doi: 10.12097/gbc.2022.05.038

基于 InVEST 模型的晋北土地利用变化与碳储量研究

郑吉林^{1,2,3}, 蔡艳龙^{1,3}, 郭晓宇^{1,2,3}, 魏小勇^{1,3}, 杨志伟^{1,2,3}, 孙靖尧^{1,2,3}, 刘智杰^{1,3*} ZHENG Jilin^{1,2,3}, CAI Yanlong^{1,3}, GUO Xiaoyu^{1,2,3}, WEI Xiaoyong^{1,3}, YANG Zhiwei^{1,2,3}, SUN Jingyao^{1,2,3}, LIU Zhijie^{1,3*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江哈尔滨 150086;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京100083;

3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江哈尔滨 150086

1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150086, Heilongjiang, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin 150086, Heilongjiang, China

摘要: 区域土地利用变化和碳储量的空间分布特征研究可为区域生态系统碳库管理和减排增汇政策制定提供重要科学依据。采用GIS 和遥感技术分析了晋北地区 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年的土地利用变化特征,在此基础上,运用 InVEST 模型计算出晋北地区 1990—2019 年间生态系统碳储量和碳密度。结果表明,各土地利用类型之间的转换主要发生在 2000—2013 年间,转出面积最多的为耕地,转入面积最多的为建设用地和林地。这与该时段退耕还林政策的实施和粗放型经济快速增长有关。研究区 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年生态系统碳储量分别为 53.50×10⁷ t、53.53×10⁷ t、54.25×10⁷ t 和 54.00×10⁷ t、碳平均密度分别为 147.89 t/hm²、147.97 t/hm²、149.95 t/hm² 和 149.27 t/hm²。在总体碳储量中,土壤碳储量占比最大,超过 80%,而林地对研究区生态系统碳储量的贡献值最大(约 55%)。晋北地区应继续坚持退耕还林、水土保持等措施,以期能够用高效固碳来代偿建设用地扩张导致的碳损失。

关键词:碳储量;碳密度;InVEST 模型;土地利用类型;晋北 中图分类号:P5;F301 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2024)01-0173-08

Zheng J L, Cai Y L, Guo X Y, Wei X Y, Yang Z W, Sun J Y, Liu Z J. Study on land use change and carbon stock in northern Shanxi Province based on InVEST model. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(1): 173–180

Abstract: The study on the spatial distribution characteristics of regional land use change and carbon stock can provide an important scientific basis for the management of regional ecosystem carbon pools and the formulation of emission reduction and sink enhancement policies. Using GIS and remote sensing technology, this paper analyzes the change characteristics of spatial land use types in North Shanxi in 1990, 2000, 2013 and 2019, InVEST model was used to calculate the carbon storage and carbon density of the ecosystem in the study area. The results show that the conversion between land use types mainly occurred during 2000—2013, with the largest area transferred out being cropland and the largest area transferred in being construction land and forest land. Ecosystem carbon stocks in the study area during 1990, 2000, 2013 and 2019 were 53.50×10^7 t, 53.53×10^7 t, 54.25×10^7 t and 54.00×10^7 t, respectively, with an average carbon density of 147.89 t/hm², 147.97 t/hm², 149.95 t/hm² and 149.27 t/hm². Among the overall carbon stocks, soil carbon stocks accounted for the largest share, over 80%, while forest land contributed the largest value (about 55%) to the ecosystem

收稿日期: 2022-05-20;修订日期: 2023-03-26

资助项目:中国地质调查局项目《太行山区山西段生态修复支撑调查》(编号:DD20208069)和《小兴安岭北部孙吴—逊克地区生态修复综合 调查》(编号:DD20230477)

作者简介:郑吉林(1985-),男,硕士,高级工程师,从事生态地质调查工作。E-mail:123982315@qq.com

^{*}通信作者:刘智杰(1974-),男,正高级工程师,从事生态地质调查工作。E-mail: liuzhijie@mail.cgs.gov.cn

carbon stocks in the study area. Measures such as returning farmland to forest and soil conservation should be continued in northern Shanxi Province, in order to be able to compensate for the carbon loss caused by the expansion of construction land with efficient carbon sequestration.

Key words: carbon storage; carbon density; InVEST model; land use types; northern Shanxi Province

陆地生态系统中的碳储量是全球碳循环和维持 气候稳定方面的重要指标。2020年9月联合国大会 上,中国明确提出 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的 远景目标。土地利用类型的变化是人类活动与生态 环境之间联系最密切的方面,也是碳源和碳汇时空 格局转换的重要表征(刘纪远等, 2014)。第六次联 合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告中 指出,当前土地利用空间格局变化导致每年的碳排 放量为 1.5×10°t, 是第二大温室气体排放源(Van der Werf et al., 2009; IPCC, 2023)。不同空间尺度的土 地利用变化研究,有助于揭示人类活动影响下的区 域生态环境变化过程(孔君洽等, 2019), 通过改变生 态系统功能和结构影响生态系统碳循环过程,从而 影响生态系统碳吸收和排放,改变气候变化进程(陈 广生等,2007)。通过评估区域土地利用空间格局变 化对生态系统碳储量变化的影响,能够探寻土地利 用结构优化途径,提高区域生态系统碳储量,对减缓 气候变化和改善区域生态系统服务功能具有重要意 义(朱文博等,2019)。

近年来,国内外专家学者从不同尺度视角对简 单或复杂生态系统的碳储量进行了估算(Han et al., 2017; Nogueira et al., 2018), 并分析探讨了不同土地 利用类型与碳储量之间的相互关系(Jiang et al., 2017; Liang et al., 2017)。InVEST 模型以土地利用 数据为基础,能够实现多目标、多情景下的生态系统 碳储量评估(戴尔阜等, 2016;朱建佳等, 2018), 具有 输入数据易得、流程简便等优势,现已广泛应用于碳 储量计算及生态数据评估。InVEST 模型包括多个 资源类型的模块,例如水资源、土地利用、生物多样 性等,这些模块可以在不同地理环境下进行评估和 应用。其中, Carbon 模块是 InVEST 模型的一个重 要组成部分,主要用于评估森林和土地利用变化对 碳排放和碳汇的影响(邹文涛等, 2020)。该模块结 合了多种数据和模型,包括生物地球化学模型、遥感 技术和经济模型,以定量和定性方式估算碳汇和碳 排放,为碳管理提供科学依据。

Piyathilake et al.(2022)运用 InVEST 模型估算 了斯里兰卡乌瓦省的碳储存,并展示其空间分布,该 研究指出, InVEST 模型可有效评估城市扩张对总碳 储存能力的潜在影响。Wang et al.(2021)使用 InVEST 模型的 Carbon 模块评估了博尔塔拉地区不 同土地类型的碳密度, 并探讨了不同气候情景下土 地利用变化和碳储量的未来变化。近年来, InVEST 模型在国内森林生态系统中的应用研究日益增多。 何涛等(2016)利用 InVEST 模型, 对浙江庆元县森 林生态系统的碳储量进行了估算, 并分析其影响因 素。修珍珍等(2016)采用同样的模型, 探讨了浙江 富阳市森林生态系统的碳储量及其空间分布特征。 InVEST 模型的 Carbon 模块已经被广泛应用于森林 碳汇评估、土地利用规划、碳交易等领域, 为各级政 府和企业提供了重要的决策支持。

晋北地区位于中国黄土高原东北边缘,是北方 农牧交错带的重要组成部分(郝晓敬等,2020),也是 环京津塘地区防风固沙、绿化生态屏障建设的重点 地区之一(秦作栋等,2008;薛占金等,2011)。由于 人类活动持续干扰,晋北地区土地利用方式发生了 很大变化,其生态系统碳存储功能随土地利用方式 变化的改变方向和量化数据尚不明确。本文以晋北 地区 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年土地利用 变化数据为基础,采用 InVEST 模型的碳储量模块对 晋北地区近 30 a 的生态系统碳储量变化情况进行评 估,以期为区域土地利用管理和实现碳中和目标提 供参考。

1 研究区概况

晋北地区常以恒山-洪涛山为界分为两部分,以 东为大同盆地,黄土广泛分布,地貌类型复杂多样; 以西为黄土丘陵区,呈现高原形态,习称晋西北高原 (图1)。研究区地处山西省北部,为干旱草原栗钙土 地带,土壤类型主要为栗褐土、栗钙土、褐土、风沙 土等,地表景观为温带半干旱草原和部分半湿润森 林草原景观。区内气候为温带大陆性季风气候,全 年温差较大,干燥、少雨、多风沙,年均气温4.6~6.8℃, 平均风速3.0 m/s,最大风速可达14~16 m/s。本区 7 个气象监测站多年平均降水量在363~414 mm 之



图 1 研究区位置及行政区划

Fig. 1 Location and administrative divisions of the study area

间。晋北地区主要生态地质问题有露天矿产开采、 土地盐碱化、高氟高砷地下水和土地沙化。本文研 究区包括大同市、朔州市和忻州市部分县区,总面积 约 3.62×10⁴ km²(图 1)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

土地利用数据包括 4 期, 以 2019 年遥感影像为

基准数据, 1990年、2000年和 2013年遥感数据为监测对比数据, 主要选取 1990年前后成像的 landsat 5 卫星 TM 数据、2000年前后 landsat 7 卫星 ETM 数据及 2013年和 2019年前后的 landsat 8 卫星 OLI 数据, 经过校正、融合、镶嵌、裁剪,获得合格的遥感影像数据, 工作流程如图 2 所示。

根据中国土地资源分类系统(刘纪远, 1997),编制 2019 年土地利用二级类型图,通过 Google Earth



Fig. 2 Workflow of remote sensing image interpretation

高分影像及野外实地验证,解译精度可达到 87%,能够满足研究需要。

将土地利用二级分类合并为一级分类,得到耕 地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地6种主 要土地利用类型。

2.2 研究方法

2.2.1 碳储量估算

InVEST 模型中 Carbon 模块对生态系统碳储量的估算对象主要包括常见的四大基本碳库(地上、地下、土壤和死亡有机质)。碳储量计算原理如下:

$$C_{i} = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead}$$
(1)

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^{n} C_i \times S_i \qquad (2)$$

式中: i 为第 i 种土地利用类型; C_i 为第 i 类土地 利用类型的碳密度(t/hm^2); C_{tot} 为生态系统总的碳储 量(t); $C_{i-above}$ 为第 i 类土地利用类型的地上生物碳密 度(t/hm^2); $C_{i-below}$ 为第 i 类土地利用类型的地下生物 碳密度(t/hm^2); C_{i-dead} 为第 i 类土地利用类型的死亡 有机质碳密度(t/hm^2); C_{i-soil} 为第 i 类土地利用类型 的土壤碳密度(t/hm^2); S_i 为第 i 类土地利用类型的面 积(hm^2); n 为土地利用类型的数量, 本文 n 为 6。 2.2.2 碳密度数据选定

根据黄玫等(2006)、朴世龙等(2004)对不同地 类根茎比的相关研究,获得全国耕地、林地和 草地的地上、地下生物量和土壤碳密度数据。参照 朱文博等(2019)关于太行山淇河流域地上植被碳密 度和土壤碳密度数据。淇河流域位于研究区南 部,与区内滹沱河流同属海河水系,生态系统具有 一定可比性。 死亡有机质碳密度的计算根据地上 生物碳密度进行推算, Delaney et al.(1998)研究 发现,死亡有机质碳库约为地上碳库量的1/10,通常 以此为标准计算死亡有机质碳密度。为保证研 究结果的可比性,本文不考虑地表植被覆被变化 (植被增长或枯亡)造成的碳密度增加或减少,即假 设每种土地利用类型的碳库密度是一个常量。据此 得到研究区碳密度数据(表1)。在碳模块中,通过土 地利用和碳密度数据计算出研究区 1990 年、 2000年、2013年和2019年生态系统碳储量,并分析 变化特征。

表1	晋北地区土地利用类型碳密度
----	---------------

 Table 1
 Carbon density of different land use types

In	VIIII			
类型	C _{i-above}	$C_{i-below}$	$C_{i\text{-soil}}$	C_{i-dead}
耕地	4.02	0.80	105.14	0.40
林地	55.74	11.15	174.97	5.57
草地	0.39	0.08	96.89	0.03
水域	0.04	0.01	64.03	0
建设用地	0.01	0	57.63	0
未利用地	0.01	0	58.89	0

3 讨论

3.1 土地利用变化特征

研究区 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年土 地利用如图 3 和表 2 所示。2019 年,土地利用类型 主要为林地、耕地和草地,占比分别为 34.56%、 30.15% 和 25.44%,其次为建设用地,达到 9.04%,未 利用地和水域面积占比较少,分别为 0.45% 和 0.35%。总体看,1990—2019 年间(表 3),研究区耕 地面积为先增后减,总体呈减少趋势;林地面积为先 增后减,总体呈增加趋势;草地面积则持续减少;水 域面积先减后增,总体呈增加趋势;建设用地面积持 续增加;未利用地面积在 2000 年之前无明显变化, 2000 年以来持续增加。面积减幅最大的是耕地,减 少了 14.21%,增幅最大的是建设用地,增加了 92.98%。各土地利用类型面积最显著的变化均发生 于 2000—2013 年,决定了 1990—2019 年的总体变 化趋势。

从 2002 年开始, 中国退耕还林工程全面启动, 这应是 2000—2013 年研究区大量耕地流向林地的 主要原因。据山西统计年鉴资料显示, 大同市 1990 年、2000 年和 2013 年 GDP 分别为 39.58 亿 元、170.18 亿元和 967.5 亿元, 2000—2013 年 GDP 年均增幅(61.33 亿元/年)显著高于 1990—2000 年 (13.06 亿元/年), 朔州市、忻州市与大同市情况类 似。因此, 2000—2013 年间, 晋北地区经济快速增长 应与建设用地大幅度扩张有关。

3.2 生态系统碳储量变化

基于公式(1)和(2),研究区 1990年、2000年、 2013年和 2019年生态系统碳储量分别为 53.50× 10⁷ t、53.53×10⁷ t、54.25×10⁷ t和 54.00×10⁷ t,碳平均

±/1-...2



Fig. 3 Land use maps of northern Shanxi Province in 1990, 2000, 2013 and 2019 1—耕地; 2—林地; 3—草地; 4—建设用地; 5—水域; 6—未利用地

	表 2	晋北地区 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年土地利用特征
Table 2	Land	use patterns of northern Shanxi Province in 1990, 2000, 2013 and 2019

类型 —	1990年		2000年		2013年		2019年	
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例
耕地	127.15	35.15	128.25	35.45	110.21	30.47	109.08	30.15
林地	115.82	32.02	116.15	32.11	125.71	34.75	125.01	34.56
草地	99.50	27.50	97.17	26.86	93.48	25.84	92.06	25.44
水域	1.10	0.30	1.04	0.29	1.20	0.33	1.28	0.35
建设用地	16.95	4.69	17.91	4.95	29.64	8.19	32.71	9.04
未利用地	1.24	0.34	1.24	0.34	1.51	0.42	1.62	0.45
总计	361.76	100.00	361.76	100.00	361.76	100.00	361.76	100.00

注:面积单位为10⁴ hm²,比例单位为%

Table 3Change in land use patterns of northern Shanxi Province from 1990 to 2019								
类型 —	1990—2000年		2000—2013年		2013-2019年		1990—2019年	
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例
耕地	1.10	0.87	-18.04	-14.07	-1.13	-1.03	-18.07	-14.21
林地	0.33	0.28	9.56	8.23	-0.70	-0.56	9.19	7.93
草地	-2.33	-2.34	-3.69	-3.80	-1.42	-1.52	-7.44	-7.48
水域	-0.06	-5.45	0.16	15.38	0.08	6.67	0.18	16.36
建设用地	0.96	5.66	11.73	65.49	3.07	10.36	15.76	92.98
未利用地	0.00	0.00	0.27	21.77	0.11	7.28	0.38	30.65
总计	361.76	100.00	361.76	100.00	361.76	100.00	0.00	0.00

表 3 晋北地区 1990—2019 年土地利用变化特征

注: 面积单位为104 hm2, 比例单位为%, 正数表示增加, 负数表示减少

密度分别为 147.89 t/hm²、147.97 t/hm²、149.95 t/hm² 和 149.27 t/hm², 变化趋势如图 4 所示, 即 1990—2019年间,研究区生态系统碳储量变化较小, 总体增加了 0.50×10⁷t, 增幅仅为 0.93%, 呈先增后减 的趋势,这一结果与李茂娟等(2021)的研究结果一 致。碳储量增加主要发生在 2000-2013 年, 年均增 加量为 1990—2000 年的 19 倍。研究区 1990— 2019年平均碳密度下降了 0.62 t/hm²。

从碳库角度分析 (表 4), 1990年、2000年、 2013 年和 2019 年的地上生物碳储量分别为 7.01× 10⁷ t、7.03×10⁷ t、7.49×10⁷ t、7.44×10⁷ t,地下生物中 碳储量分别为 1.40×107 t、1.41×107 t、1.50×107 t、 1.49×10⁷ t, 土壤中碳储量分别为 44.39×10⁷ t, 44.39×10⁷ t、44.51×10⁷ t、44.32×10⁷ t, 死亡有机质中



图 4 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年晋北地区碳储量 和碳密度变化

Fig. 4 Changes of carbon storage and carbon density in 1990, 2000, 2013 and 2019 in northern Shanxi Province

碳储量分别为 0.70×107 t、 0.70×107 t、 0.75×107 t、 0.74×10^7 t。从四大碳库的变化趋势可以看出,其碳 储量主要在 2000—2013 年发生大幅提升, 与总体碳 储量变化趋势一致。在各个碳库中,土壤碳储量在 总体碳储量中占比最大,超过80%,但土壤碳储量的 变化幅度较小,且于2019年呈现明显回落趋势,原 因是对土壤碳库贡献度较大的耕地、林地和草地面 积在 2013—2019 年均发生不同程度的缩减。

用地类型分析表明(表 5), 1990—2019年, 林地 对研究区生态系统碳储量的贡献最大(约55%),耕 地(约24%)、草地(约17%)、建设用地(约3%),水 域和未利用地贡献值最低, 仅为 0.15% 左右。 1990—2019年,研究区各土地利用类型碳储量变化 趋势与其面积变化趋势相同。碳储量减少最多的为 耕地(1.99×10⁷t),增加最多的为林地(2.27×10⁷t)。 耕地流向林地使生态系统碳储量增加了 1.96×10⁷ t, 但耕地、林地、草地流向建设用地又导致生态系统碳 储量损失了 1.93×107 t, 抵消了大部分前者造成的增 加,这主要与2000—2013年研究区建设用地大幅扩

表 4 晋北地区 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年生态系 统四大基本碳库碳储量

 $10^{7}t$

Table 4 Four basic carbon pools in 1990, 2000, 2013 and 2019 in northern Shanxi Province

年份	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
1990年	7.01	1.40	44.39	0.70
2000年	7.03	1.41	44.39	0.70
2013年	7.49	1.50	44.51	0.75
2019年	7.44	1.49	44.32	0.74

表 5 晋北地区 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年不同土地利用类型及生态系统碳储量

Table 5 Different land use types and ecosystem carbon storage of northern Shanxi Province in 1990, 2000, 2013, and 2019

类型 -	1990年		2000年		2013年		2019年	
	碳储量	比例	碳储量	比例	碳储量	比例	碳储量	比例
耕地	14.03	26.23	14.15	26.43	12.16	22.42	12.04	22.30
林地	28.66	53.57	28.74	53.69	31.10	57.34	30.93	57.28
草地	9.69	18.11	9.46	17.67	9.10	16.78	8.97	16.61
水域	0.07	0.13	0.07	0.13	0.08	0.15	0.08	0.15
建设用地	0.98	1.83	1.03	1.92	1.71	3.15	1.89	3.50
未利用地	0.07	0.14	0.07	0.13	0.09	0.17	0.10	0.19
总计	53.50	100.00	53.53	100.00	54.25	100.00	54.00	100.00

注:碳储量单位为107t,比例单位为%

张和 2002 年实施退耕还林政策有关。

1990—2019年,晋北地区碳平均密度为148.77 t/hm²,低于浙江富阳(180.75 t/hm²)、贵州晴隆(173.1 t/hm²)等地区,高于汾河上游(144.45 t/hm²)、甘肃白 龙江流域(136.46 t/hm²)、河北黄骅(112.34 t/hm²) 等地区(刘纪远,1997;张斯屿等,2014;张影等, 2016;刘建华等,2018;张燕等,2021)。

通过与南北方不同区域对比可以看出,晋北地 区在北方大区总体储碳能力较好,原因在于晋北地 区林地与草地面积分布广泛,占比超过 50%,能 中和其他用地类型的储碳劣势,达到高效储碳的 效果。

3.3 局限与不足

InVEST 模型是评估森林生态系统服务功能的 主流工具,能够定量化和空间化多项服务功能。但 是,该模型也存在一定的局限性:一是模型开发过程 中受到地域背景的影响,可能不适用于非相似区域 (邹文涛等,2020);二是模型对生态服务过程进行了 简化,忽略了土地利用类型和森林生长过程对服务 功能的影响(Sharp et al., 2018);三是缺乏对模型评 估结果不确定性的分析。此外,还需要解决空间 数据获取、权重确定、小尺度应用等问题(张徐等, 2022)。

本次对晋北地区 1990—2019 年碳储量与碳密 度的变化趋势进行了有效探究,但研究结果仍然存 在一定的局限性。首先,使用的碳密度数据主要参 考了太行山淇河流域的地上植被碳密度和土壤碳密 度数据,而不同地区碳密度的分布特征受气候、降 水、地形、人类活动等多种因素的影响,存在显著的 区域差异。其次,InVEST模型 Carbon模块假设土 地覆盖类型是空间上和时间上的恒定属性,而忽略 了土地覆盖类型之间的转换和动态变化,可能导致 碳储量估算的偏差。另外,InVEST模型 Carbon模 块只考虑了碳储量和碳汇价值,没有涉及其他与碳 相关的生态系统服务,如气候调节、水文调节、生物 多样性等。这些服务可能与碳储量存在协同或竞争 的关系,需要综合评估。

4 结 论

(1)晋北地区土地利用类型以林地、耕地和草地 为主,合计占比约93%;建设用地占比约为6%;未利 用地和水域最少,合计不足1%。各土地利用类型之 间的转换主要发生在2000—2013年,转出面积最多 的为耕地,转入面积最多的为建设用地和林地。

(2)晋北地区 1990—2019 年碳储量与碳密度总体变化较小, 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年生态系统碳储量分别为 53.50×10⁷ t、53.53×10⁷ t、54.25×10⁷ t和 54.00×10⁷ t;平均碳密度呈现先增后减的趋势,分别为 147.89 t/hm²、147.97 t/hm²、149.95 t/hm²和 149.27 t/hm²,总体增加 0.93%,主要原因为退耕还林政策的实施导致生态系统碳储量增加。

(3)在总体碳储量中,土壤碳储量占比最大,超 过80%,而林地对研究区生态系统碳储量的贡献值 最大(约55%);晋北地区应继续坚持退耕还林和水 土保持等措施,以期能够用高效固碳来代偿建设用 地扩张导致的碳损失。

- Delaney M, Brown S, Lugo A E, et al. 1998. The Quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela[J]. Biotropica, 30(1): 2–11.
- Han X H, Zhao F Z, tong X G, et al. 2017. Understanding soil carbon sequestration following the afforestation of former arable land by physical fractionation[J]. Catena, 150: 317–327.
- IPCC. 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 [R]. Switzerland.
- Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, et al. 2017. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linkingthe CLUE-S andthe InVEST models[J]. Ecological Modelling, 345(2): 30–40.
- Liang Y, Liu L, Huang J. 2017. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China[J]. Plos One, 12(2): e0172494.
- Nogueira E M, Yanai A M, Vasconcelos S S, et al. 2018. Carbon stocks and lossesto deforestation in protected areas in Brazilian Amazonia[J]. Regional Environmental Change, 18(5): 261–270.
- Piyathilake I D U H, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, et al. 2022. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva province, Sri Lanka[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 8: 2013–2223.
- Sharp R, Tallis H, Ricketts T, et al. 2018. InVEST 3.7. 0 user's guide[M]. California: The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund: 73–76.
- Van der Werf G R, Morton D C, Defries R S, et al. 2009. Estimates of fire emissions from an active deforestation region in the southern Amazon based on satellite data and biogeochemical modeling[J]. Biogeosciences, 6(2): 235–249.
- Wang Z Y, Li X, Mao Y T, et al. 2021. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China[J]. Ecological Indicators, 134: 108499.
- 陈广生,田汉勤.2007.土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的 影响[J].植物生态学报,31(2):189-204.
- 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 2016. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架[J]. 地理研究, 35(6): 1005-1016.
- 郝晓敬, 张红, 徐小明, 等. 2020. 晋北地区土地利用覆被格局的演变与 模拟[J]. 生态学报, 40(1): 257-265.

- 何涛, 孙玉军. 2016. 基于 InVEST 模型的森林碳储量动态监测[J]. 浙 江农林大学学报, 33(3): 377-383.
- 黄玫,季劲钧,曹明奎,等.2006.中国区域植被地上与地下生物量模 拟[J].生态学报,26(12):4156-4163.
- 孔君洽, 杜泽玉, 杨荣, 等. 2019. 黑河中游土地利用/覆被变化及其对 碳储量影响的预测[J]. 中国沙漠, 39(3): 87-97.
- 李茂娟, 李天奇, 朱文博, 等. 2021. 基于 InVEST 模型的太行山区生态 系统碳储量多维变化研究 [J]. 河南大学学报 (自然科学 9 版), 51(6): 631-642,684.
- 刘纪远. 1997. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. 遥感 学报, 1(3): 225-230.
- 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 2014. 20世纪 80年代末以来中国土地利 用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 69(1): 13-14.
- 刘建华,许皞,王耀,等.2018.基于土地利用格局变化的生态风险与固 碳功能评价——以河北省黄骅市为例[J].中国生态农业学报, 26(8):1217-1226.
- 朴世龙,方精云,贺金生,等.2004.中国草地植被生物量及其空间分布 格局[J].植物生态学报,28(4):491-498.
- 秦作栋,王孟本,薛占金.2008.晋北地区土地沙化现状及其成因分 析[J].水土保持研究,15(2):168-172.
- 修珍珍, 王斌, 杨校生, 等. 2016. 基于 INVEST 模型估算富阳市森林生态系统碳储量[J]. 广西植物, 36(7): 868-874.
- 薛占金,秦作栋,孟宪文.2011.晋北地区环境特征及其土地沙化机制 研究[J].水土保持研究,18(2):98-102.
- 张斯屿,白晓永,王世杰,等. 2014. 基于 InVEST 模型的典型石漠化地 区生态系统服务评估——以晴隆县为例[J]. 地球环境学报,5(5): 328-338.
- 张徐,李云霞,吕春娟,等. 2022. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功 能应用研究进展[J]. 生态科学, 41(1): 237-242.
- 张燕,师学义,唐倩. 2021.不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量 评估[J]. 生态学报,41(1): 360-373.
- 张影,谢余初,齐姗姗,等. 2016. 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, 38(8): 1585-1593.
- 朱建佳, 戴尔阜, 郑度, 等. 2018. 采伐影响下人工林木材生产与固碳功 能权衡特征: 以湖南会同森林生态实验站为例[J]. 地理学报, 73(1): 152-163.
- 朱文博,张静静,崔耀平,等. 2019. 基于土地利用变化情景的生态系统 碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 74(3): 446-459.
- 邹文涛,何友均,叶兵,等.2020.基于 InVEST 模型的森林生态系统服务功能评估研究进展[J].世界林业研究,33(4):19-24.