25.20	75.28	50.07
草地(2000)→林地(2010) Grassland→Forestland	25.28	138.63	113.35	2.30	12.64	10.35
荒漠(2000)→草地(2010) Grassland→Grassland	1.07	29.46	28.39	0.87	23.90	23.03
荒漠(2000)→灌丛(2010) Desert→Shrubbery	2.05	69.65	67.59	0.11	3.81	3.70
荒漠(2000)→林地(2010) Desert→Forestland	0.34	139.00	138.66	0.01	2.79	2.79

2.2.3 固碳功能重要性空间分区。重要性分级和空间分区有利于科学识别碳储量重要和关键区域,通过优化治理措施和加强流域生态系统管理,可进一步提升固碳能力。该研究的固碳功能重要性分级根据《国家生态保护红线—生态功能红线划定技术指南(试行)》的分级分类方法,即借助 ArcGIS 软件的 Quantile(分位数)分类方法。按生态系统固碳能力大小共分为 5 个等级(表 5)。根据重要性分级评价结果,将高度重要和极重要区划定为生态系统固碳功能重要区。

表 5 固碳功能分级标准及分级结果

Table 5 The classification standard and results of carbon storage

重要性分级 Importance rating	固碳量 Carbon sequestration t/(hm ² ·a)	面积 Area km ²	百分比 Percentage %
一般重要 Generally important	0~45	16 009.4	20.1
较重要 More important	>45~50	13 387.6	16.8
中等重要 Medium importance	>50~55	22 934.9	28.8
高度重要 Highly important	>55~70	12 452.8	15.6
极重要 Extremely important	>70	14 930.5	18.7

由表 5 和图 5 可知,陕北黄土高原碳储量一般重要区(0~45 t/(hm²·a))的面积为 16 009.4 km²,比重为 20.1%,其主要分布在榆林市境内西北区域植被覆盖较差的风沙草滩区,即榆神北部沙化区、鄂尔多斯内流区和靖边县北部区域,降水较少、蒸发强烈、地带性植被以沙化草原为主,导致固碳效益相对较低。碳储量较重要和中等重要区域(>45~55 t/(hm²·a))的面积比重为 45.6%,主要分布在榆林市中东部各流域下游和延安市北部延河、北洛河上游部分区域,为退耕还林还草工程的主要实施区域,降水相对较高、植被覆盖度提升明显,使这一区域固碳量增加明显。碳储量高度

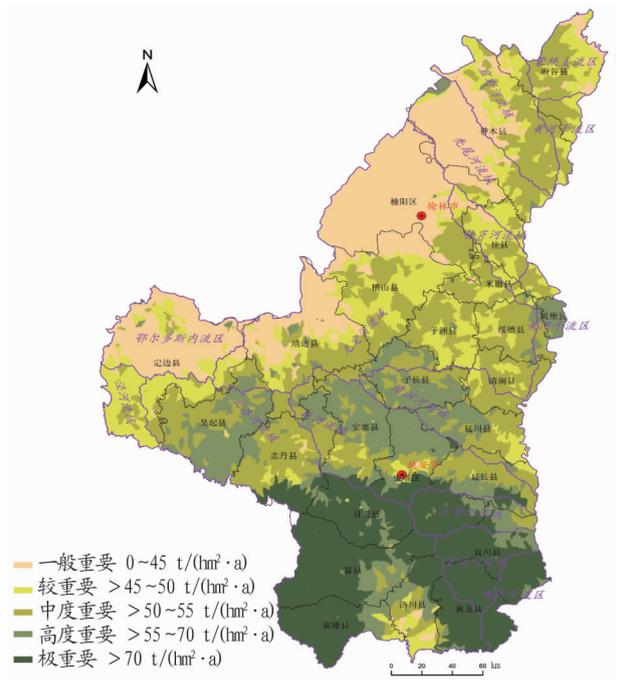


图 5 碳储量功能重要性分级空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of importance level of carbon storage

重要区(>55~70 t/(hm²·a))和极重要区(>70 t/(hm²·a))的面积为 27 383.3 km²,所占比重为 34.3%,主要分布在延安市中南部,即北洛河中下游、云岩河、宜川河等降水相对丰富、森林和灌草生态系统为主,植被覆盖率较高的区域。碳储量高度重要区和极重要区是陕北黄土高原固碳释氧的重要生态功能区,加强该区域的生态系统管理,进一步优化退耕还林还草工程措施,对于维持区域碳平衡和碳达峰、推动

区域经济社会和生态环境保护协调发展,保障区域民生福祉具有重要意义。

3 结论

(1)研究区 2000—2010 年退耕还林还草工程成效显著,草地、灌丛、林地面积分别增加了 3 204.0、285.2 和 122.7 km²,农田面积减少了 3 984.5 km²。退耕还林还草工程有效阻止了人类活动对生态系统的破坏,生态系统的逐步恢复对保障区域可持续发展和民生福祉意义重大。

(2)研究区 2000—2010 年固碳量整体呈现增加趋势,且与退耕还林还草工程实施区域高度一致,其中以延安市境内延河和北洛河流域、榆林市境内的无定河流域固碳量增加最为显著,延安市各流域平均固碳增加量为 3.3 t/hm²,固碳总增加量为 13.3×10⁶ t。榆林市各流域平均固碳增加量为 4.0 t/hm²,固碳总增加量为 14.5×10⁶ t,退耕还林还草工程固碳效益显著。

(3)土地利用类型转化固碳效益中,耕地、草地、荒漠向林地的转化固碳效益最大,其单位面积固碳增量达 100 t/hm² 以上,耕地向林灌草的转变使陕北黄土高原固碳总量增加达 3 405.77×10⁴ t,其中耕地向草地的转化最为明显,占总增加量的 73.37%。

(4)通过生态系统固碳功能重要性分级和空间分区,高度重要区和极重要区的总面积为 27 383.3 km²,所占面积比重为 34.3%,主要分布在延安市境内的中南部各流域。加强该区域的保护力度和生态系统建设,对维持区域碳平衡和碳达峰、推动区域经济社会和生态环境保护协调发展,保障区域民生福祉具有重要意义。

参考文献

[1] United Nations Environmental Program. Millennium ecosystem assessment: Ecosystems and human well-being [M]. Washington DC: Island Press, 2005.

[2] CANADELL J G, RAUPACH M R. managing forests for climate change mitigation [J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1456-1457.

[3] HAMILTON K, SJARDIN M, MARCELLO T, et al. Forging a frontier: State of the voluntary carbon markets 2008 [M]. Washington DC: Ecosystem Market Place and New Carbon Finance, 2008.

[4] LAL R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *Forest ecology and management*, 2005, 220(1/2/3): 242-258.

[5] 许文强, 陈曦, 罗格平, 等. 土壤碳循环研究进展及干旱区土壤碳循环研究展望 [J]. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 614-620.

[6] 李琰, 李双成, 高阳, 等. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架 [J]. *地理学报*, 2013, 68(8): 1038-1047.

[7] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究 [J]. *生态学报*, 2013, 33(21): 6747-6761.

[8] 李瑾璞. 基于 InVEST 模型的土地利用变化与生态系统碳储量研究: 以雄安新区为例 [D]. 保定: 河北农业大学, 2020.

[9] 黄卉. 基于 InVEST 模型的土地利用变化与碳储量研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.

[10] 白杨, 郑华, 庄长伟, 等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控 [J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717.

[11] 马凤娇, 刘金铜, EGRINYA ENEJI A. 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述 [J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 5963-5972.

[12] 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 and environment*, 2013, 165: 6-18.

[13] 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.

[14] MARQUÈS M, BANGASH R F, KUMAR V, et al. The impact of climate change on water provision under a low flow regime: A case study of the ecosystems services in the Francoli river basin [J]. *Journal of hazardous materials*, 2013, 263: 224-232.

[15] SU C H, FU B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes [J]. *Global and planetary change*, 2013, 101: 119-128.

[16] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化 [J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.

[17] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 183-189.

[18] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局 [J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 789-797.

[19] 李婷, 刘康, 马力阳, 等. 秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 583-595.

[20] 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.

[21] 张优. 基于 LUCC 的成都平原地区碳排放效应研究 [D]. 成都: 四川师范大学, 2018.

[22] 薛卓彬. 基于 InVEST 模型的延河流域生态系统服务功能评估 [D]. 西安: 西北大学, 2017.

[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] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[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]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.

[31] AALDE H, GONZALEZ P, GYTARSKY M, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [EB/OL]. [2006-11-20]. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf.

(上接第 45 页)

[8] WU Q Y, HE T J, LIU H, et al. Cell ultrastructure and physiological changes of potato during cold acclimation [J]. *Canadian journal of plant science*, 2019, 99(6): 873-884.

[9] 薛冠炜, 李臣, 黄静艳, 等. 甘薯及其加工产品的质地研究进展 [J]. *浙江农业科学*, 2018, 59(4): 609-612.

[10] 王平, 沈学善, 屈会娟, 等. 不同基因型紫色甘薯品种主要品质性状在川中丘陵区的变化分析 [J]. *西南农业学报*, 2018, 31(2): 230-237.

[11] 徐靖, 朱红林. 海南本地甘薯种质资源农艺性状和营养品质比较 [J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(1): 46-48.

[12] 朱崇文, 马代夫, 李秀英, 等. 甘薯的品质改良 [J]. *作物杂志*, 1987(1): 1-2.