

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.047.

胡冰清, 李文博, 祝元丽. 基于多退耕情景的吉林省中部黑土区固碳潜力与增汇格局研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 230-238, 246.

Hu Bingqing, Li Wenbo, Zhu Yuanli. Estimating Carbon Sequestration Potential and Sinking Pattern Under Multi-level Fallowing Scenarios in Central Jilin Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 230-238, 246.

# 基于多退耕情景的吉林省中部黑土区固碳 潜力与增汇格局研究

胡冰清<sup>1</sup>, 李文博<sup>2</sup>, 祝元丽<sup>3</sup>

(1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061; 2. 东北大学 文法学院, 沈阳 110169;

3. 中国矿业大学 公共管理学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** [目的] 以农业固碳增汇为目的, 结合耕地资源稳定性识别需开展生态退耕的地块, 探究典型黑土区未来多梯度退耕情景下的固碳潜力与增汇格局, 为优化黑土区耕地空间适宜性和丰富东北地区农业减排固碳理论提供依据。[方法] 基于吉林省中部黑土区 2005 年和 2020 年土地利用数据, 通过 PLUS-Markov 耦合模型和 InVEST 模型模拟多梯度退耕情景, 并对研究区碳储量及因生态退耕所引起的固碳潜力变化及增汇情况进行测算。[结果] (1) 设定自然发展情景及 A、B、C 共 3 类退耕情景, 模拟强度递增。在 A、B、C 情景下需要退耕的耕地面积分别为  $1.5 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,  $2.65 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,  $3.8 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>, 主要受社会经济因子驱动较强, 约占总贡献度的 30%。从退耕类型上看, 退耕还林范围分布较广, 主要集中在四平市、东辽县和长春市等地, 退耕还草规模较小但呈现空间集聚特征, 多在双辽市和农安县等地; (2) 随模拟退耕强度增大, 研究区碳储量呈上升趋势, 在退耕情景 A、B、C 下预计分别达到  $7.26 \times 10^6$  Mg,  $7.27 \times 10^6$  Mg 和  $7.27 \times 10^6$  Mg, 整体呈现由东南部向西北部递减的分布特征, 其中高碳汇地区主要集中分布于舒兰市、永吉县和桦甸市等地。 (3) 不同退耕情景下, 研究区增汇格局相对稳定, 多集中在研究区东部和南部。综合权衡粮食安全因素和农业固碳需求, 建议参考退耕情景 B 开展生态退耕, 四平市、东辽县和长春市将成为吉林省中部黑土区重点农业固碳增汇单元, 预计可增加碳储量分别达到 1 963.4 Mg, 806.48 Mg 与 703.06 Mg。[结论] 吉林省中部黑土区农业固碳减排依赖于漫川漫岗区的边际不稳定耕地退耕还林, 应科学权衡耕地的产能状况和生态效应布局退耕工程、制定退耕时序, 同时结合全域土地综合整治调节粮食产能, 以达到提升黑土区耕地空间适宜性和农业系统可持续性的目的。

**关键词:** 生态退耕; 碳储存; InVEST 模型; 碳增汇

中图分类号: F323.2; X16

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0230-09

## Estimating Carbon Sequestration Potential and Sinking Pattern Under Multi-level Fallowing Scenarios in Central Jilin Province

Hu Bingqing<sup>1</sup>, Li Wenbo<sup>2</sup>, Zhu Yuanli<sup>3</sup>

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. School of Humanities and Law, Northeastern University, Shenyang 110169, China;

3. School of Public Policy and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** [Objective] In an attempt to increase carbon stock in the agricultural sector, the marginalized and unstable lands were identified as the fallow plots, carbon sinks due to ecological fallowing under future multi-gradient fallowing scenarios were explored to provide an crucial basis for arranging the fallow of marginalised cropland and enriching the theory of carbon sequestration in the northeast black soil region. [Methods] Based on the 2005 and 2020 land use data in the central black soil area of Jilin Province, a multi-gradient fallow

收稿日期: 2023-09-30

修回日期: 2023-10-19

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42001223; 42201271)

第一作者: 胡冰清(2000—), 女, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要研究方向为耕地资源利用与保护。E-mail: hubq21@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 李文博(1990—), 男, 吉林长春人, 副教授, 主要研究方向为土地资源评价与规划管理。E-mail: liwenbon@jlu.edu.cn 或 liwb@wfxu.neu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

scenario was simulated by the PLUS-Markov coupled model and the InVEST model, and the carbon stock and the potential for carbon sequestration and sink enhancement due to ecological fallow in the study area were measured. [Results] (1) The natural development scenario and three fallowing scenarios A, B, and C with increasing intensity were set in this study. The marginal unstable farmland fallow in scenarios A, B, and C were  $1.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,  $2.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , and  $3.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , respectively. These scenarios were mainly driven by socio-economic factors, accounting for about 30% of the total contribution. In terms of fallow types, the returning-to-forest areas widely distributed, mainly concentrated in the places such as Siping, Dongliao, and Changchun, while the returning-to-grass areas were smaller but exhibited spatial aggregation features, which were mainly located in the places such as Shuangliao and Nong'an. (2) As the simulated fallow intensity increased, the carbon stock in the study area also indicated an increasing trend. Under fallow scenarios A, B, and C, the estimated carbon storage would reach up to  $7.26 \times 10^6 \text{ Mg}$ ,  $7.27 \times 10^6 \text{ Mg}$  和  $7.27 \times 10^6 \text{ Mg}$ , respectively, which decreased from the southeast and the northwest. The areas with high carbon sinks concentrated mainly in areas such as Shulan, Yongji, and Huadian. (3) Under different fallow scenarios, the carbon sink pattern in the study area remained stable, mainly concentrated in the eastern and southern parts. Considering the factors of food security and agricultural carbon sequestration demand, it is recommended to refer to the fallowing scenario B, and Siping, Dongliao, and Changchun will become the key agricultural carbon sink units in the black soil area of central Jilin Province. It is estimated that carbon stock will increase to 1963.4 Mg, 806.48 Mg and 703.06 Mg, respectively. [Conclusion] The carbon stock increase from the agricultural sector in the black soil region of central Jilin Province depends on the fallow of marginalized croplands in a rolling hilly region. The productivity and the ecological effects arising from cropland use should be balanced in the layout and priority of the fallow projects. Meanwhile, the food production capacity needs to be adjusted in conjunction with comprehensive land reclamation in the entire region in order to achieve the aims of improving the spatial suitability of cropland and the sustainability of the agricultural system in the black soil area.

**Keywords:** ecological fallowing; carbon stock; InVEST model; carbon sinks

土地利用变化直接影响陆地生态系统碳储量,是温室气体的主要来源之一,其中农用地具有碳源—碳汇双重作用<sup>[1]</sup>,是我国实现“双碳”目标重点关注的减排固碳端口<sup>[2]</sup>。东北地区作为我国重要的后备耕地资源开发区,农业开垦与耕地集约化利用已对陆地生态系统碳库产生较大扰动,严重降低其碳汇水平<sup>[3]</sup>。并且在推广保护性耕作前,东北地区秸秆还田率普遍较低,不仅严重降低土壤肥力,同时削弱其作为我国重要生态屏障的固碳能力<sup>[4]</sup>。有研究表明,1980—2011年,东北地区耕层土壤有机碳(SOC, Soil Organic Carbon)平均含量下降  $0.41 \text{ Mg/hm}^2$ ,成为全国唯一土壤碳密度下降的农业区<sup>[5]</sup>。由此可见,在稳产前提下优化调整东北地区的耕地资源结构和布局,已成为东北地区推进农业固碳减排、提升黑土地固碳潜力的必由之路。

开展生态退耕旨在识别产能贡献度低、生态危害较重、资源稳定性较差的耕地资源,通过还林、还草、还湿等方式以提高整体生态系统服务价值、降低景观脆弱性<sup>[6]</sup>。而由于不同土地利用的碳密度组分差异

较大,通过优化调整土地利用结构可改变碳循环过程<sup>[7]</sup>。其中,科学估算碳汇潜力、评价退耕的碳汇效应是开展生态退耕布局和后期工程绩效评估的重要前提<sup>[8]</sup>。土地利用变化的碳汇效应研究一方面侧重于评估历史生态工程对区域碳汇的影响<sup>[9]</sup>,如邓元杰等<sup>[10]</sup>利用工程前后碳汇经济价值变化证明退耕还林还草工程对碳储量具有积极影响;李慧颖<sup>[11]</sup>基于 InVEST 模型系统对辽宁省 2000—2015 年退耕还林工程导致的碳储量变化等生态效应开展定量研究。另一方面,侧重预测未来土地利用变化的碳汇效应<sup>[12]</sup>,如侯建坤等<sup>[13]</sup>基于 InVEST 模型及 GeoSoS-FLUS 模型进行未来碳储量预测,指出土地利用变化对黄河流域碳储的重要意义。而预测模型应用方面多基于 CA-Markov 和 FLUS 等模型<sup>[14-15]</sup>,但此类模型难以处理不同地类在多因素作用下时空演变的不确定问题,无法明确因素间深层次关系,而 PLUS 模型基于土地扩张策略框架,能够更为精确地描述各土地利用类型在多驱动因素下的转化原因及发展需求<sup>[16]</sup>,极大提升了不同土地利用情景下的碳排放预

测精度,但相关研究方法和内容主要被应用于城市、湿地、海岸等生态脆弱区土地利用变化的综合碳汇效应中<sup>[17-18]</sup>,而较少被应用于生态退耕的定量预测研究,这忽视了农业系统在落实减排固碳中的重要性,同时相关研究的缺乏也将对科学布局以减排为目的的生态退耕工程形成阻碍。

综上,本文以吉林省中部黑土区为例,基于 2005 年和 2020 年土地利用数据,利用 PLUS-Markov 耦合模型模拟 2035 年多梯度退耕情景下土地利用格局,并对其中资源稳定性较差的耕地资源进行识别,在此基础上利用 InVEST 模型对研究区碳储量及因生态退耕所引起的固碳潜力变化及增汇情况进行测算,据此提出综合粮食安全和农业减排目标的生态退耕建议。本研究旨在为精准落位以农业减排为目的的生态退耕工程和丰富东北地区农业固碳理论提供思路和依据。

## 1 研究区概况

吉林省中东部(43°00′—45°00′N, 124°00′—128°00′E)广泛分布在松花江流域与辽河流域地带,总面积约为 679 万  $\text{hm}^2$ ,土壤肥沃、营养丰富,属大陆性季风气候区,地势整体呈西北低、东南高趋势,其中西北部地区地处黑土地带,主要包括长春市、农安县、公主岭市等地;东部地区多处于农牧交错带,地势起伏较大,主要包括蛟河市、桦甸市等地,是东北平原黑土资源分布的核心地带,也是闻名世界的黄金玉米带。近年来,由于资源过度开发利用、农业扩张现象显著,农业开垦与耕地集约化利用已对生态系统碳库产生较大扰动,碳汇水平严重下降<sup>[19]</sup>(图 1)。

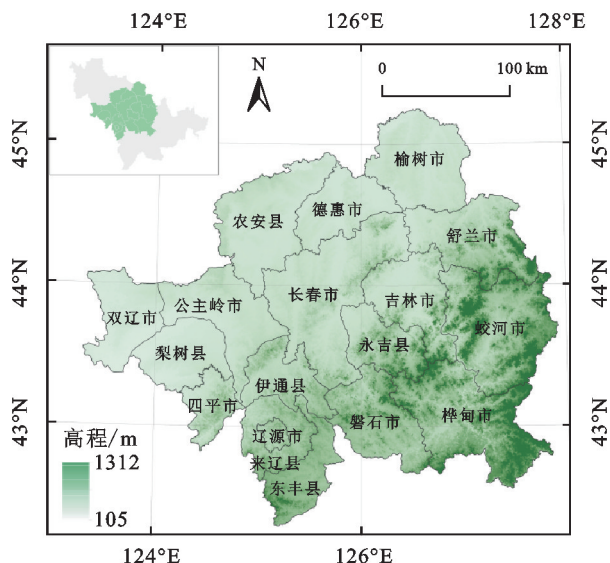


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究主要开展未来土地利用模拟预测及碳储量变化估算两方面研究内容,所需基础数据来源见表 1。其中用于未来土地利用模拟预测的数据主要包括:(1) 2005—2020 年土地利用数据,其利用类型具体分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地;(2) 驱动土地利用变化的自然环境数据,包括地形、降水和气温等要素数据;(3) 社会经济数据,包括人口数据和人均 GDP 数据;(4) 可达性数据,包括铁路、主干道和城市中心等数据,并通过欧氏距离生成距离栅格;(5) 不稳定耕地数据,研究区主要分布有林区耕地和河道耕地两种不稳定耕地类型。

用于碳储量变化估算的数据主要为碳密度数据,包括地上碳密度、地下碳密度、土壤有机质碳密度和死亡有机质碳密度数据,本文结合中国陆地生态系统碳密度数据<sup>[20]</sup>与东北地区碳密度数据<sup>[21]</sup>并参考对比多个碳密度数据源<sup>[22]</sup>,通过与研究区气温及降水相关的碳密度修正模型公式进行修正<sup>[23]</sup>。

### 2.2 研究方法

运用 PLUS-Markov 耦合模型及 InVEST 模型的基本思路如下:(1) 基于 PLUS-Markov 模型的生态退耕情景模拟。主要包括:(1) 多梯度退耕情景设定:运用 Markov 链得出研究区 2005—2020 年土地利用转移概率矩阵,并据此结合研究区实际情况设置不同邻域权重系数。(2) 未来土地利用模拟预测:利用 PLUS 模型将多梯度退耕情景需求进行空间模拟分配,得出研究区 2035 年多梯度土地利用格局图并进行模型精度检验。(3) 建议优先退耕地块识别:结合耕地稳定性识别不同退耕情景下的优先退耕地块,作为后续碳储量变化测算依据。(2) 基于 InVEST 模型的碳储量及碳汇变化测算。利用 InVEST 模型测算研究区 2005—2035 年碳储水平并对不同情景由生态退耕引起的增汇情况进行分析,据此提出以农业减排为目的的生态退耕建议。

2.2.1 基于 PLUS-Markov 模型的生态退耕情景模拟 (1) 多梯度退耕情景设定。Markov 模型作为无后效性的概率预测模型,被广泛应用于设定及预测土地利用变化发展情景,其模型公式为:

$$S(T) = P_{ij} \times S(T_0) \quad (1)$$

式中: $S(T)$ 与 $S(T_0)$ 别代表 $T$ 与 $T_0$ 时土地利用状态矩阵; $P_{ij}$ 为地类 $i$ 转化成地类 $j$ 的土地转移概率矩阵。

本文基于 2005—2020 年的土地利用转移概率矩



阵,结合邓元杰等<sup>[10]</sup>的研究结果和研究区实际情况,将本文生态退耕范围表示为退耕还林及退耕还草区域,并运用 Markov 链为研究区 2020—2035 年土地利用变化设定多梯度退耕情景:(1) 自然发展情景:该情景下保持耕地向林地和草地的转移概率不变;

(2) 退耕情景 A:该情景下将耕地向林地和草地的转移概率分别提高 20%和 10%;(3) 退耕情景 B:该情景下将耕地向林地和草地的转移概率分别提高 35%和 20%;(4) 退耕情景 C:该情景下将耕地向林地和草地的转移概率分别提高 50%和 30%。

表 1 数据说明  
Table 1 Data declaration

数据类型	数据名称	单位	数据来源
2005 年、2020 年 土地利用数据	—	m	CLCD(China Land Cover Dataset) <sup>[24]</sup>
	高程	m	
	坡度	(°)	地理空间数据云( <a href="https://www.gscloud.cn/search">https://www.gscloud.cn/search</a> )
	坡向	(°)(方位角)	
自然环境数据	年均降水量	cm	WorldClim( <a href="https://worldclim.org/data/index.html">https://worldclim.org/data/index.html</a> )
	年均气温	(°C)	
	NDVI	—	<a href="https://search.earthdata.nasa.gov/search">https://search.earthdata.nasa.gov/search</a>
	土壤类型	—	国家青藏高原科学数据中心( <a href="http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/">http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/</a> )
	到河流距离	m	OpenStreetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
	到铁路距离	m	
	到快速路距离	m	
可达性数据	到主干道距离	m	OpenStreetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
	到次干道距离	m	
	到城市中心距离	m	
	人口	—	
社会经济数据	人均 GDP	元	Open Spatial Demographic Data and Research( <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a> ) 全球变化科学研究数据出版系统 ( <a href="http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=125">http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=125</a> )
	耕地调查数据	不稳定耕地数据	不稳定耕地调查
碳密度数据	碳密度	Mg/hm <sup>2</sup>	结合中国碳密度数据及邻近区域碳密度数据修正

(2) 土地利用模拟预测。PLUS 模型包含两个模块:土地扩张分析策略(LEAS)模型和基于多类型随机种子(CARS)的 CA 模型<sup>[25]</sup>。LEAS 模块利用随机森林算法(RFC)计算各土地利用类型扩张过程中受不同驱动因子影响的水平,据此得出不同土地类型的发展潜力。其中,驱动因素参考前人研究成果<sup>[21]</sup>,结合研究区实际情况从自然环境(DEM、坡度、坡向、年均降水量、年均温度、NDVI 和土壤类型)、可达性(河流、铁路、快速路、主干道、次干道和城市中心)及社会经济(人口、人均 GDP)三方面选取 15 种因子,最终得出各用地类型的用地扩张系数分别为:耕地 0.452,林地 0.186,草地 0.038,水域 0.037,建设用地 0.282,未利用地 0.005。

CARS 模块基于前一模块结果,结合自适应系数及邻里效应等,使得土地利用总量在更大范围内满足未来设定的需求,同时模拟并呈现时空上动态变化。此外,为了确保模型能够准确模拟研究区土地类型变化结果,本文采用 Kappa 系数对模拟结果进行精度验证<sup>[15]</sup>,其值介于 0~1,且值越接近于 1,模拟精度越好,最终结果为 0.89,满足研究需求。

(3) 建议优先退耕地块识别。将上述土地利用模型模拟结果与研究区不稳定耕地资源(图 2)相叠加,识别不同情景建议优先退耕地块并据此计算碳储量变化及增汇情况。

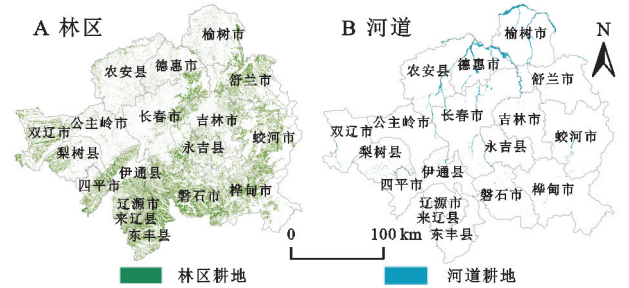


图 2 不稳定耕地地块分布

Fig. 2 Distribution of unstable cropland plots

2.2.2 基于 InVEST 模型的碳储量及碳汇变化测算  
本文依据 InVEST 模型中计算陆地生态系统碳储量的 Carbon 模块,分析研究区退耕前后碳储量的变化,并测算每种情景下由生态退耕引起的增汇情况。假设每个土地利用类型系统对应一个由地上生物碳密度、地下生物碳密度、死亡有机质碳密度、土壤有机质碳库碳密度组成的该地区陆地生态系统的总碳密

度,据此计算基于土地利用数据的研究区碳储量,其公式为:

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} + C_{i\text{-dead}} \quad (2)$$

式中: $C_i$  是  $i$  地类的碳密度; $C_{i\text{-above}}$  是  $i$  地类的地上碳密度; $C_{i\text{-below}}$  是  $i$  地类的地下碳密度; $C_{i\text{-soil}}$  是  $i$  地类的土壤碳密度; $C_{i\text{-dead}}$  是  $i$  地类的死亡有机质碳密度。

$$C_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (3)$$

式中: $C_{\text{tot}}$  代表总碳汇量; $S_i$  代表  $i$  地类的面积。

其中,研究区各土地利用类型的碳密度数据通过结合中国陆地生态系统碳密度数据与邻近区域碳密度数据,在参考对比多种数据源的基础上利用修正模型对其进行修正,该模型结合两地年均降水与年均气温计算修正系数,研究区的碳密度数据即为修正系数与邻近区域碳密度乘积(表 2)。修正系数具体公式如下:

$$K_B = \text{Average} \left( \frac{0.03 \times P' + 14.4}{0.03 \times P'' + 14.4}, \frac{-0.4 \times T' + 43.0}{-0.4 \times T'' + 43.0} \right) \quad (4)$$

$$K_S = \text{Average} \left( \frac{0.07 \times P' + 79.1}{0.07 \times P'' + 79.1}, \frac{-3.4 \times T' + 157.7}{-3.4 \times T'' + 157.7} \right) \quad (5)$$

$$K_D = \text{Average} \left( \frac{0.001 \times P' + 0.58}{0.001 \times P'' + 0.58}, \frac{-0.03 \times T' + 2.03}{-0.03 \times T'' + 2.03} \right) \quad (6)$$

式中: $K_B$  代表最终生物量修正系数; $P'$  和  $P''$  分别是研究区和修正参考地区的年均降水; $T'$  和  $T''$  分别是研究区和修正参考地区的年均温度; $K_S$  代表最终土壤有机修正系数; $K_D$  代表死亡有机修正系数。

表 2 各用地类型碳密度

Table 2 The carbon density for each land use type

利用类型	Mg/hm <sup>2</sup>			
	$C_{\text{above}}$	$C_{\text{below}}$	$C_{\text{soil}}$	$C_{\text{dead}}$
耕地	5.18	1.04	89.9	0.00
林地	18.34	8.85	107.48	2.25
草地	0.74	7.14	90.74	0.25
水域	3.95	9.54	163.25	0.79
建设用地	1.06	5.70	65.71	0.61
未利用地	9.47	12.16	22.73	0.00

### 3 结果与分析

#### 3.1 基于资源稳定性的生态退耕情景模拟

耕地和林地是研究区主要用地类型,其中林地主要集中在地势较高的东部地区,而耕地多位于研究区北部和西部(图 3)。2005—2020 年,随社会经济迅速发展,建设用地呈现明显扩张趋势,挤压大量中部耕地生产空间;而在 2020—2035 年,研究区耕地数量在

自然发展情景下趋于峰值,达到 430.40 万 hm<sup>2</sup>(表 3),随退耕强度增大,耕地面积呈小幅度递减,在退耕情景 A、B、C 下依次达到 428.90 万 hm<sup>2</sup>, 427.75 万 hm<sup>2</sup>, 426.60 万 hm<sup>2</sup>,其中在退耕情景 C 下退耕面积最高,占研究区总耕地面积的 0.88%。总体而言,研究区耕地变化受社会经济因子驱动更强(图 4),约占总贡献度的 30%,人口集中、人均 GDP 发达地区经济发展迅速,人类活动频繁,边际耕地相对更多,退耕概率较大,而研究区作为典型黑土区,耕地土壤类型无明显差异,贡献度相对较低;从退耕类型上看,退耕还林部分面积更大、范围更广(图 5),主要集中在研究区南部的四平市、东辽县和中部的长春市,该类地区植被覆盖度较高,部分地势起伏大,如开展生态退耕,将其中以林区耕地的还林工程为主,随退耕强度提升,南部伊通县、桦甸市等相继成为退耕热点区域,且逐渐向研究区西部公主岭市等地延伸;相较而言,退耕还草区域规模更小,但分布更为集中,多在研究区西部双辽市、农安县和四平市附近,多为河道耕地。随退耕强度提升,退耕还草范围逐渐向东部桦甸市和蛟河市等地延伸。

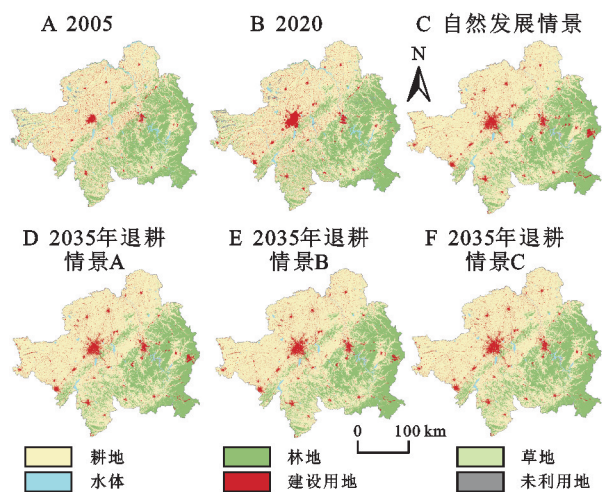


图 3 2035 年土地利用类型

Fig. 3 Land use patterns for different scenarios in 2035

表 3 研究区不同退耕情景下耕地变化

Table 3 Changes in cropland under different de-farm scenarios in the study area

模拟退耕	自然发展	2035 年退耕	2035 年退耕	2035 年退耕
指标	情景	情景 A	情景 B	情景 C
耕地面积/万 hm <sup>2</sup>	430.40	428.90	427.75	426.60
模拟退耕面积/万 hm <sup>2</sup>	—	1.50	2.65	3.80
模拟退耕面积占比/%	—	0.35	0.62	0.88

#### 3.2 碳储量格局变化与增汇潜力分析

2005—2035 年,研究区碳储量总体呈现先降后升趋势(图 6)。其中,在 2005—2020 年,受快速城镇化发展影响,部分耕地受建设用地扩张过程挤占,面

积减少且并未转成碳密度相对较高的土地类型,碳储量大幅度下跌,从  $7.40 \times 10^6$  Mg 降到  $7.30 \times 10^6$  Mg; 在 2020—2035 年,自然发展情景下的碳储量继续保持原有下降趋势,但下降幅度明显缩小,出现近年最低值  $7.25 \times 10^6$  Mg,随退耕强度增大,耕地多转成碳密度相对较高的林草地,碳储量呈现上升趋势,在退耕情景 A,B,C 中依次达到  $7.26 \times 10^6$  Mg,  $7.27 \times 10^6$  Mg 和  $7.27 \times 10^6$  Mg。从空间分布上看(图 7),研究区碳储量空间异质性较强,整体由东南向西北递减,高碳汇地区主要集中在舒兰市、永吉县和桦甸市附近,该类区域林草资源密集,固碳能力相对较强,对于研究区整体碳平衡具有重要价值。

依据上述模拟结果测算可知,研究区增汇区域空间分布大致相似(图 8),多集中在东部和南部,且增汇量在 0.01~2 190.31 Mg 之间,不同情景下大多经历先降再升,与碳储量趋势保持一致,其中南部的四平市增汇量最高(表 4),在自然发展情景下可达 2 406.06 Mg,随退耕强度提升,依次能达到 1 728.01 Mg, 1 963.61 Mg 和 2 190.31 Mg,远超于其他地区,是研究区最具潜力的增汇区域;除此之外,东辽县、长春市等地也是

主要增汇区域,均增汇量可达 750~850 Mg,该类地区林草地密集,适宜退耕工程及生态工程落位;而榆树市、农安县、公主岭市等地作为传统产粮地区,耕地资源相对优质且产粮需求高,退耕后可能对粮食产能有一定威胁,碳汇无明显提升空间。综合考虑粮食安全与农业固碳减排需求<sup>[28-29]</sup>,建议参考退耕情景 B 开展生态退耕,四平市、东辽县和长春市将成为重点农业固碳增汇调整的主要对象。

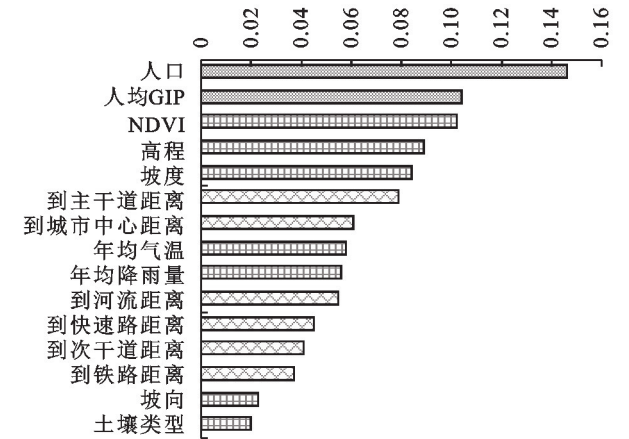


图 4 耕地变化驱动因子贡献度

Fig. 4 Contribution of driving factors for cropland changes

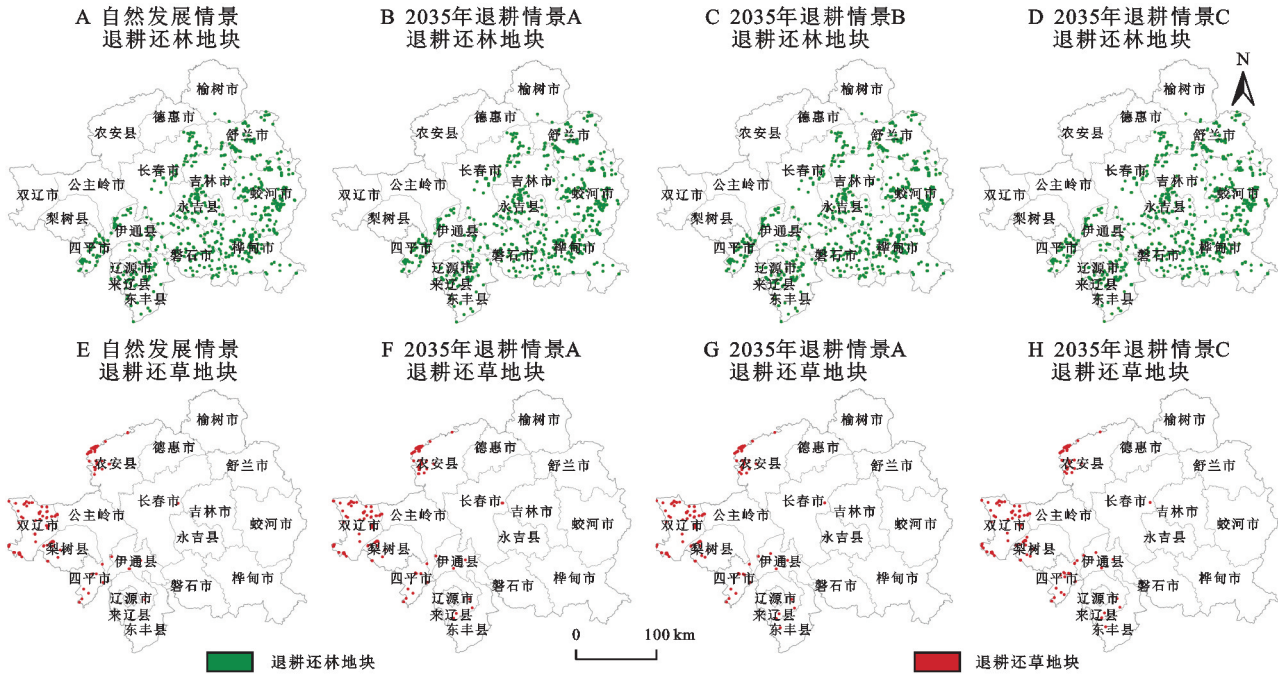


图 5 建议优先退耕耕地地块分布

Fig. 5 Distribution of cropland plots recommended for priority de-farming

4 讨论与结论

4.1 讨论

自然环境因素和社会经济因素等共同制约着土地利用类型变化,在快速城镇化发展时期,城市建设用地不断扩张侵占周围耕地资源成为驱动耕地变化的主导因素<sup>[21]</sup>,并且受城镇化影响,土壤中有机的

输入及分解速率受扰动程度愈大<sup>[26]</sup>,进一步降低耕地资源稳定性及固碳能力,从而对碳储量变化的影响愈加深远。人口及 GDP 作为能够衡量社会经济发展的主要指标,其空间差异性成为地区间碳储量变化差异的重要原因之一。吉林省作为粮食主产区,中部地区分布大量优质土壤资源,但该区域也是吉林省社会经济要素的集中分布区,仍需系统协调城镇、农业和



生态空间的矛盾,统筹国土空间开发保护格局以科学合理布局农业减碳措施。

本文基于耕地转换概率设定多梯度退耕情景,经对比建议选择退耕情景 B 作为开展生态退耕的参考依据。该退耕情景包括 15 个增汇地区,且多地区增汇潜力空间较大,可较大幅度提升研究区碳储量。同时,参考吉林省“十四五”规划与黑土保护政策目标,能够保证剩余耕地面积不越过耕地保护红线,开展退耕区域主要为资源稳定性差、产能较低的边际化耕地,对粮食产能的威胁性较小。在此基础上,建议研究区持续推进保护性耕作措施,尽量减少地表耕作扰动、加强秸秆还田比率并开展轮作制度,恢复耕地地力,在农业生产过程中推广使用清洁能源代替高碳排能源;此外,还应以大食物观统筹、优化东北地区大农业空间,秉持耕地资源进出平衡原则,坚持用养结合以实现黑土地资源可持续利用。

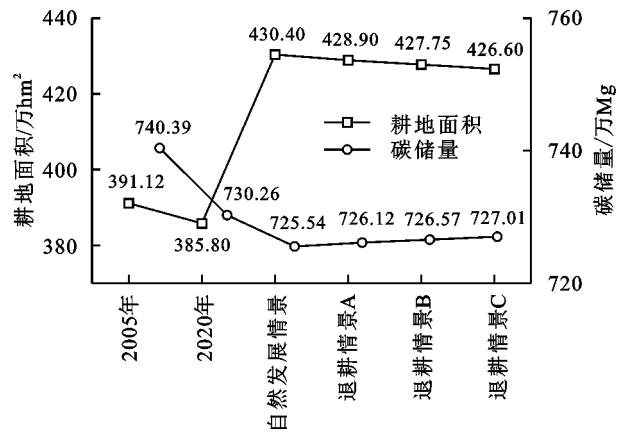


图 6 不同情景下研究区耕地规模与碳储量变化情况

Fig. 6 The scale of croplands and carbon stock in the study area under different scenarios

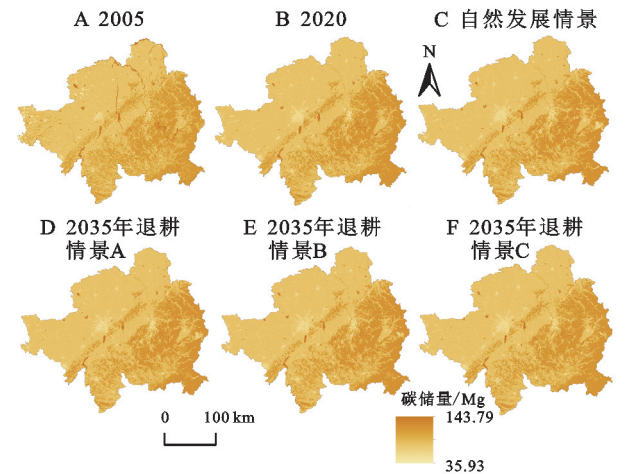


图 7 不同情景下碳储量格局

Fig. 7 Patterns of carbon stock under different scenarios

研究对于提升东北黑土区耕地空间适宜性和丰富东北地区农业减排固碳理论具有参考意义,但仍存在局限性:InVEST 模型基于碳库数据测算碳储

量,各用地类型的当量恒定,在一定程度上削弱了环境对碳循环过程和随后植被再生过程的影响,参数的准确性和实时性存在不足<sup>[27]</sup>。在本研究中,已基于全国和东北地区碳密度数据,参考多种数据源并结合研究区气温及降水情况进行修正以减少碳储量误差。在后续研究中将结合遥感技术与实测数据完善相关环节。

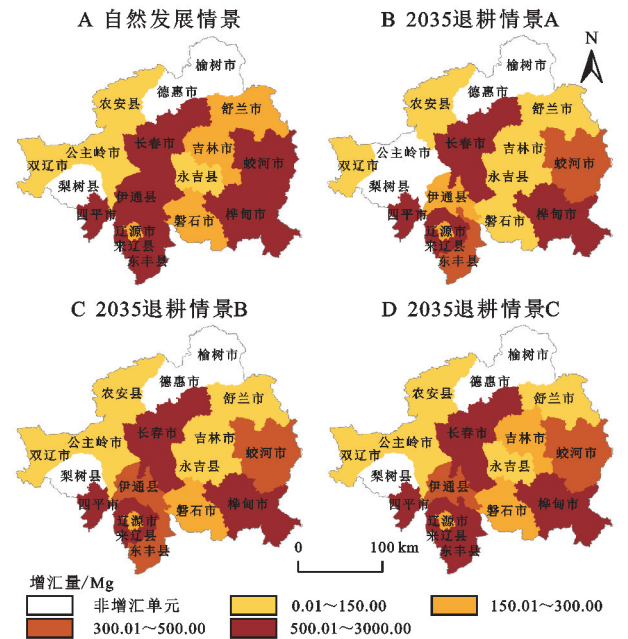


图 8 不同情景下增汇格局

Fig. 8 Pattern of carbon increase under different scenarios

表 4 不同情景下增汇单元

Table 4 Units of carbon increase under different scenarios

	Mg			
模拟情景	自然发展	2035 年	2035 年	2035 年
增汇单元	情景	退耕情景 A	退耕情景 B	退耕情景 C
榆树市	—	—	—	—
德惠市	—	—	—	—
梨树县	—	—	—	—
公主岭市	123.28	—	61.64	123.28
农安县	83.56	20.89	20.89	41.78
永吉县	134.24	103.42	134.23	134.24
舒兰市	155.13	103.42	103.42	103.42
吉林市	237.66	134.24	134.25	185.94
双辽市	106.82	44.15	44.15	44.15
磐石市	289.37	134.24	185.95	185.96
蛟河市	682.17	320.19	320.19	456.64
辽源市	206.84	155.13	155.13	155.13
桦甸市	599.63	517.10	651.35	568.81
东辽县	981.47	827.36	806.48	837.30
长春市	837.30	630.46	703.06	733.88
伊通县	516.08	299.30	381.83	464.36
四平市	2406.06	1728.01	1963.61	2190.31
东丰县	577.72	433.54	464.36	546.90

4.2 结 论

本文利用 PLUS-Markov 耦合模型模拟 2035 年多梯度退耕情景下土地利用格局,并对其中资源稳定性较差的耕地资源进行识别,在此基础上利用 InVEST 模型对研究区碳储量及因生态退耕所引起的固碳潜力变化及增汇情况进行测算,最终得出以下三点结论:

(1) 2020—2035 年,研究区耕地数量在自然发展情景下趋于峰值,达到  $4.304\times 10^6\text{ hm}^2$ ,随退耕强度增大,耕地面积呈小幅度递减,在退耕情景 A,B,C 下依次达到  $4.289\times 10^6\text{ hm}^2$ ,  $4.2775\times 10^6\text{ hm}^2$ ,  $4.266\times 10^6\text{ hm}^2$ ,其中在退耕情景 C 下退耕面积最高,占研究区总耕地面积的 0.88%。总体而言,研究区耕地变化受社会经济因子驱动更强,约占总贡献度的 30%。从退耕类型上看,退耕还林部分范围更为广阔,主要集中在研究区南部的四平市、东辽县和中部的长春市,随退耕强度提升,南部伊通县、桦甸市等相继成为退耕热点区域;相较而言,退耕还草区域规模更小,但分布更为集中,多在研究区西部双辽市、农安县和四平市附近,随退耕强度提升逐渐向东部桦甸市和蛟河市等地延伸。

(2) 2020—2035 年,研究区碳储量在自然发展情景下保持原有下降趋势,出现最低值  $7.25\times 10^6\text{ Mg}$ ,后随退耕强度增大呈上升趋势,在退耕情景 A,B,C 中依次达到  $7.26\times 10^6\text{ Mg}$ ,  $7.27\times 10^6\text{ Mg}$  和  $7.27\times 10^6\text{ Mg}$ 。从空间分布上看,碳储量空间异质性较强,整体由东南部向西北部递减,高碳汇地区主要集中在林草资源密集的舒兰市、永吉县和桦甸市附近。

(3) 2020—2035 年,研究区增汇区域在空间分布上大致相似,多集中在东部和南部,且增汇量在  $0.01\sim 2\,190.31\text{ Mg}$  之间,数值变化趋势多与碳储量趋势保持一致。其中南部的四平市增汇量最高,在自然发展情景下可达  $2\,406.06\text{ Mg}$ ,是研究区最具潜力的增汇区域;除此之外,东辽县、长春市等地也是主要增汇区域,均增汇量可达  $750\sim 850\text{ Mg}$ ,而榆树市、农安县、公主岭市等地无明显增汇空间。综合考虑粮食安全与农业固碳减排需求,建议参考退耕情景 B 开展生态退耕,四平市、东辽县和长春市将成为重点农业固碳增汇调整的主要对象。

参考文献 (References):

[1] Yang H, Wang X X, Bin P. Agriculture carbon-emission reduction and changing factors behind agricultural eco-efficiency growth in China[J]. Journal of Cleaner

Production, 2022,334:130193.

[2] 李波,刘雪琪,王昆.中国农地利用结构变化的碳效应及时空演进趋势研究[J].中国土地科学,2018,32(3):43-51.

Li B, Liu X Q, Wang K. Study on carbon effects and spatial-temporal evolution trend based on the changes of agricultural land use in China[J]. China Land Science, 2018,32(3):43-51.

[3] 周姝含.东北三省碳源/碳汇时空分布与碳盈亏预测研究[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2023.

Zhou S H. Spatio-Temporal Distribution of Carbon Source/Sink and Carbon Deficit Prediction in Northeast China[D]. Dalian, Liaoning: Liaoning Normal University, 2023.

[4] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.

Han X Z, Li N. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7):1032-1041.

[5] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(16):4045-4050.

[6] 时亚坤,曾奕,郭金金,等.黄土高原新一轮退耕还林草工程对粮食生产的影响[J].水土保持研究,2022,29(3):419-425.

Shi Y K, Zeng Y, Guo J J, et al. Effect of the new phase of the grain for green program on grain output on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):419-425.

[7] 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.

Zhu W B, Zhang J J, Cui Y P, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(3):446-459.

[8] Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(16):4039-4044.

[9] 黎鹏,张勇,李夏浩祺,等.黄土丘陵区不同退耕还林措施的土壤碳汇效应[J].水土保持研究,2021,28(4):29-33.

Li P, Zhang Y, Li X, et al. Effect of soil carbon sink in the hilly region of the Loess Plateau under grain for green project[J]. Research of Soil and Water Conserva-



- tion, 2021, 28(4): 29-33.
- [10] 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.
- Deng Y J, Yao S B, Hou M Y, et al. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang County in hilly and Gully Region of Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 826-844.
- [11] 李慧颖. 基于遥感和 InVEST 模型的辽宁省退耕还林工程生态效应评估[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- Li H Y. The Evaluation on Ecological Effects of the Project of Returning Farmland to Forest in Liaoning Province, based on Remote Sensing and InVEST Model [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [12] 王琦, 黎孔清, 朱利群. 南京都市农业农地利用碳排放测算及趋势预测[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 288-294, 302.
- Wang Q, Li K Q, Zhu L Q. Estimation of carbon utilization and prediction of agricultural land use in urban agriculture of Nanjing city [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 288-294, 302.
- [13] 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 等. 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5253-5262.
- Hou J K, Chen J J, Zhang K Q, et al. Temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the source region of the Yellow River based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5253-5262.
- [14] 张斌, 李璐, 夏秋月, 等. “三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响: 以武汉城市圈为例[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2265-2280.
- Zhang B, Li L, Xia Q Y, et al. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: A case study of Wuhan City circle [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2265-2280.
- [15] 金梦婷, 徐丽萍, 徐权. 基于 FLUS-Markov 模型的多情景景观生态风险评价与预测: 以南疆克州为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1793-1804.
- Jin M T, Xu L P, Xu Q. FLUS-Markov model-based multiscenario evaluation and prediction of the landscape ecological risk in Kezhou, South Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1793-1804.
- [16] 王想, 王春雨, 吕飞南, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的区县碳储量时空格局变化与碳汇提升策略: 以延庆区为例[J]. 应用生态学报, 2023: 1-13. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202312.019.
- Wang X, Wang C Y, Lv F N, et al. Temporal and spatial carbon storage change and carbon sink improvement strategy of district and county level based on PLUS-InVEST model: Taking Yanqing District as an example [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023: 1-13. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202312.019
- [17] 汪勇政, 徐雅利, 余浩然. 基于 PLUS-InVEST 模型的安徽省碳储量时空变化预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 277-289.
- Wang Y Z, Xu Y L, Yu H R. Prediction of spatial and temporal changes of carbon stocks in Anhui Province based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 277-289.
- [18] 张鹏, 李良涛, 苏玉姣, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的邯郸市碳储量空间分布特征研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 338-348.
- Zhang P, Li L T, Su Y J, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of carbon storage in Handan city based on PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 338-348.
- [19] 余丹. 吉林黑土区耕地土壤重金属元素转化富集效率及其对耕地利用的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- Yu D. Biotransformation and Bioaccumulation of Soil Heavy Metals and Their Constraints on the Cultivated Land Use in the Black Soil Region of Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [20] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据, 2019, 4(1): 90-96.
- Xu L, He N P, Yu G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. China Scientific Data, 2019, 4(1): 90-96.
- [21] Li P C, Chen J D, Li Y X, et al. Using the InVEST-PLUS model to predict and analyze the pattern of ecosystem carbon storage in Liaoning Province, China [J]. Remote Sensing, 2023, 15(16): 4050.
- [22] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波, 等. 基于 InVEST 模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 854-861.
- Li J P, Xia S X, Yu X B, et al. Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem in Hebei Province based on InVEST model [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(7): 854-861.

- servation capacity of typical degraded secondary forests in Sub-Alpine Areas of Northwest Yunnan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 233-237, 245.
- [11] 贾彦龙, 许晴, 许中旗, 等. 燕山北部山地典型植物群落水源涵养能力研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 16-21.
- Jia Y L, Xu Q, Xu Z Q, et al. Water conservation capacity of typical plant communities in north region of Yanshan mountain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 16-21.
- [12] 杜捷. 北京山区森林枯落物层水文过程模拟研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- Du J. Simulated study on hydrological process of forest litter layer in Beijing mountainous area[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [13] 冯星, 孙东永, 胡维登, 等. 模糊物元理论在干旱分析中的应用研究[J]. 水文, 2018, 38(6): 18-23.
- Feng X, Sun D Y, Hu W D, et al. Application of fuzzy matter-element theory in drought analysis of weihe river basin[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(6): 18-23.
- [14] 何斌, 秦武明, 戴军, 等. 马占相思人工林不同年龄阶段水源涵养功能及其价值研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 5-8, 27.
- He B, Qin W M, Dai J, et al. Study on function and value of water conservation in different age classes of *Acacia mangium* plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 5-8, 27.
- [15] 张艳华. 浅谈混交林在植树造林应用中的重要意义: 混交原则及营造技术要点[J]. 农业与技术, 2019, 39(24): 83-84.
- Zhang Y H. Discussion on the significance of mixed forest in afforestation application: principles of mixed forest and key points of construction techniques[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(24): 83-84.
- [16] 杨晓霞, 赵锦梅, 张雪, 等. 祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 197-207.
- Yang X X, Zhao J M, Zhang X, et al. Litter and soil water conservation function of typical shrubs in eastern Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 197-207.
- [17] 张淑兰, 韩勇, 杨盼, 等. 汉江上游不同林龄麻栎林枯落物的水文功能评价[J]. 生态环境学报, 2022, 31(1): 44-51.
- Zhang S L, Han Y, Yang P, et al. Evaluation of hydrological function of litter of *Quercus Acuvarius* at different ages in the upper reaches of Han River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(1): 44-51.
- [18] 刘忠玲, 刘建明, 胡伟, 等. 不同密度胡桃楸次生林枯落物和土壤持水特性的研究[J]. 森林工程, 2021, 37(3): 52-59, 66.
- Liu Z L, Liu J M, Hu W, et al. Water-holding characteristics of litter and soil of *Juglans mandshurica* natural secondary forest with different densities[J]. Forest Engineering, 2021, 37(3): 52-59, 66.
- [19] 王磊, 温远光, 周晓果, 等. 尾巨桉与红锥混交对林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1340-1349.
- Wang L, Wen Y G, Zhou X G, et al. Effects of mixing *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* with *Castanopsis hystrix* on understory vegetation and soil properties[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7): 1340-1349.

(上接第 238 页)

- [23] Xu C L, Zhang Q B, Yu Q, et al. Effects of land use/cover change on carbon storage between 2000 and 2040 in the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 151: 110345.
- [24] 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.
- [25] 韩楚翘, 郑江华, 王哲, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型吐哈盆地陆地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J]. 干旱区地理, 2023: 1-15.
- Han C Q, Zheng J H, Wang Z, et al. Spatio-temporal variation and multi-scenario simulation of carbon storage in terrestrial[J]. Arid Land Geography, 2023: 1-15.
- [26] 古丽娜尔·索尔达汗. 吉林省中部城市用地扩张对耕层土壤有机碳分布的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- Suoerdahan · Gulinaer. Effects of Urban Land Expansion on the Distribution of Soil Organic Carbon of Arable Layers in Central Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [27] Qiu Z X, Feng Z K, Song Y N, et al. Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: Predicting forest vegetation growth based on climate and the environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119715.