

黑河市森林生态系统碳汇估计及火干扰分析

赵圆¹, 于颖^{1,2*}, 范文义^{1,2}

(1. 东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040; 2. 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室(东北林业大学), 哈尔滨 150040)

摘 要: 定量评价黑龙江省黑河市森林生态系统长时间序列固碳能力, 分析森林火干扰对碳汇动态影响, 为国家“双碳”目标提供参考数据。依据 2005、2010、2015 年黑河市 1 649 个森林样地动态监测数据, 结合加拿大森林碳收支模型 (carbon budget model of the Canadian forest sector model, CBM-CFS3), 在对模型参数本土化改进的基础上评估 2005、2010、2015 年黑河市森林生态系统多层次 (地上、地下、枯落物、枯死木及土壤碳库) 碳储量及碳汇能力, 并分析火干扰影响。结果表明, 2005、2010、2015 年, 黑河森林总生态系统碳密度从 207.15 t C/hm² 增至 218.63 t C/hm², 碳汇量达 531.54 t C。火灾发生频次逐年下降, 含碳气体排放量 2015 年较 2005 年同比下降 60.3%。以 2005 年因碳干扰情况为例, 轻微火干扰在一定程度上提升森林生态系统固碳能力, 而中度和严重火干扰分别使固碳速率下降 23.9% 和 38.0%。此阶段, 森林生态系统在碳固持方面具有积极作用, 加强火灾监测和防控可有效提升固碳能力, 保障区域生态环境的稳定与可持续发展。

关键词: 黑河市; 森林碳储量; CBM-CFS3 模型; 碳密度; 火干扰

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.05.013

Assessment of Carbon Stocks and Fire Disturbance Analysis of Forest Ecosystems in Heihe City

ZHAO Yuan¹, YU Ying^{1,2*}, FAN Wenyi^{1,2}

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management (Northeast Forestry University), Ministry of Education, Harbin 150040, China)

Abstract: Quantitative assessment of long-term carbon sequestration capacity in the forest ecosystem of Heihe City, Heilongjiang Province, analyzing forest fire disturbances impacts on carbon sink dynamics to inform China's 'Dual Carbon' goals. Based on dynamic monitoring data (2005, 2010, 2015) from 1 649 forest sample plots in Heihe City, combined with the Canadian Carbon Budget Model (CBM-CFS3) the carbon storage and carbon sink capacity of the forest ecosystem across multiple levels (aboveground, belowground, litter, deadwood, and soil carbon pools) during 2005, 2010, 2015 were evaluated on the basis of localized improvement of model parameters, and the impact of fire disturbances was also analyzed. Results indicated that across the measurement year (2005, 2010, 2015), the total ecosystem carbon density of Heihe's forests increased from 207.15 t C/hm² to 218.63 t C/hm², with a carbon sink of 531.54 t C. The frequency of forest fires decreased annually, and carbon-containing gas emissions in 2015 dropped by 60.3% compared to 2005. Using 2005 carbon sequestration patterns under fire disturbance as the baseline scenario, low-intensity fire disturbances slightly enhanced the carbon sequestration capacity of the forest ecosystem, while moderate and severe fire disturbances reduced the carbon sequestration rate by 23.9% and 38.0%, respectively. The forest ecosystem played a positive role in carbon sequestration during this period. Strengthening fire monitoring and prevention can effectively enhance carbon sequestration capacity, ensuring the stability and sustainable development of the regional ecological environment.

Keywords: Heihe City; forest carbon stock; CBM-CFS3 model; carbon density; fire disturbance

收稿日期: 2025-02-04

基金项目: 东北林业大学碳中和专项科学基金项目 (HFW220100054)。

第一作者简介: 赵圆, 硕士研究生。研究方向为林业遥感。E-mail: guyuyuanzy@163.com

***通信作者:** 于颖, 博士, 教授。研究方向为林业遥感。E-mail: yuying4458@163.com

引文格式: 赵圆, 于颖, 范文义. 黑河市森林生态系统碳汇估计及火干扰分析[J]. 森林工程, 2025, 41(5): 1000-1012.

ZHAO Y, YU Y, FAN W Y. Assessment of carbon stocks and fire disturbance analysis of forest ecosystems in Heihe City[J]. Forest Engineering, 2025, 41(5): 1000-1012.

0 引言

20世纪以来,人类活动加剧全球变暖。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布了《气候变化2023》^[1],报告指出人类活动排放的温室气体引起的气候变化,已经影响全球各个区域,未来全球升温进一步加剧。森林生态系统是陆地生态系统的主体,其碳汇功能在减缓温室气体体积上升等方面具有不可替代的作用^[2]。我国作为《巴黎协定》的缔约方之一,实现“碳达峰、碳中和”的“双碳”目标需要定量评估区域森林生态系统固碳能力^[3]。火干扰是森林碳汇动态变化的重要驱动因素,火灾燃烧森林植被,释放大量的碳到大气中,短期内使森林生态系统从碳汇转变为碳源,长期来看,火干扰后森林的恢复过程中,植被的生长和更新会吸收大气中的碳,重新成为碳汇,但恢复的速度和碳汇能力受到火干扰强度、森林类型等多种因素的影响^[3]。

森林碳储量碳汇评价方法有很多,不同的方法结果之间存在较大的差异^[4],不确定性较大^[5]。如刘磊等^[6]采用遥感估算法对伊春森林乔木层碳储量进行了估算和分析,但受云层干扰和光谱分辨率限制;Baietto等^[7]采用样地调查法研究乌拉圭的保护区稀树草原生态系统中不同组成部分的碳储量及其分配,这种方法应用广泛,操作简单,但受人力、物力和时间成本限制;吴朗清等^[8]基于InVEST与CA-Markov模型,分析并预测宝鸡市碳储量时空变化,但模型要求参数多,对输入数据的质量和准确性非常敏感。目前对于火干扰的相关研究很多,大多基于实地观测与实验,或者借助遥感和模型进行研究。Osei等^[9]基于实测样地,采用混合模型评估干扰类型、样地位置及其交互作用对枯木材料碳储量的影响。鉴于现有碳汇评价方法的局限以及火干扰对森林碳汇影响的复杂性,需更精准评估森林碳储量碳汇以及火干扰对其的影响。

本研究采用加拿大林业碳收支模型(carbon budget model of the canadian forest sector model, CBM-CFS3),该模型基于样地调查数据,满足联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)和《京都议定书》中的条例和要求,满足IPCC温室气体第3层次计量方法的要求,是IPCC推荐采用的碳计量模型。其可以直接获取森林生态系统各组分的信息,避免了遥感估算法中因遥感数据分辨率和精度限制以及模型模拟法中因模型参数不确定性带来的误差,使评价结果更具代表性和普遍性,同时模型需要参数较少,操作简便,能满足不同尺度森林生态系统碳汇计量需要。该模型可以设置火烧强度、火烧面积等,可以根据样地实际情况修改干扰矩阵,更准确

模拟不同火干扰情景下森林生态系统的碳循环过程。

本研究基于2005、2010、2015年3期森林调查数据,通过设置有火干扰和无火干扰的情景进行对比模拟,分析在火干扰后森林生态系统碳储量、碳汇能力等指标的变化情况。进一步对比不同火干扰强度下的模拟结果,以揭示火干扰对森林生态系统碳汇影响的规律,较为准确地评估森林碳储量碳汇以及火干扰对其影响,为森林生态系统的管理和碳汇研究提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑河市位于黑龙江省北部(47°42′—51°03′N, 124°45′—129°18′E),海拔160~800m,西北部为小兴安岭北麓山区,地势较高,中部为丘陵地带,东南部为沿江平原地区,使河流大多自西北向东南流淌,地貌以山地、丘陵、平原为主。该地区属寒温带大陆性季风气候,年均降水量为500~600mm,年均气温为-1.3~0.4℃,年蒸发量800~1200mm。土地利用类型以林地、耕地为主;土壤类型主要为地带性土壤(暗棕壤、黑土、黑钙土)和非地带性土壤(草甸土、沼泽土、火山灰土);森林植被类型主要为白桦林、柞树林、黑桦林、落叶松林、杨树林、阔叶混交林、针阔混交林和针叶混交林。

1.2 数据来源

数据来源于黑河市2005、2010和2015年森林动态调查样地数据,共1649个森林样地,单块样地面积为0.06hm²,调查了样地中每木胸径、树高,以及样地平均林龄、优势树种以及立地因子等数据。

1.3 数据处理

依据标准《森林资源规划设计调查技术规程》GB/T 26424—2010^[10],根据黑河市森林植被类型和优势树种将其分为白桦林、柞树林、黑桦林、落叶松人工林、落叶松天然林、杨树林、阔叶混交林、针阔混交林和针叶混交林9种林分类型。依照《中国立木材积表》^[11]中黑龙江省蓄积量方程和每木调查数据得到不同树木材积见表1—表3。

根据《森林立地分类划分技术规程》DB23/T 1747—2016^[12],将黑河市森林土壤,包括土壤腐殖质厚度、土壤枯枝落叶厚度,赋予权重,进行评分,根据评分结果划分为4个地力等级,以此得到不同地力等级见表4。

1.4 CBM-CFS3模型

CBM-CFS3模型基于森林清查与调查数据,模拟碳在活有机体与死亡有机质(DOM)碳库之间的转换^[13],以及不同森林管理、土地利用变化和干扰对森林蓄积与森林碳储量的影响。其计算原理是以林龄—

表1 2005年森林类型调查样地数据统计
Tab. 1 Statistics on forest type survey sample plots in 2005

森林类型 Stand types	林龄 /a Forest age		蓄积量 / (m ³ ·hm ⁻²) Standing stock		样本数 Sample size
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	最小值 Minimum	最大值 Maximum	
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	4	100	0.36	142.30	133
柞树林 <i>Quercus</i> forest	4	155	0.94	187.84	96
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	10	82	1.78	132.32	22
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	4	165	0.72	191.70	221
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> forest	9	65	0.16	116.66	24
杨树林 Poplar forest	5	53	0.56	161.57	19
针叶混交林 Mixed coniferous forest	16	33	32.9	69.80	4
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	18	49	12.90	143.62	19
落叶松天然林 <i>Larix gmelinii</i> natural forest	18	62	21.04	148.91	5

表2 2010年森林类型调查样地数据统计
Tab. 2 Statistics on forest type survey sample plots in 2010

森林类型 Stand types	林龄 /a Forest age		蓄积量 / (m ³ ·hm ⁻²) Standing stock		样本数 Sample size
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	最小值 Minimum	最大值 Maximum	
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	3	105	1.43	148.98	124
柞树林 <i>Quercus</i> forest	4	160	1.45	175.59	94
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	15	87	2.61	156.55	30
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	5	150	1.29	174.38	219
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> forest	5	70	0.24	113.84	30
杨树林 Poplar forest	1	60	0.56	188.59	22
针叶混交林 Mixed coniferous forest	21	38	57.80	94.49	4
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	7	54	4.56	166.28	23
落叶松天然林 <i>Larix gmelinii</i> natural forest	23	67	25.57	165.78	5

表 3 2015 年森林类型调查样地数据统计
Tab. 3 Statistics on forest type survey sample plots in 2015

森林类型 Stand types	林龄 /a Forest age		蓄积量 / (m ³ ·hm ⁻²) Standing stock		样本数 Sample size
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	最小值 Minimum	最大值 Maximum	
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	2	110	0.73	144.92	134
柞树林 <i>Quercus</i> forest	4	150	2.26	183.61	106
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	10	100	6.12	211.63	25
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	2	165	1.06	178.92	201
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> forest	3	60	1.05	133.80	23
杨树林 Poplar forest	4	55	0.54	158.24	24
针叶混交林 Mixed coniferous forest	6	41	1.37	97.68	7
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	7	59	3.14	185.69	15
落叶松天然林 <i>Larix gmelinii</i> natural forest	15	92	36.49	185.30	20

表 4 森林土壤地力等级
Tab. 4 Soil fertility grades of forests

土壤地力等级 Soil fertility grade	腐殖质厚度/cm Humus thickness	枯枝落叶厚度/cm Litter thickness
1	>20	≥10
2	10-19	≥10
3	>10	<10
4	<10	≤10

蓄积生长方程为驱动方程,对样地碳密度进行计算,模型碳库包含生物量和死有机质(dead organic matter, DOM)两大碳库系统^[14],生物量碳库分为地上生物量(包含树干、树枝、树叶子库)和地下生物量子库(根系碳库),DOM 碳库由枯落物、枯死木及土壤碳库组成。不同森林类型、不同强度的火灾排放因子和燃烧效率不同,含碳气体排放不同^[15],火灾强度越大,二氧化碳排放量往往越多。同时,燃烧不充分时,一氧化碳(CO)排放也会显著增加。通过模型评估温室气体(CO₂、CO、CH₄)排放的际年变化,来了解火灾对于碳库的影响。火灾火干扰还会深刻改变生态系统碳循环。

1.5 CBM-CFS3 模型参数本土化

1.5.1 林分生长参数估算

根据林分类型和地力等级分别选取 Richards 方程、Logistic 方程和 Korf 方程构建合适的蓄积-林龄生长方程,方程的基本形式分别为

$$y = A(1 - \exp(-kt))^B \quad (1)$$

$$y = A / (1 + B \cdot \exp(-kt)) \quad (2)$$

$$y = A \cdot \exp(-Bt^k) \quad (3)$$

式中:A为蓄积生长的最大值,m³/hm²;B为与初始值有关的参数;k为蓄积生长速率;t为林龄,a。

随机选取 80% 样地用于建模,剩下 20% 样地用于模型验证。通过检验统计量决定系数(R²)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、预测误差的标准差(SDE)来评价模型,将预估精度(P)作为模型自检指标,筛选出拟合最优的生长方程。

1.5.2 蓄积-干材生物量和各生物组分所占比例估算

模型采用幂函数对干材生物量和林分材积进行拟合,其拟合参数和各组分生物量采用研究成果^[16],结合多元 Logistics 回归模型估算各组分所占总生物量的比例,拟合出适合本区域的参数。其公式为

$$P_1 = \frac{1}{1 + e^{a_1 + a_2 \times V + a_3 \times \ln(V+5)} + e^{b_1 + b_2 \times V + b_3 \times \ln(V+5)} + e^{c_1 + c_2 \times V + c_3 \times \ln(V+5)}} \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{e^{a_1 + a_2 \times V + a_3 \times \ln(V+5)}}{1 + e^{a_1 + a_2 \times V + a_3 \times \ln(V+5)} + e^{b_1 + b_2 \times V + b_3 \times \ln(V+5)} + e^{c_1 + c_2 \times V + c_3 \times \ln(V+5)}} \quad (5)$$

$$P_3 = \frac{e^{b_1 + b_2 \times V + b_3 \times \ln(V+5)}}{1 + e^{a_1 + a_2 \times V + a_3 \times \ln(V+5)} + e^{b_1 + b_2 \times V + b_3 \times \ln(V+5)} + e^{c_1 + c_2 \times V + c_3 \times \ln(V+5)}} \quad (6)$$

$$P_4 = \frac{e^{c_1 + c_2 \times V + c_3 \times \ln(V+5)}}{1 + e^{a_1 + a_2 \times V + a_3 \times \ln(V+5)} + e^{b_1 + b_2 \times V + b_3 \times \ln(V+5)} + e^{c_1 + c_2 \times V + c_3 \times \ln(V+5)}} \quad (7)$$

式中： P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 分别表示树干、树皮、树枝、树叶占地上生物量的比例； V 表示单位面积的蓄积量， m^3/hm^2 ； a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 为模型参数。

1.5.3 周转参数估算

研究根据已有文献,对模型需要的生物量周转参数和DOM分解参数进行本土化改进。根据赵佳宁等^[17]对森林细根周转的研究,周涛等^[18]国家尺度上的碳库周转参数,整理出适合黑河市的细根周转参数和叶茎周转率,通过黄锦学等^[19]和Smith等^[20]对DOM分解过程的研究,修改模型中死有机质分解速率相关参数。

1.5.4 干扰模拟设置

模型将火干扰定义为林分替代性干扰,即火灾导致地上林木全部死亡(死亡率>95%)。为量化火干扰对黑河市森林生态系统碳储量的影响,基于研究数据构建4种干扰情景:1)完全无干扰情景,干扰设置为自然演替;2)火灾轻度干扰情景,干扰设置为通用死亡率10%;3)火灾中等干扰情景,干扰设置为通用死亡率20%;4)火灾严重干扰情景,干扰设置为通用死亡率30%,样地具体受到火干扰情况见表5,以2005火灾发生样地情况为基准,之后10年不再发生干扰后,估测其森林生态系统碳汇,单位时间的碳储量变化为固碳速率。

表5 取样地火灾灾级和涉及样地数

Tab. 5 Fire hazard level and number of sample plots involved in the sample plots

年份 Year	火灾等级 Fire rating			干扰样地比例/% Proportion of disturbed sample plots
	轻微 Light-intensity fire	严重 High-intensity fire	中等 Moderate-intensity fire	
2005	119	43	74	43.5
2010	97	28	45	30.9
2015	41	25	29	17.1

2 结果与分析

2.1 蓄积量-林龄生长方程

林分蓄积量受林分特征、立地条件等多种因素交互影响,仅依林分类型构建蓄积量-林龄生长方程,精度欠佳。以针阔混交林为例,Korf方程拟合相关系数 R^2 仅0.479,如图1所示。鉴于黑河市森林生态系统土壤特征,划分出4个地力等级。处理后,针阔混交林各地力等级的 R^2 可达0.775以上,显著提升了林分蓄积量-林龄方程拟合精度。

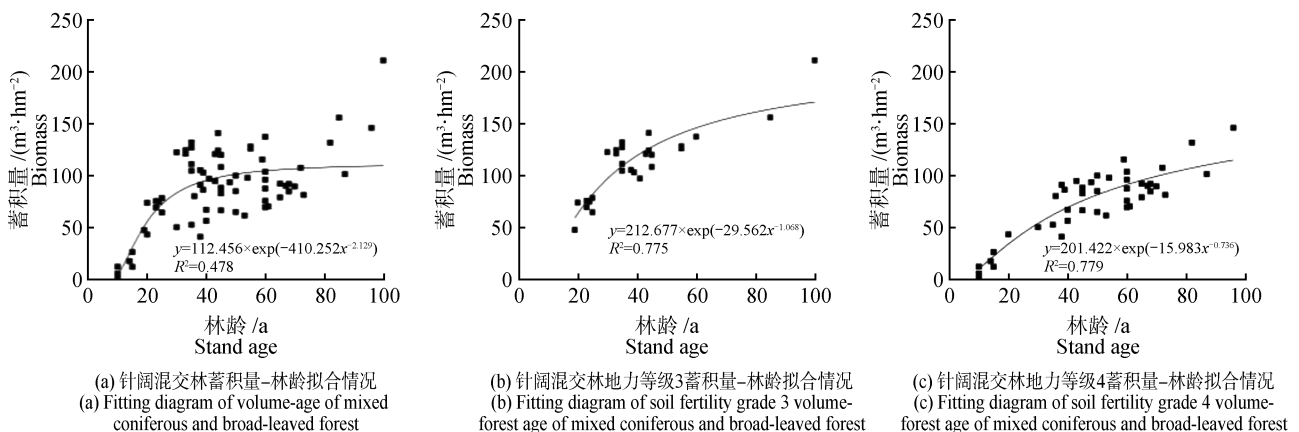


图1 针阔混交林蓄积量-林龄生长方程

Fig. 1 Biomass-stand age growth equation of coniferous and broad-leaved mixed forest

对不同林分类型采用 3 种模型拟合蓄积量-林龄生长方程,选取拟合效果最好的模型见表 6,各相关系数均达到 0.670 以上,且各方程参数均顺利通过检验,

整体拟合效果理想,这些方程能够较为精准地模拟研究区域内林分的生长态势。

表 6 黑河市各林分类型最优生长方程
Tab. 6 The optimal growth equations of various forest stand types in Heihe City

林分类型 Stand types	地力等级 Soil fertility grade	模型 Model	参数 Parameters			R^2	RMSE	SDE	MAE	P
			A	B	k					
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	1	Richards	187.196	1.111	0.014	0.853	9.903	10.276	7.324	0.859
	2	Richards	171.890	1.660	0.022	0.782	14.988	15.147	11.962	0.730
	3	Richards	160.223	1.928	0.022	0.670	19.037	19.075	15.662	0.588
	4	Richards	160.797	2.455	0.026	0.785	14.886	14.982	12.360	0.549
柞树林 <i>Quercus</i> forest	1	Logistic	183.562	9.531	0.119	0.872	8.840	9.450	6.303	0.941
	2	Richards	169.123	2.467	0.048	0.786	12.627	12.859	9.267	0.920
	3	Richards	275.327	1.144	0.011	0.937	8.342	8.414	6.832	0.929
	4	Richards	210.819	1.079	0.008	0.815	17.933	17.977	14.563	0.659
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> forest	3	Logistic	155.968	11.924	0.034	0.746	13.416	13.530	11.152	0.620
	4	Logistic	261.386	66.256	0.066	0.763	17.619	18.103	13.033	0.625
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	1	Korf	212.746	76.945	1.168	0.831	15.456	15.756	12.753	0.737
	3	Korf	379.736	38.139	1.017	0.943	9.837	10.122	5.308	0.949
	4	Logistic	238.291	27.134	0.142	0.959	12.339	12.840	9.271	0.873
落叶松天然林 <i>Larix gmelinii</i> natural forest	1	Korf	175.484	860.719	2.322	0.958	8.865	9.477	6.826	0.957
	3	Logistic	156.918	32.430	0.109	0.983	5.711	6.105	4.376	0.922
	4	Logistic	70.592	57.468	0.115	0.741	8.283	8.596	6.366	0.872
杨树林 <i>Populus</i> forest	3	Logistic	96.451	21.148	0.158	0.813	15.361	15.542	13.013	0.685
	4	Korf	252.133	32.169	1.011	0.842	19.225	19.677	14.168	0.718
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	1	Logistic	156.142	3.188	0.060	0.754	14.368	14.434	11.831	0.886
	2	Richards	151.244	1.614	0.033	0.888	6.607	6.637	5.202	0.944
	3	Richards	137.274	1.452	0.027	0.899	6.490	6.513	5.211	0.931
	4	Richards	103.881	1.422	0.021	0.705	12.581	12.603	10.312	0.694
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	3	Korf	212.677	29.562	1.068	0.775	15.607	16.012	13.484	0.883
	4	Korf	201.422	15.983	0.736	0.779	15.027	15.213	12.898	0.776
针叶混交林 Mixed coniferous forest	3	Logistic	318.768	89.020	0.142	0.973	12.439	13.383	10.286	0.650
	4	Richards	109.685	3.072	0.068	0.944	6.004	6.417	5.163	0.856

不同林分在不同立地等级下所对应的拟合方程存在显著差异,如落叶松天然林地力等级 3 所对应的模型决定系数 R^2 最大,达 0.983;白桦林地力等级 3 对应的 R^2 最小,为 0.670,这有力地印证了我国森林蓄积量与森林类型、立地质量之间紧密的关联性,为深入理解森林生态系统的内在规律提供了有力的实证依据。

2.2 生物量组分比例参数

依据式(4)一式(7),对树皮、树枝、树叶组分生物量比例参数进行拟合,方程拟合结果见表 7—表 9。

为进一步验证模型精度,采用残差偏差(residual deviance, RD)和赤池信息准则(akaïke information criterion, AIC)作为评价指标,其数值越小,则模型拟合效

表7 不同森林植被类型的树皮生物量比例参数
Tab. 7 Bark biomass proportion parameters of different forest vegetation types

林分类型 Stand types	系数 Coefficient			R^2	RD	AIC
	a_1	a_2	a_3			
柞树林 <i>Quercus</i> forest	-1.946 202	-0.000 001	0.000 087	0.730	337.763 0	355.763 0
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	-2.304 536	0.000 015	0.000 092	0.763	133.858 4	151.858 4
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	-1.792 976	-0.000 005	0.000 376	0.702	1 188.090 0	1 206.090 0
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> forest	-1.100 761	-0.000 026	0.000 870	0.794	119.737 3	137.737 3
杨树林 <i>Populus</i> forest	-1.732 339	0.000 018	-0.000 909	0.803	96.840 9	114.840 9
针叶混交林 Mixed coniferous forest	-1.063 396	0.000 184	-0.012 105	0.867	32.600 7	50.600 7
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	-0.847 847	-0.000 022	0.000 603	0.843	93.740 1	111.740 1
落叶松天然林 <i>Larix gmelinii</i> natural forest	0.421 875	0.004 628	-0.383 908	0.814	48.992 6	66.992 6
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	-1.609 395	0.000 000	-0.000 016	0.722	729.587 2	747.587 2

表8 不同森林植被类型的树枝生物量比例参数
Tab. 8 Tree branch biomass proportion parameters of different forest vegetation types

林分类型 Stand types	系数 Coefficient			R^2	RD	AIC
	b_1	b_2	b_3			
柞树林 <i>Quercus</i> forest	-1.354 105	0.005 514	-1.076 800	0.730	337.763 0	355.763 0
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	-1.753 086	-0.000 032	0.023 532	0.763 0	133.858 4	151.858 4
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	-2.665 424	-0.001 085	0.307 126	0.702	1 188.090 0	1 206.090 0
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> forest	2.081 681	0.030 402	-2.250 472	0.794	119.737 3	137.737 3
杨树林 <i>Populus</i> forest	-1.682 111	0.000 118	-0.012 945	0.803	96.840 9	114.840 9
针叶混交林 Mixed coniferous forest	-1.615 621	-0.000 280	0.041 412	0.867	32.600 7	50.600 7
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	-3.094 558	-0.009 088	1.612 133	0.843	93.740 1	111.740 1
落叶松天然林 <i>Larix gmelinii</i> natural forest	-1.482 495	0.002 746	0.863 669	0.814	48.992 6	66.992 6
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	-2.804 232	-0.002 282	0.361 582	0.722	729.587 2	747.587 2

表 9 不同森林植被类型的树叶生物量比例参数
Tab. 9 Leaf biomass proportion parameters of different forest vegetation types

林分类型 Stand types	系数 Coefficient			R^2	RD	AIC
	c_1	c_2	c_3			
柞树林 <i>Quercus</i> forest	-2.474 698	0.000 375	-0.102 386	0.730	337.763 0	355.763 0
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	-1.292 435	0.001 054	-0.290 428	0.763	133.858 4	151.858 4
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	-2.398 589	0.000 561	-0.123 583	0.702	1 188.090 0	1 206.090 0
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> forest	-2.396 691	0.000 609	-0.080 033	0.794	119.737 3	137.737 3
杨树林 <i>Populus</i> forest	-4.913 178	-0.009 903	1.722 020	0.803	96.840 9	114.840 9
针叶混交林 Mixed coniferous forest	-0.995 931	0.001 338	-0.321 289	0.867	32.600 7	50.600 7
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	-2.073 304	-0.007 644	1.137 926	0.843	93.740 1	111.740 1
落叶松天然林 <i>Larix gmelinii</i> natural forest	-0.638 918	0.005 992	0.322 038	0.814	48.992 6	66.992 6
白桦林 <i>Bella platyphylla</i> forest	-3.265 876	-0.000 694	0.099 270	0.722	729.587 2	747.587 2

果越佳。由表7—表9可知,所有方程的决定系数 R^2 均在 0.702 以上($P < 0.05$),均达到显著水平,对数据的拟合较好,一定程度上能够解释生物量比例的变化情况,但不同林分类型的生物量比例参数有较大差异,如针叶林、阔叶林和混交林的参数差异明显;同一林分类型下,各组分生物量所占比例也有所不同,如杨树林树叶生物量比例参数与其他部位差异较大,说明杨树林树叶生物量的影响因素与树皮、树枝不同。

2.3 森林生态系统总碳储量与碳密度

综合各年份不同森林生态系统碳密度见表 10,由表 10 可知,杨树林总生态系统碳密度相对较小,2010 年达到最大值,为 150.84 t C/hm²,是同年针阔混交林总生态系统碳密度的 0.53 倍,与同年其他阔叶林种总生态系统碳密度而言,存在明显差距,远低于其他阔叶林种。针叶林的碳密度相对较高。

表 10 2005、2010、2015 年黑河市森林不同林分类型总生态系统碳密度状况

Tab. 10 The total ecosystem carbon density of different forest stand types in Heihe City from 2005, 2010, 2015

林分类型 Stand types	碳密度/(t C·hm ⁻²) Carbon density		
	2005	2010	2015
白桦林 <i>Bella platyphylla</i> forest	213.40	211.24	213.77
柞树林 <i>Quercus</i> forest	266.90	262.96	314.20
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	170.07	286.07	295.05
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	263.77	268.94	271.27
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> forest	229.86	237.71	250.55
杨树林 <i>Populus</i> forest	149.21	150.84	142.89
针叶混交林 Mixed coniferous forest	275.90	241.62	224.68
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	238.08	181.69	253.91
落叶松天然林 <i>Larix gmelinii</i> natural forest	322.11	203.55	217.59

2.4 不同林龄各森林植被类型碳储量密度
黑河市各森林类型碳储量密度随林龄增长呈现上

升趋势,于成熟林及过熟林阶段达到峰值,以2005年林分类型生物量碳密度状况为例,如图2所示。

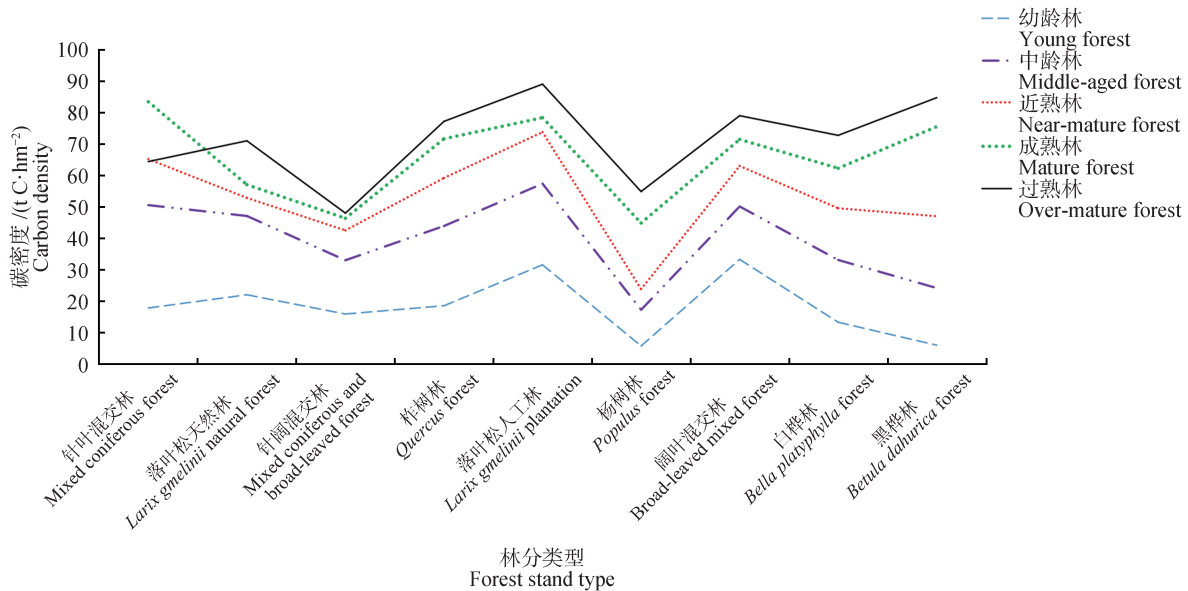


图2 2005年黑河市主要森林类型碳储量密度

Fig. 2 Biomass carbon densities of main forest types in Heihe City in 2005

2.5 碳密度分配特征

在林分类型中,碳库主要分为生物量碳库和死有机质(DOM)碳库,二者碳密度特征各异,如图3所示。进一步计算研究发现,每个林分类型中,DOM碳库是其总碳库(生物量碳库+DOM碳库)的主要组成部分:杨树林中DOM碳库占比高达97.6%,柞树林中占78.6%;而在各自的DOM碳库内部,土壤碳库所占比重最大:针叶混交林中土壤碳库占其DOM碳库的57.7%,杨树林中则占62.1%。

就生物量碳库而言,除柞树林树根碳密度占据第二大外,其余各林分类型碳密度从大到小依次为树干、树枝、树根、树叶。其中,树干碳密度最大,占比范围

为:落叶松天然林44.6%,柞树林64.6%。

2.6 森林火灾含碳气体排放

2005、2010、2015年每年火灾强度和受灾数量都在下降,因火灾引起含碳气体排放量也在逐年下降,见表11,2015年较2005年总排放量同比下降60.3%。2005、2010、2015年黑河市因火灾引起的含碳气体排放量分别为268.76、194.63、106.80 t。随着时间的流逝,固碳速率均有所下降,如图4所示。不同强度火干扰固碳速率变化幅度不同,以2005年为例,相较未经干扰的固碳速率,严重干扰的固碳速率显著下降38.0%;中等干扰的固碳速率下降23.9%;轻微火干扰的固碳能力有短暂提升。

表11 2005、2010、2015年黑河市因火灾引起的含碳气体排放

Tab. 11 Carbon-containing gas emissions caused by fires in Heihe City from 2005, 2010, 2015

t C

年份 Year	生物量碳库 Biomass carbon pool			死有机质碳库 DOM carbon pool			总排放量 Total emissions
	CO ₂	CO	CH ₄	CO ₂	CO	CH ₄	
2005	2.69	0.27	0.03	244.84	18.69	2.25	268.76
2010	1.94	0.19	0.00	176.81	14.00	1.69	194.63
2015	1.08	0.11	0.00	98.17	6.57	0.87	106.80

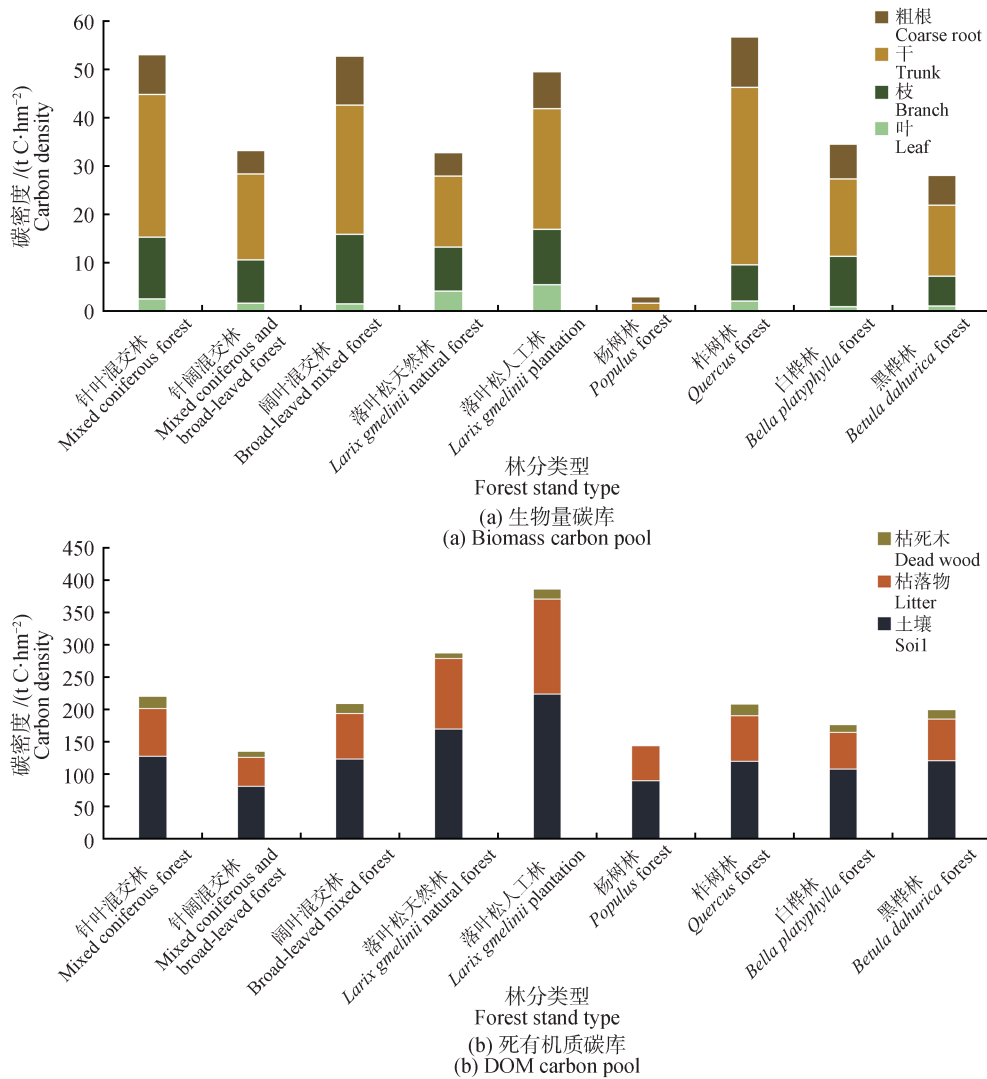


图 3 2005 年黑河市各林分类型碳库组分碳密度

Fig. 3 Carbon density of different stand types in Heihe City in 2005

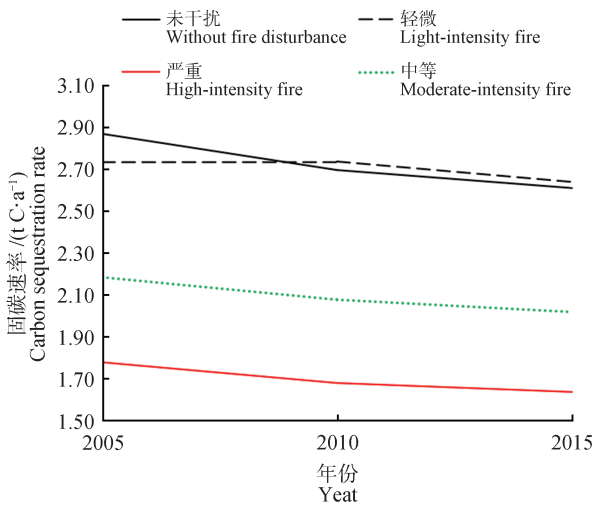


图 4 黑河市森林生态系统固碳速率变化

Fig. 4 Changes of carbon sequestration rate of forest ecosystem in Heihe City

3 讨论

3.1 森林生态系统碳储量和碳密度

森林生产力与蓄积量紧密相关^[21],不同立地质量下森林蓄积量会存在差异^[22]。为提高拟合精度,根据林分类型和地力等级构建生长方程,参考已有文献调整出适合本区域的参数,得到本区域碳储量和碳密度。

2005、2010、2015 年森林植被不断增长,树木胸径和树高增加,生物量持续积累,并且火干扰强度和频次都在减少,研究期间可能加强了森林保护措施,为林分生长创造了有利的条件,因此黑河市森林生态系统碳储量逐年增长,呈现出碳汇。2005 年研究区森林生物量碳储量为 6 748. 80 t C,2010 年为 6 911. 84 t C,2015 年为 7 280. 34 t C,碳汇量为 531. 54 t C,固碳速率为 1. 148 t C/a。各碳库的碳密度由大到小排序(除柞树林

外)呈现出树干、树枝、树根、树叶的特征,这和付甜^[23]、章敏等^[24]的研究结果一致。而杨树林碳密度偏低,其原因可能是:杨树生长快,叶片更新频繁,可能导致地上部分碳不断被分解,难以长期固存^[25]。调查样地的杨树林平均年龄35岁,碳储量密度还没有达到峰值;杨树林样本数较少,2005年有19块样地,其中受到火灾干扰的占52.6%,而杨树树皮薄,抗火性弱,受到火灾干扰影响较大。不同林分类型的碳密度不同,正如和娴越等^[26]探讨中亚热带地区典型森林生态系统的水源涵养能力,不同植被类型对水文调节功能不同。

蔡慧颖^[27]对小兴安岭森林碳储量的研究指出,白桦林和落叶松人工林的碳密度分别为287.53 t C/hm²和222.06 t C/hm²。肖湘等^[28]对小兴安岭北部地区森林生态系统的研究指出,该区域碳密度主要集中在250~300 t C/hm²,和本研究的研究结果相接近。使用CBM-CFS3模型估测黑河市森林生态系统碳密度较为科学合理。

3.2 火灾引起的含碳气体排放

2005、2010、2015年黑河市火灾强度与含碳气体排放量的显著降低(60.3%),表明区域林火管理有效抑制高强度火灾事件,这一趋势与刘志华等^[29]提出防火体系优化可以降低碳排放结论一致,但进一步揭示了区域管理的差异性:黑河市森林以天然林为主,火灾以轻微火为主,2005年轻微火干扰占比50.4%,根据森林类型和区域特征,制定碳排放控制化策略,以实现减排成本最小化与生态效益最大化。

火灾导致部分植物死亡,但是轻微火灾可以更新林分,增加森林植被碳储量,从而让植被固碳速率增加^[30-31]。不同火灾强度干扰对森林影响不同,火灾强度的大小可以影响到含碳气体的排放和碳库的转移量。研究显示,轻微火灾虽然短期内促进林分更新提升固碳速率(增幅约8%),但长期固碳能力随着生态系统恢复周期延长而下降,甚至低于未受干扰区域,中等强度和严重强度的火灾破坏性大,火灾强度还会影响固碳速率。这和张玥^[32]、Bo等^[33]的研究结果一致。屈红军等^[34]评估大兴安岭森林火灾后不同生态系统的碳储量动态,研究发现重度火烧导致碳储量下降42%(落叶松林)至58%(白桦林),轻度火烧仅下降12%~15%。因此在森林火灾防控方面,应继续加强防火措施,维持并进一步降低火灾强度和频率,以减少含碳气体排放。在森林生态系统管理上,可借鉴轻微火灾能促进固碳的特性,结合合理规划森林经营活动,正如Gao等^[35]提出的“碳健康阈值”,通过适度的人为干扰(如低强度的计划烧除)来促进森林更新^[36],提升森

林固碳能力。同时,未来研究可深入探讨不同干扰强度下森林生态系统的长期响应机制,以及如何优化森林管理措施,实现森林碳储量的稳定增加和含碳气体的有效减排。

4 结论

本研究基于2005、2010、2015年3期调查数据,使用加拿大碳收支模型(CBM-CFS3)模型,在模型参数本土化改进后估算黑河市森林生态系统不同碳库碳储量,并揭示火灾干扰梯度下碳储量的响应规律及关键树种的碳分配特征:不同林分类型森林碳密度显著不同,同一林分类型下不同林龄也具有差异,成熟期碳积累达峰值;轻微火灾会提升森林生态系统固碳能力,而中度和严重火灾干扰分别使固碳速率产生明显的下降。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Climate Change 2023: Report Synthesis. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R/OL]. Geneva: IPCC, 2023. [2024-07-01].
- [2] 吕浩,彭春良,吴惠俐,等. 森林生态系统不同碳库碳储量估算方法综述[J]. 湖南林业科技, 2022, 49(6): 90-98.
LYU H, PENG C L, WU H L, et al. A review of methods to estimate carbon storage of forest ecosystems [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2022, 49(6): 90-98.
- [3] 韩春兰,邵帅,王秋兵,等. 兴安落叶松林火灾干扰后土壤有机碳含量变化[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 3023-3033.
HAN C L, SHAO S, WANG Q B, et al. The variability of soil organic carbon content in *Larix gmelinii* forests after fire disturbances [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 3023-3033.
- [4] GUO Z, FANG J, PAN Y, et al. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 259(7): 1225-1231.
- [5] WANG J, FENG L, PALMER P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data [J]. Nature, 2020, 586(7831): 720-723.
- [6] 刘磊,贾炜玮,张小勇,等. 北方森林乔木层碳储量的估计及空间分析[J]. 森林工程, 2024, 40(4): 137-149.
LIU L, JIA W W, ZHANG X Y, et al. Estimation and spatial analysis of carbon storage in tree layers of northern forests [J]. Forest Engineering, 2024, 40(4): 137-149.
- [7] BAIETTO A, HIRIGOYEN A, TORANZA C, et al. Carbon stock estimation in halophytic wooded savannas of Uruguay: An ecosystem approach [J]. Forest Ecosystems,

- 2024, 11(4): 100216.
- [8] 吴朗清, 陈荣清. 基于 InVEST 与 CA-Markov 模型的生态系统碳储量时空演变及预测——以陕西宝鸡为例[J]. 上海国土资源, 2024, 45(4): 79-86.
- WU L Q, CHEN R Q. Spatial and temporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage combining InVEST and CA-Markov model: A case study of Baoji, Shanxi Province [J]. Shanghai Land & Resources, 2024, 45 (4) : 79-86.
- [9] OSEI R, MOORE P L, ODELL A R, et al. Fire and retention island remnants have similar deadwood carbon stock a decade after disturbances in boreal forests of Alberta [J]. Forest Ecosystems, 2024, 11 : 100225.
- [10] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 森林资源规划设计调查技术规程: GB/T 26424—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical regulations for inventory for forest management planning and design: GB/T 26424—2010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [11] 刘琪璟. 中国立木材积表[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.
- LIU Q J. Standing tree volume tables of China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017.
- [12] 黑龙江省质量技术监督局. 森林立地分类划分技术规程: DB23/T 1747—2016[S]. 哈尔滨: 黑龙江省质量技术监督局, 2016.
- Heilongjiang Bureau of Quality Supervision. Technical regulation for forest site classification and division: DB23/T 1747—2016 [S]. Harbin: Heilongjiang Bureau of Quality Supervision, 2016.
- [13] KURZ W, DYMOND C, WHITE T, et al. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards [J]. Ecological Modelling, 2008, 220(4): 480-504.
- [14] 冯源, 付甜, 朱建华, 等. 加拿大碳收支模型(CBM-CFS3)原理、结构及应用[J]. 世界林业研究, 2014, 27(3): 87-91.
- FENG Y, FU T, ZHU J H, et al. Principle, structure and application of carbon budget model (CBM-CFS3) in Canada [J]. World Forestry Research, 2014, 27 (3) : 87-91.
- [15] 刘志华, 贺红土, 徐文茹, 等. 林火碳排放的影响与减缓对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(10): 1552-1560.
- LIU Z H, HE H S, XU W R, et al. Impacts of forest fire carbon emission and mitigation strategies [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(10): 1552-1560.
- [16] 董利虎. 东北林区主要树种及林分类型生物量模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- DONG L H. Study on biomass models of main tree species and forest types in northeast forest region [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [17] 赵佳宁, 梁韵, 柳莹, 等. 森林生态系统细根周转规律及影响因素[J]. 植物学报, 2020, 55(3): 308-317.
- ZHAO J N, LIANG Y, LIU Y, et al. Patterns and influence factors of fine root turnover in forest ecosystems [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2020, 55(3): 308-317.
- [18] 周涛, 史培军, 贾根锁, 等. 中国森林生态系统碳周转时间的空间格局[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(5): 632-644.
- ZHOU T, SHI P J, JIA G S, et al. Spatial patterns of carbon turnover time in Chinese forest ecosystems [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2010, 40(5): 632-644.
- [19] 黄锦学, 黄李梅, 林智超, 等. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(3): 56-63.
- HUANG J X, HUANG L M, LIN Z C, et al. Controlling factors of litter decomposition rate in China's forests [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010, 5(3): 56-63.
- [20] SMITH C E, TROFYMOW J A, KURZ W A, et al. Decreasing uncertainty in CBM-CFS3 estimates of forest soil carbon sources and sinks through use of long-term data from the Canadian Intersite Decomposition experiment [R]. Victoria: Canadian Forest Service, BC-X-422, 2009.
- [21] GREN A M, AMUAKWA-MENSAH F. Estimating economic value of site quality for uncertain ecosystem service provision in Swedish forests [J]. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2018, 14(1): 117-126.
- [22] CAROLINE B, LABELLE E R, LUSSIER J M. Influence of tree, stand, and site attributes on hardwood product yield: Insights into the Acadian forests [J]. Forests, 2023, 14(2): 182-182.
- [23] 付甜. 基于 CBM-CFS3 模型的三峡库区主要森林生态系统碳计量[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- FU T. Carbon accounting of major forest ecosystems in the Three Gorges Reservoir Area based on the CBM-CFS3 model [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [24] 章敏, 王健, 韩天一, 等. 基于 CBM-CFS3 模型的马尾松林碳密度特征及其影响因素[J]. 林业资源管理, 2022(6): 44-53.
- ZHANG M, WANG J, HAN T Y, et al. Characteristics of carbon density and its influencing factors of *Pinus masso-*

- niana* forest based on CBM-CFS3 model [J]. *Forest Resources Management*, 2022(6): 44-53.
- [25] 刘诗琦, 辛建华, 贾黎明, 等. 山东菏泽杨树人工林碳储量和碳贮库特征[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(4): 1-4.
- LIU S Q, XIN J H, JIA L M, et al. Carbon storage and characteristics of carbon pool of poplar plantations in Heze, Shandong Province, China [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(4): 1-4.
- [26] 和娴越, 赵洋毅, 王克勤, 等. 中亚热带典型森林生态系统水源涵养功能[J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(8): 77-82.
- HE X Y, ZHAO Y Y, WANG K Q, et al. Water conservation function of typical subtropical forest ecosystem [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(8), 77-82.
- [27] 蔡慧颖. 小兴安岭典型森林生态系统的碳储量与生产力[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- CAI H Y. Carbon storage and productivity of typical forest ecosystems in Xiaoxing'an Mountains [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [28] 肖湘, 王西峰, 范文义, 等. 黑龙江省区小兴安岭森林生态系统碳密度遥感估算[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(4): 127-130.
- XIAO X, WANG X F, FAN W Y, et al. Remote sensing estimation of carbon density in forest ecosystems of Xiaoxing'an Mountains, Heilongjiang Province [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(4): 127-130.
- [29] 刘志华, 贺红士, 徐文茹, 等. 林火碳排放的影响与减缓对策[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(10): 1552-1560.
- LIU Z H, HE H S, XU W R, et al. Impacts of forest fire carbon emission and mitigation strategies [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(10): 1552-1560.
- [30] 魏书精. 黑龙江省森林火灾碳排放定量评价方法研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- WEI S J. Research on quantitative evaluation method of forest fire carbon emissions in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [31] MAESTRINI B, ALVEY E C, HURTEAU M D, et al. Fire severity alters the distribution of pyrogenic carbon stocks across ecosystem pools in a Californian mixed-conifer forest [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(9): 2338-2355.
- [32] 张玥. 基于GIS的黑河市森林碳储量空间分布特征研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- ZHANG Y. Research on the spatial distribution characteristics of forest carbon storage in Heihe City based on GIS [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [33] BO Z, PHILIPPE C, FREDERIC C, et al. Record-high CO₂ emissions from boreal fires in 2021 [J]. *Science*, 2023, 379(6635): 912-917.
- [34] 屈红军, 孙晓新. 大兴安岭过火区不同森林生态系统碳储量的变化[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(1): 112-116.
- QU H J, SUN X X. Changes of carbon storage of forest ecosystems in "5.6" forest fire area in Daxing'an Mountains [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(1): 112-116.
- [35] GAO Y, YU G, HE N. Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles: Advocating a health threshold for carbon storage [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 366-374.
- [36] 范英英. 基于碳排放总量控制的低碳经济发展优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- FAN Y Y. Research on optimization model of low-carbon economic development based on total carbon emission control [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.