

气候变化、林火和采伐对大兴安岭森林碳储量的影响

黄超¹ 贺红士^{2,3*} 梁宇¹ 吴志伟⁴

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; ²东北师范大学地理科学学院, 长春 130024;

³美国密苏里大学, 美国哥伦比亚 65201; ⁴江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330027)

摘要 大兴安岭林区林火发生的频率受气候变化的影响将会增加, 可能会增加该地区森林生态系统碳损失。本研究通过耦合森林生态系统模型和森林景观模型以模拟未来百年大兴安岭森林碳储量动态变化, 量化气候变化、林火和采伐对森林碳储量的影响。结果表明: 虽然采伐和林火会抵消相当一部分由气候变化增加的碳储量, 但气候变化仍然能够增加大兴安岭森林碳储量。未来 100 年该地区森林地上和土壤有机碳储量将会分别增加 9%~22% 和 6%~9%。短期(0~20 年) 气候变化对大兴安岭森林碳储量的影响大于同期林火的影响, 中期(30~50 年) 和长期(60~100 年) 气候变化对森林碳储量的影响小于林火和采伐的影响。由于未来大兴安岭地区气候变化及其林火干扰存在不确定性, 导致未来该地区森林碳储量存在较大的不确定性。未来 100 年大兴安岭森林地上碳储量和土壤有机碳储量不确定性分别为 12.4%~16.2% 和 6.6%~10.4%。为准确估算我国北方森林生态系统碳储量, 需要考虑种子传播、林火和采伐的影响。

关键词 气候变化; 干扰; 北方森林; 碳储量; 模型耦合

Effects of climate change, fire and harvest on carbon storage of boreal forests in the Great Xing'an Mountains, China. HUANG Chao¹, HE Hong-shi^{2,3*}, LIANG Yu¹, WU Zhi-wei⁴
(¹CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; ³University of Missouri, Columbia 65201, USA; ⁴School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China).

Abstract: Climate change will increase the frequency of fire disturbances, which may further exacerbate carbon loss from boreal forests in the Great Xing'an Mountains, China. In this study, we coupled forest ecosystem and forest landscape models to simulate the dynamics of boreal forest carbon storage in the next 100 years. We quantified the effects of climate change, fire and harvest on carbon storage of boreal forests. The results showed that climate change would increase carbon storage of boreal forests in the Great Xing'an Mountains, even if fire and harvest could partially offset such changes. Aboveground and soil organic carbon storage would increase by 9%–22% and 6%–9% in the next 100 years. In the short-term (0–20 years), the effects of climate change on carbon storage was stronger than fire. The effects of climate change on boreal forest carbon storage were less than fire and harvest in medium (30–50 years) and long-term (60–100 years). The variability of climate change and fire disturbance in the Great Xing'an Mountains caused high uncertainty of the future boreal forest carbon storage. The uncertainties of aboveground and soil organic carbon of boreal forests in the Great Xing'an Mountains were 12.4%–16.2% and 6.6%–10.4% in the next 100 years. The effects of seed dispersal, fire and harvest should be taken account for accurate estimation of carbon storage in Chinese boreal forests.

Key words: climate change; disturbance; boreal forest; carbon storage; model coupling.

本文由国家重点研发计划项目(2016YFA0600804)和国家自然科学基金项目(31570461, 31570462)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFA0600804) and the National Natural Science Foundation of China (31570461, 31570462). 2018-03-26 Received, 2018-05-17 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: heh@missouri.edu

北方森林(寒温带森林)位于北半球中高纬度(45—70° N),约占全球森林总面积的1/3,碳储量占全球森林总碳储量的32%^[1],对维持全球陆地生态系统碳平衡发挥着重要作用^[2-3]。中国北方森林主要分布在大兴安岭地区,总面积为 $8.46 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全国天然林总面积的29.9%,存储着约1/3的中国森林碳储量^[4]。有研究表明,北半球中高纬度森林碳储量可能远小于目前的估算值^[5],且北方森林碳储量对气候变化、自然干扰和人类活动非常敏感^[3,6-7]。因此,在全球气候变化背景下准确估算北方森林碳储量是全球森林碳循环研究的热点问题之一^[8-10]。

大兴安岭林区作为我国对气候变化响应较为敏感的地区之一,在A2气候变化情景下,2100年该地区年均温将会升高5℃,年降水量增加164 mm。在B1气候变化情景下,21世纪末年均温升高2.3℃,年降水量增加72 mm。气候变化既可以通过改变树种组成和生产力来直接影响北方森林的固碳能力^[11-12],也能通过改变林火和病虫害等干扰的发生频率和强度来间接影响北方森林碳储量^[13-14]。有研究表明,随着气温升高和植物生长季延长,北方森林的林火干扰发生概率和过火面积将会增加^[15-17]。如Flannigan等^[15]研究表明,到21世纪末加拿大北方森林的火烧面积可能增加74%~118%。李顺等^[17]预测,到21世纪中叶大兴安岭地区的人为火发生频率将增加72%~167%。气候变暖引起的林火干扰频率和强度变化可能会显著降低大兴安岭森林碳储量,抵消掉气候变暖增加的森林碳吸收,从而导致大兴安岭森林由碳汇转变为碳源。

半个多世纪以来,大兴安岭林区作为我国的主要木材生产基地之一,森林经历了长时间的高强度采伐,目前大部分森林都处于幼龄林或中龄林等初期演替阶段。长期高强度采伐显著地改变了大兴安岭森林的树种组成、结构和碳储量^[18-19]。采伐后大兴安岭森林主要更新树种是白桦(*Betula platyphylla*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)和山杨(*Populus davidiana*)。林分年龄基本在40~70年^[20]。有研究表明,这些早期演替树种可能在未来的几十年内相继到达寿命,使得森林的死亡率超过生长率,从而导致北方森林生态系统存在由碳汇转变成碳源的危险^[21]。因此,有必要估算在经历长期高强度采伐之后大兴安岭森林碳储量的动态变化。

气候变化、林火和采伐及其交互作用控制着北方森林碳储量^[22-23]。在估算北方森林生态系统碳储

量时需要考虑林火和采伐等干扰因子的影响,特别是考虑林火和采伐的交互作用,量化每一个因子的相对贡献和交互作用,能够提高估算森林碳储量精度。从目前研究手段和技术上看,研究气候变化背景下林火和采伐之间的相互作用对森林碳储量影响存在一定的困难,常规的生态学调查方法在解决多因子长期相互作用问题中有较大的局限性,借助森林生态系统模型,采取多模型耦合和模型-观测数据融合的方法或许能够解决上述问题。因此,本研究耦合森林景观模型LANDIS PRO和森林生态系统模型LINKAGES v2.2模拟不同气候变化情景下大兴安岭森林碳储量的动态变化,以量化气候变化、林火和采伐对我国北方森林碳储量的影响。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

大兴安岭呼中林区(51°14'40"—52°25'0" N, 122°39'30"—124°21'0" E)位于大兴安岭伊勒呼里山北坡,呼玛河上游,北与漠河县和塔河县接壤,南与松岭林业局和内蒙古自治区鄂伦春自治旗相邻,东与新林林业局相连,西接内蒙古自治区额尔古纳左旗。呼中林区由呼中林业局和呼中自然保护区组成,总面积为7419.9 km²,森林覆盖率为89.3%。全区平均海拔812 m,最高峰为小白山1515 m,最低海拔在北部呼玛河出境处,为420 m。呼中林区属于寒温带大陆性季风气候,冬季漫长而寒冷,夏季短暂温暖而多雨,年均温-4.3℃,年降水量497.7 mm,夏季降水量占全年的67%。主要土壤类型有棕色针叶林土、草甸土和石质土,其中棕色针叶林土在呼中林区内分布面积最广,从山麓平缓坡地直至山顶脊部均有分布。

呼中林区属于寒温带性针叶林,是东西伯利亚明亮针叶林向南分布的延续^[24]。以兴安落叶松林为主,占整个研究区面积的60%以上。除落叶松以外,其他针叶树种主要有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、云杉(*Picea korjensis*)和偃松(*Pinus pumila*)。白桦是呼中林区分布面积最广的阔叶树种,能够在火烧和采伐迹地上迅速繁殖生长,其分布范围仅次于兴安落叶松。除白桦之外,阔叶树种主要有山杨、甜杨(*Populus suaveolens*)和钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)等。山杨主要分布在低海拔的阳坡,分布面积不足3%;樟子松多分布在地阳坡、半阳坡中部和山地下部,分布面积不足5%;甜杨和钻天柳主要沿河流呈带状分布。

1.2 模型耦合框架

LANDIS PRO 模型可以模拟森林景观和地上碳储量动态变化[25] ,但 LANDIS PRO 模型缺少生物地球化学循环模块不能模拟土壤碳氮循环.LINKAGES v2.2 能够根据气象数据、土壤水分、土壤养分及树种生理参数来模拟土壤碳循环[26] .虽然 LINKAGES 模型模拟结果在全球多个地区得到了验证 ,但 LINKAGES 模型没有考虑干扰和森林管理的影响[27] .因此 本研究耦合 LANDIS PRO 和 LINKAGES v2.2 模型来模拟大兴安岭森林地上碳储量和土壤有机碳的动态变化[28] .

本研究在土地类型水平上耦合 LANDIS PRO 和 LINKAGES v2.2 模型.首先根据地形、海拔、植被和土壤类型将研究区划分为26个土地类型(图1).每个

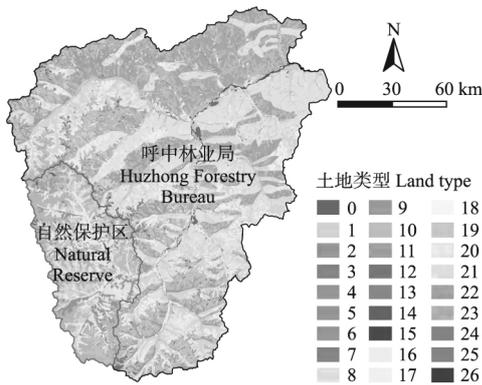


图1 研究区土地类型图 Fig.1 Land type map of the study area.

- 0) 非林地 No forest; 1) 阶地草类-兴安落叶松林 Terrace Larix gmelinii-grass; 2) 阶地杜鹃-兴安落叶松林 Terrace Larix gmelinii-Rhododendron dahurica; ... 26) 亚高山草类-白桦林 Subalpine Betula platyphylla-grass.

土地类型内土壤和植被类型以及气候条件相同.然后 利用 LANDIS PRO 模型模拟演替、林火和采伐影响下大兴安岭森林林分结构和地上碳储量动态变化.将 LANDIS PRO 在每个土地类型输出的株数、年龄和胸径结果作为林分参数输入 LINKAGES v2.2 模型 以模拟土壤有机碳、有效氮和土壤水文状况的变化(图2) .

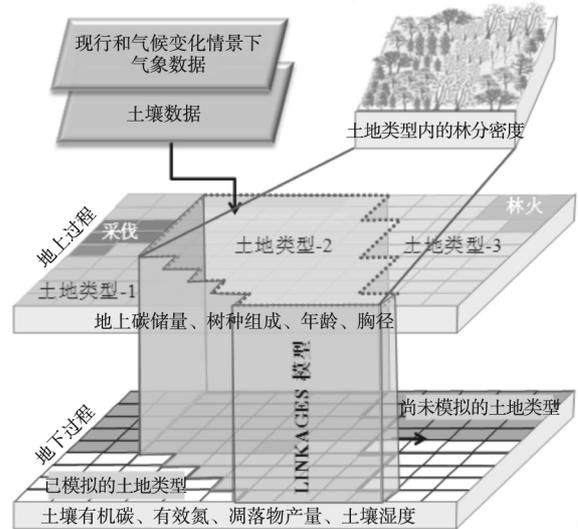


图2 LANDIS PRO 和 LINKAGES v2.2 模型耦合框架图 Fig.2 Framework diagram of coupling LANDIS PRO and LINKAGES v2.2 model.

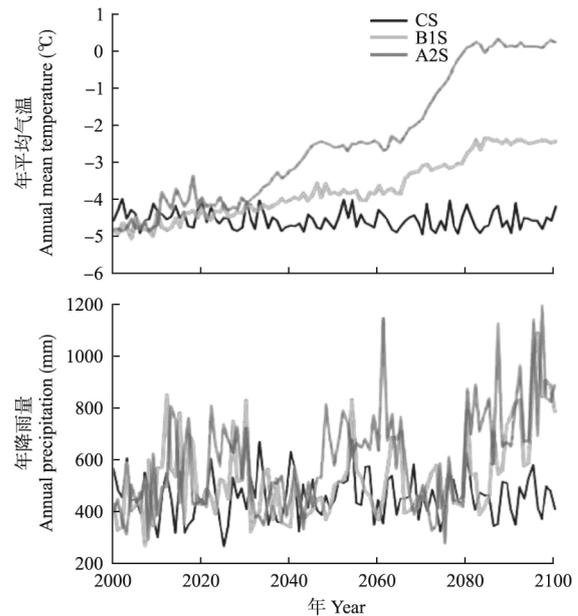


图3 现行气候、A2 和 B1 气候变化情景下研究区年平均温度及降雨量 Fig.3 Mean annual temperature and precipitation at the study area under baseline climate ,A2 and B1 climate change scenarios. CS: 现行气候情景 Baseline climate scenario; B1S: B1 气候变化情景 B1 climate change scenario; A2S: A2 气候变化情景 A2 climate change scenario. 下同 The same below.

1.3 模型参数化

1.3.1 LANDIS PRO 模型参数化 LANDIS PRO 模型的空间参数主要有土地类型图、树种组成图、管理区图和林火机制图等。土地类型图是由呼中林区的林相图、30 m 分辨率数字高程图和大兴安岭林区土地利用类型和道路分布图(1:50000)生成的。通过森林资源调查数据与2000年呼中林相图相结合的方法得到初始树种组成图。为了降低模型运算负荷,将所有图件都重采样到150 m×150 m的空间分辨率。

非空间参数主要有树种生活史属性、树种建群概率、林火参数和采伐参数等。树种生活史属性参数主要是通过查阅相关文献^[24]和现有研究^[29-30]以及野外调查等方式获得(表1)。在LANDIS PRO模型中,树种建群概率(SEP)可以反映环境变化对树种的影响,本研究通过不同土地类型内的树种建群概率来反映气候变化对森林生态系统的直接影响。现行气候条件下树种建群概率来源于大兴安岭地区有关LANDIS模型的文献^[31]。参考已有研究,利用LINKAGES v2.2模型估算不同气候变化情景下呼中林区树种建群概率(表1)。

现行气候条件下林火模块的非空间参数来源于1965—2005年的大兴安岭地区火烧数据。现行气候条件下呼中林区的平均火烧轮回期为238年,平均火烧面积为1884 hm²,林火点燃概率为0.0040。气候变化情景下呼中林区林火参数来源于研究区已发表文献^[32]。B1气候变化情景下大兴安岭林区火点燃概率和平均火烧面积增加30%,平均火烧轮回期缩短1/4,A2气候变化情景下林火点燃概率和平均火

烧面积增加200%,平均火烧轮回期缩短2/3。林火机制图来源于研究区土地类型图。数字高程图来源于30 m ASTER-DEM数据。

采伐模块参数主要来源于呼中林业局森林经营方案。按照天然林保护工程的要求,研究区被划分为禁伐区(56.7%)、限伐区(22.4%)和商品林区(20.9%)。限伐区的平均采伐强度为蓄积量的3%,商品林区的平均采伐强度为蓄积量的5%。采伐树种包括落叶松、白桦和山杨,而云杉、樟子松、甜杨、钻天柳和偃松作为保护树种不允许采伐。为了方便管理,以小班为单位进行采伐。

1.3.2 LINKAGES v2.2 模型参数化 LINKAGES v2.2模型的参数主要有气象参数、土壤参数、树种参数和林分参数。现行气候的气象参数来源于大兴安岭地区各气象站1975—2000年的气候资料日值数据(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。为了得到每个土地类型的气象参数,选取大兴安岭及其周边地区的17个气象站数据,考虑经纬度、海拔和地形的影响,采用回归克里金法对研究区温度、降雨和风速数据进行了空间插值。基于日最低温和最高温数据,利用Campbell经验模型估算研究区日平均入射辐射。

从IPCC第四次报告提出的未来气候变化情景模式中选取了A2和B1两种CO₂排放情景。其中,A2情景代表高人口密度和较低处理技术水平情况下较高的CO₂排放浓度(1250 ppm);B1情景代表低人口密度和较高处理技术水平情况下较低的CO₂排放浓度(600 ppm)。本研究中,A2气候变化情景选择英国哈德利气象研究中心开发的大气环流模式(UKMO-HadCM3)模拟的气候数据。UKMO-HadCM3模式预

表1 LANDIS PRO 模型主要树种生命史属性
Table 1 Major species life history attributes for LANDIS PRO model

树种 Tree species	寿命 Longevity (a)	成熟年龄 Maturity age (a)	耐阴性 Shade tolerance	耐火性 Fire tolerance	有效种子 传播距离 Effective seeding distance (m)	最大种子 传播距离 Maximum seeding distance (m)	最大平均 胸径 Maximum mean diameter (cm)	含碳系数 Carbon coefficient	树种建群概率 Species establishment probability		
									CS	B1S	A2S
LY	300	20	2	5	50	390	75	0.4234	0.2875	0.3260	0.2060
ZS	250	25	2	4	100	300	70	0.4120	0.1750	0.2758	0.2130
YS	300	30	4	1	100	280	60	0.4800	0.0603	0.1905	0.1340
BH	150	15	1	3	-1	2400	30	0.4210	0.1525	0.1565	0.3868
SY	120	10	1	1	-1	2400	50	0.3921	0.0188	0.0810	0.2043
TY	180	12	1	2	-1	-1	50	0.4144	0.0125	0.0403	0.0445
ZT	250	12	2	1	-1	-1	50	0.4144	0.0175	0.0560	0.0750
YS	250	15	3	3	90	100	20	0.5120	0.2250	0.2540	0.1078

LY: 兴安落叶松 *Larix gmelinii*; ZS: 樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; YS: 云杉 *Picea korienensis*; BH: 白桦 *Betula platyphylla*; SY: 山杨 *Populus davidiana*; TY: 甜杨 *Populus suaveolens*; ZT: 钻天柳 *Chosenia arbutifolia*; YS: 偃松 *Pinus pumila*. CS: 现行气候情景 Baseline climate scenario; B1S: B1 气候变化情景 B1 climate change scenario; A2S: A2 气候变化情景 A2 climate change scenario. 下同 The same below.

表 2 LINKAGES v2.2 模型主要树种参数

Table 2 Major species parameters of LINKAGES v2.2 model

树种 Tree species	最高积温 Maximum degree-day ($^{\circ}\text{C}$)	最低积温 Minimum degree-day ($^{\circ}\text{C}$)	Richard		更新 开关函数 Reproduction switch function	干旱系数 Drought tolerance	耐受低温 Cold tolerated ($^{\circ}\text{C}$)	叶质量参数 Leaf mass parameter	根冠比 Root-shoot ratio	滞叶期 Foliage retention time (a)
			生长方程参数 Richard growth parameter							
			a	b						
LY	1900	400	0.35	63.62	FFFFT	0.424	-35	440	1.0	1
ZS	1900	700	0.37	59.08	TTTFF	0.600	-30	440	1.0	3
YS	2500	600	0.38	68.07	FTFFF	0.110	-35	440	1.0	3
BH	3100	600	0.52	73.23	FFFFT	0.412	-40	248	0.8	1
SY	3000	800	0.66	78.77	TTTTF	0.333	-26	248	0.5	1
TY	2400	600	0.29	57.26	TTTTF	0.080	-35	248	0.5	1
ZT	1600	600	0.35	63.62	TTTTF	0.100	-35	248	0.5	1
YS	1400	300	1.16	46.30	TTTTF	0.200	-40	440	1.0	3

测到 21 世纪 80 年代研究区的年平均温将增加 5°C , 年降水量约增加 35%。B1 气候变化情景选择美国国家大气研究中心 (NCAR) 开发的 PCM 大气环流模式预测的气候数据。PCM 模式预测到 21 世纪 80 年代呼中林区年均温将增加 2.4°C , 年降雨量将增加 16% (图 3)。本研究利用 LARS-WG 天气发生器进行统计降尺度得到研究区 A2 和 B1 气候变化情景下日最低温度、最高温度、降雨量、风速和太阳辐射数据。

LINKAGES v2.2 模型的土壤参数(土层数、土层厚度、有效土层厚度、土壤质地、全碳和全氮含量)来源于中国土壤数据库 (<http://gis.soil.csdb.cn>)。根据土壤黏粒、粉砂、砂粒比例,利用 Century 模型的土壤计算器推算出各个土层的田间持水量和萎蔫系数。最大积温、最小积温、Richard 方程参数、树种耐阴系数和寿命生长等树种参数来源于中国植物物种信息数据库 (<http://db.kib.ac.cn/>) 以及关于大兴安岭森林等文献^[24](表 2)。干旱系数、树种最低耐受温度、凋落物类型、单位冠面积叶质量、林冠面积转换系数、根冠比和滞叶周期等来源于本研究区的前人研究成果^[29]。林分参数来源于 LANDIS PRO 模型的输出结果。在每个模拟步长, LANDIS PRO 模型都将其输出的株数、年龄和胸径模拟结果作为 LINKAGES v2.2 参数,以模拟气候变化、林火和采伐干扰下土壤有机碳储量变化。

1.4 预案设置

为了量化气候变化、林火和采伐对大兴安岭森林碳储量的影响,设置了现行、B1 和 A2 气候变化情景及其相对应的林火发生状况,以及 2 个采伐预案(商业采伐和全面停止商业采伐),共 12 个模拟预案(表 3)。现行气候演替预案不考虑采伐和林火,代表现行气候条件下森林潜在的碳储量;现行气候林

火采伐交互预案既考虑采伐又考虑林火,代表现行气候条件下碳储量的实际情况;现行气候演替、林火和采伐预案在现实中并不存在,但可用于量化现行气候条件下植被演替、采伐与林火对森林碳储量变化的绝对与相对贡献。B1 和 A2 气候变化情景演替预案既不考虑采伐也不考虑林火的影响,代表未来气候变化情景下大兴安岭森林潜在的碳储量。B1 和 A2 气候变化情景下林火采伐交互预案分别考虑气候变化后采伐和气候变暖后的林火(增加 30%~200%)的影响,代表未来气候变化条件下碳储量的实际状况。本研究以 10 年时间步长,模拟未来 100 年(2000—2100 年)地上碳储量和土壤有机碳储量变化,所有模拟预案都做 5 次重复以降低模型自身的不确定性^[33]。

1.5 数据分析

通过比较不同气候变化情景的模拟结果,以评价气候变化、林火、采伐对大兴安岭森林碳储量的影

表 3 研究区气候变化、林火和采伐模拟预案

Table 3 Scenarios of simulating for climate change, fire and harvest in the study area

气候情景 Climate scenario	模拟预案 Simulation preparedness	预案描述 Description
现行气候 Baseline climate	CY	当前气候,自然演替条件
	CF	当前气候,维持当前气候林火干扰
	CH	当前气候,商业采伐
	CFH	当前气候,商业采伐与当前气候林火干扰
B1 气候 B1 scenario	B1Y	B1 气候变化情景,自然演替条件
	B1F	B1 气候变化情景,火干扰增加 30%
	B1H	B1 气候变化情景,商业采伐
	B1FH	B1 气候变化情景,商业采伐与火干扰增加 30%
A2 气候 A2 scenario	A2Y	A2 气候变化情景,自然演替条件
	A2F	A2 气候变化情景,火干扰增加 200%
	A2H	A2 气候变化情景,商业采伐
	A2FH	A2 气候变化情景,商业采伐与火干扰增加 200%

响.采用多重比较的方法(Duncan 检验)比较气候变化、林火、采伐及其交互作用对森林碳储量影响的差异.为了降低结果的共线性,选择一组数据代表反映变量.各反映变量随模拟时间而变化,选择短期(0~20年)、中期(30~50年)、长期(60~100年)代表反映呼中林区森林地上和土壤有机碳储量的变化.为了分析气候变化、林火、采伐及其交互作用对森林碳储量空间格局的影响,比较了模拟近期(20年)、中期(50年)和远期(100年)不同气候变化情景林火采伐交互预案研究区森林碳储量的空间变化.

采用双因素方差分析(two-way ANOVA)的方法量化气候变化、林火和采伐对大兴安岭森林碳储量变化的相对影响.检验每个影响因子对反映变量影响的显著性.由于反映变量(地上和土壤有机碳储量)随模拟时间而变化,选择模拟20、50和100年的结果平均值来反映各变量随时间变化的差异性.此外,R软件中的sensitivity和ggplot2软件包被用来分析气候变化、林火和采伐共同作用下森林碳储量估算的不确定性.使用R软件对模型结果进行数据分析^[34].

1.6 模型结果验证

采用数据分割的方法进行LANDIS PRO模型参数化和校验^[35].首先,选取70%的森林二类调查数据和2000年呼中林业局林相图数据参数化LANDIS PRO模型,通过方差分析比较2000年的模拟结果与30%二类调查数据之间的差异,比较变量为地上碳储量;若差异显著(不可接受),则调整模型初始化参数(生长曲线、死亡率、种子量等参数),重新模拟;重复校验过程,直到差异可接受.其次,运行模型演替模块10年(到2010年),选择2010年森林调查数据来验证模型模拟结果.

由于长期观测或者野外调查数据难以获取,导致验证LANDIS PRO模型的长期模拟结果存在一定的困难.为了验证LANDIS PRO地上碳储量模拟结果的可信度,本研究将模拟60~100年后的呼中林业局地上碳储量和树种组成的平均值与研究区内自然保护区2000年地上碳储量和树种组成进行比较,以验证模拟结果的可靠性.这是因为呼中自然保护区森林大部分为成熟林和过熟林(平均林龄为120年),代表了大兴安岭森林未受干扰前的状况,而呼中林业局森林由于受采伐影响其森林大部分为中幼林(平均林龄为60年).

在景观水平上,利用土壤调查数据(2012年8月在呼中林区采集的34个土壤样点)、已发表文献

数据(Wei等^[36]2014年在根河、呼中、伊春和长白山4个地区采集的176个土壤样点,以及TRIPLEX模型模拟结果^[37]),利用LINKAGES v2.2模型对研究区LINKAGES土壤有机碳模拟结果进行验证.

2 结果与分析

2.1 模型结果验证

在景观水平上,LANDIS PRO模型短期模拟结果与同期森林调查数据接近.初始化的地上碳储量与2000年的112个森林调查样点数据比较,图4表明,初始化的地上碳储量接近2000年森林调查数据,二者之间的相关系数为0.83.2010年的地上碳储量模拟结果也与2010年的136个森林调查样点数据接近,相关性较高($R^2=0.82$).

利用2000年呼中自然保护区地上碳储量和树种组成数据对LANDIS PRO模型的长期模拟结果进行验证.表4表明,在现行气候、林火和采伐干扰条件下,模拟60~100年后呼中林业局地上碳储量的平均值为 $42.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,与呼中自然保护区的森林调查数据 $41.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 基本吻合.模拟60~100年后,呼中林业局树种分布面积比例的变化范围与呼中自然保护区2000年树种分布比例大致相同,只有落叶松和樟子松的变化范围较大,而模拟的樟子松面积分布平均值高于保护区的面积分布比例.

将LINKAGES v2.2模型的土壤有机碳模拟结果与野外调查数据、研究区前人文献数据和其他模

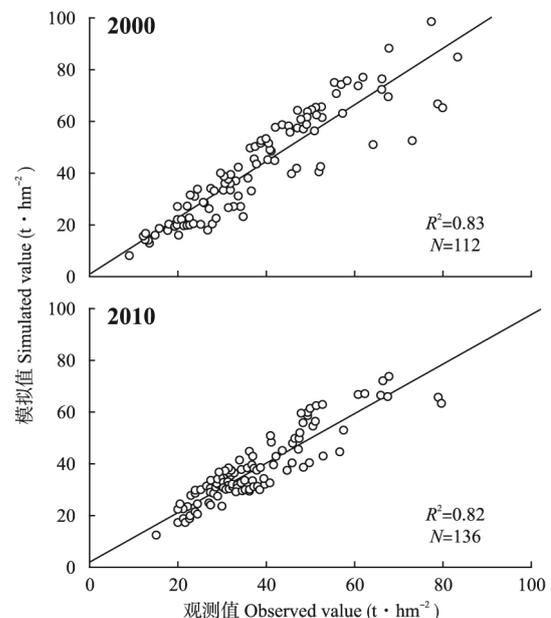


图4 2000年和2010年LANDIS PRO地上碳储量验证结果
Fig.4 Validation of simulated aboveground carbon storage from LANDIS PRO model at 2000 and 2010.

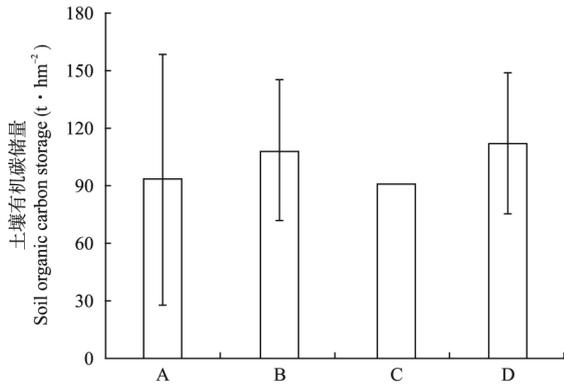


图 5 LINKAGES v2.2 模型土壤有机碳储量结果验证
Fig.5 Validation of simulated soil organic carbon storage from LINKAGES v2.2 model.
 A: 野外调查数据 Field survey data; B: 已发表文献数据 Published data; C: TRIPLEX 模型结果 Simulation results from TRIPLEX model; D: LINKAGES v2.2 模型结果 Simulation result from LINKAGES v2.2 model.

型结果进行比较,以验证模拟结果的可信度.图 5 表明 LINKAGES 模型模拟结果在 Wei 等^[36]野外调查数据和 TRIPLEX 模型结果范围内,并且接近 34 个土壤样点数据的平均值.

2.2 气候变化、林火和采伐对地上碳储量的影响

在不同气候变化情景下,呼中林区地上碳储量随着模拟时间总体呈现增加趋势(图 6).与现行气候相比,A2 和 B1 气候变化情景演替预案的地上碳储量比现行气候演替预案高 24% 和 20%.B1 气候变

表 4 呼中林业局的树种组成模拟结果与 2000 年呼中自然保护区的观测值比较

Table 4 Comparison of simulated tree composition in the Huzhong Forestry Bureau to observed values in Huzhong Natural Reserve in 2000

树种 Tree species	呼中自然保护区 Huzhong Natural reserve		呼中林业局 Huzhong Forestry Bureau	
	观测值 Observed value (%)	初始值 Initial condition (%)	变化范围 (60~100 年) Range (60-100 years)	平均值 (60~100 年) Mean (60-100 years)
LY	52.9	39.5	40.0~56.2	51.5
ZS	1.3	11.5	1.4~2.0	1.9
YS	1.1	1.7	2.5~2.6	2.5
BH	37.6	36.3	34.9~39.2	37.9
SY	1.2	4.4	0.4~0.9	0.7
TY	0.9	0.5	0.5~0.7	0.6
ZT	1.1	0.6	0.7~0.8	0.8
YS	3.9	5.5	3.7~4.6	4.1

化情景林火预案的地上碳储量大于现行气候和 A2 气候变化情景林火预案地上碳储量 13% 和 7%.在整个模拟阶段(2000—2100 年),A2 和 B1 气候变化情景采伐预案的地上碳储量分别为 (36.5±5.6) 和 (37.7±6.0) t · hm⁻²,明显高于现行气候采伐预案的地上碳储量.A2 和 B1 气候变化情景林火采伐交互作用预案地上碳储量分别比现行气候林火采伐交互预案高 9% 和 22%.

虽然现行气候、A2 和 B1 气候变化情景下兴安落叶松仍保持其优势树种地位,但在 A2 和 B1 气候

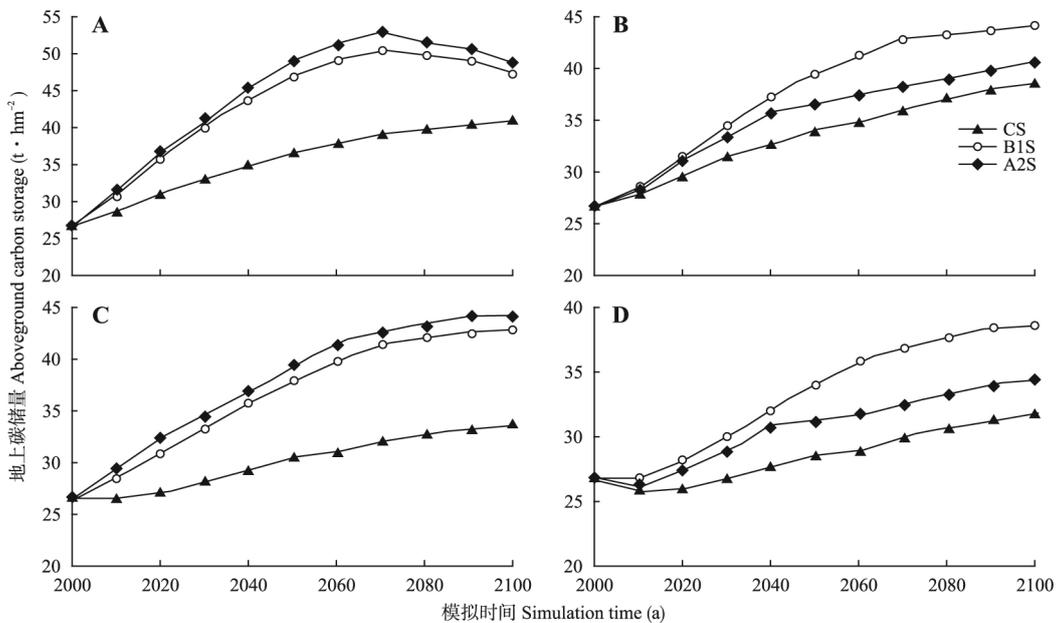


图 6 不同气候情景地上碳储量动态变化
Fig.6 Dynamics of aboveground carbon storage under different climate change scenarios.

A: 演替预案 Succession scenario; B: 林火预案 Fire scenario; C: 采伐预案 Harvest scenario; D: 林火和采伐交互预案 Fire-harvest scenario. 下同 The same below.

变化情景中兴安落叶松地上碳储量的比例有所下降(图7)。在不同气候变化情景下,樟子松的地上碳储量在整个模拟过程中呈增加趋势,云杉和偃松的地上碳储量变化幅度不大。与现行气候相比,B1和A2气候变化情景下白桦、山杨和甜杨等阔叶树种的地上碳储量有所增加,其中A2气候变化情景下山杨的地上碳储量增加幅度最大,比现行气候地上碳储量增加150%。

在3个气候情景中,林火、采伐及其交互作用对呼中林区地上碳储量的影响存在差异(表5)。这意味着在不同气候情景的林火、采伐和交互作用预案中,地上碳储量损失存在差异。林火和交互作用对地上碳储量的影响存在显著差异。A2气候变化情景下林火降低了 $(9.8 \pm 3.6) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 地上碳储量,比现行气候和B1气候变化情景大。在现行气候、B1和A2气候变化情景中采伐分别降低地上碳储量 (5.9 ± 1.6) 、 (6.7 ± 2.1) 和 $(6.9 \pm 2.1) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。3个气

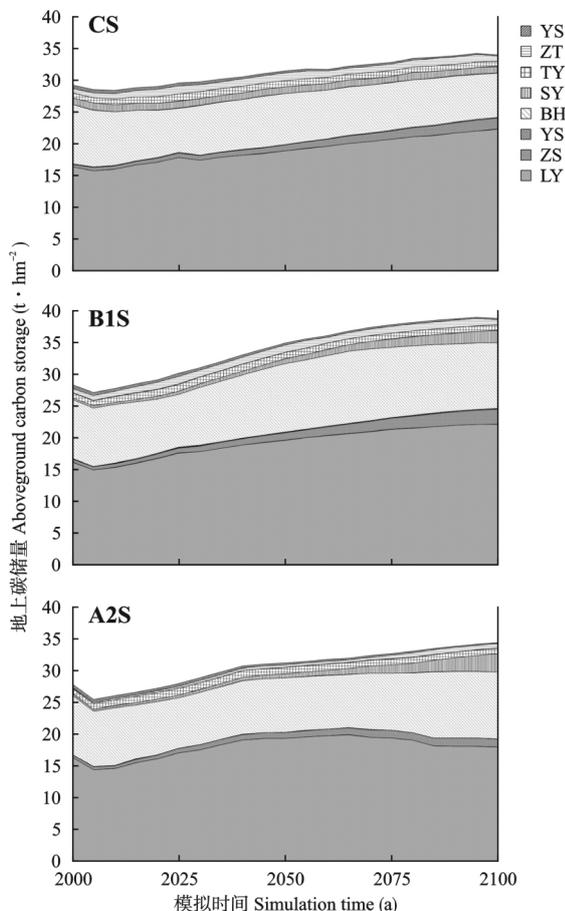


图7 现行气候、A2和B1气候变化情景下不同树种地上碳储量动态变化

Fig.7 Dynamics of aboveground carbon storage of different tree species under baseline climate, A2 and B1 climate change scenarios.

表5 不同气候变化情景林火、采伐及其交互作用对地上碳储量的影响

Table 5 Effects of fire, harvest and their interactions on aboveground carbon storage under different climate change scenarios ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

气候情景 Climate scenario	演替 Succession	林火 Fire	采伐 Harvest	交互作用 Fire × harvest
现行气候 Baseline climate	$2.3 \pm 0.7a$	$5.9 \pm 1.6a$	$7.6 \pm 2.1a$	$2.3 \pm 0.7a$
B1 气候情景 B1 scenario	$5.8 \pm 1.8b$	$6.7 \pm 2.1a$	$10.6 \pm 2.8b$	$5.8 \pm 1.8b$
A2 气候情景 A2 scenario	$9.8 \pm 3.6c$	$6.9 \pm 2.1a$	$14.7 \pm 4.6c$	$9.8 \pm 3.6c$

不同小写字母表示不同情景间差异显著($P < 0.05$)。Different small letters indicated significant difference among different scenarios at 0.05 level. 下同 The same below.

候情景下采伐对呼中林区地上碳储量的影响差异不显著。此外,现行气候和A2气候变化情景下林火、采伐及其交互作用对呼中林区地上碳储量的影响差异显著,B1气候变化情景下林火、采伐及其交互作用的影响差异不显著。

气候变化显著增加大兴安岭森林地上碳储量,且模拟前20年气候变化对地上碳储量的影响高于模拟后40年的影响(图8)。在短期气候变化对地上碳储量的影响大于林火的影响,而在中期和长期气候变化的影响均明显小于林火和采伐的影响。在短期和中期,林火对大兴安岭森林地上碳储量的相对影响分别为19.9%和31.5%,均小于采伐的影响。此外,在3个阶段林火和采伐对地上碳储量的影响均呈先增加后降低的趋势。

2.3 气候变化、林火和采伐对土壤有机碳储量的影响

由图9可以看出,在不同气候变化情景下土壤

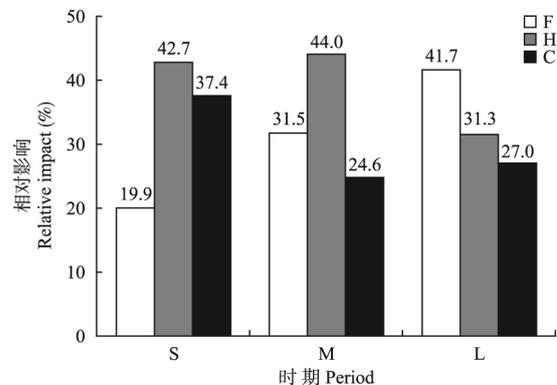


图8 不同时期气候变化、林火和采伐对地上碳储量的相对影响

Fig.8 Relative impact of climate change, fire and harvest on aboveground carbon storage at different periods.

F: 林火 Fire; H: 采伐 Harvest; C: 气候变化 Climate change. S: 短期 Short-term; M: 中期 Medium-term; L: 长期 Long-term. 下同 The same below.

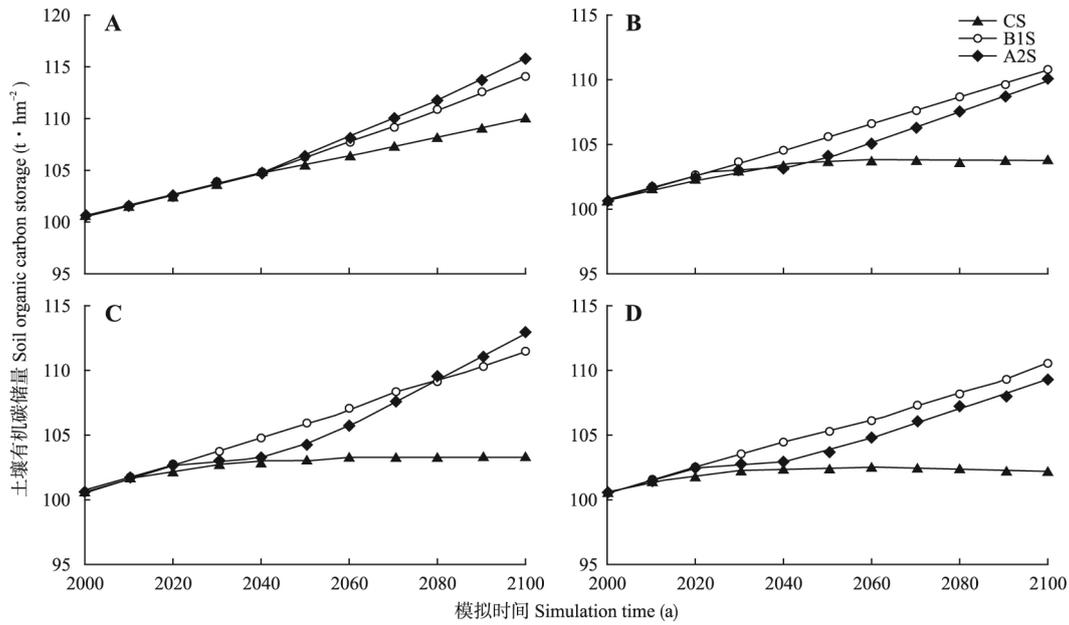


图 9 不同气候变化情景下土壤有机碳储量动态变化
Fig.9 Dynamics of soil organic carbon storage under different climate change scenarios.

有机碳储量随着模拟时间逐渐增加,但林火、采伐及其交互作用会降低土壤有机碳累积速率。2100 年 B1 和 A2 气候变化情景演替预案土壤有机碳储量比现行气候演替预案高 4% 和 5%。B1 气候变化情景林火预案土壤有机碳储量为 $110.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于现行气候和 A2 气候变化情景林火预案。未来 100 年 B1 和 A2 气候变化情景林火采伐交互作用预案的土壤有机碳储量比现行气候交互作用预案高 9% 和 6%。

由表 6 可以看出 3 个气候情景林火、采伐及其交互作用对呼中林区土壤有机碳储量影响存在差异。现行气候林火和交互作用降低土壤有机碳储量 (2.6 ± 2.0) 和 (3.6 ± 2.4) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与 B1 和 A2 气候变化情景林火和交互作用对土壤有机碳储量的影响差异不显著。3 个气候情景采伐分别减少土壤有机碳储量 (3.0 ± 2.1)、(1.9 ± 0.9) 和 (1.8 ± 1.1) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中现行气候和 B1 气候变化情景采伐对土壤有机

表 6 不同气候变化情景下林火、采伐及其交互作用对土壤有机碳储量的影响

Table 6 Effects of fire, harvest and their interactions on soil organic carbon storage under different climate change scenarios ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

气候情景 Climate scenario	演替 Succession	林火 Fire	采伐 Harvest	交互作用 Fire × harvest
现行气候 Baseline climate	$2.6 \pm 2.0a$	$3.0 \pm 2.1a$	$3.6 \pm 2.4a$	$2.6 \pm 2.0a$
B1 气候情景 B1 scenario	$2.1 \pm 1.2a$	$1.9 \pm 0.9b$	$3.4 \pm 1.3a$	$2.1 \pm 1.2a$
A2 气候情景 A2 scenario	$2.5 \pm 1.9a$	$1.8 \pm 1.1b$	$3.9 \pm 2.1a$	$2.5 \pm 1.9a$

碳储量的影响存在显著差异。

由图 10 可以看出,短期采伐对土壤有机碳储量的相对影响为 44.6%, 大于林火和气候变化的影响。中期和长期林火对土壤有机碳储量的相对影响分别为 38.3% 和 45.1%, 大于采伐和气候变化对呼中林区森林土壤有机碳储量的影响。林火对土壤有机碳储量的相对影响随着模拟时间而逐渐增加。相反,采伐对土壤有机碳储量的相对影响在 100 年的模拟过程中持续下降。气候变化对土壤有机碳储量的相对影响在整个模拟过程中变化不大。

2.4 不同气候情景下呼中林区森林碳储量空间格局变化

由图 11 可以看出,与模拟初始年(2000 年)相

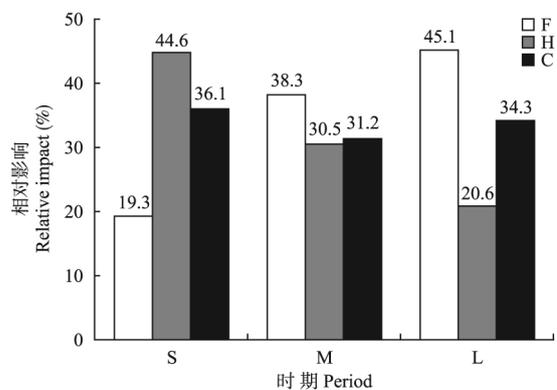


图 10 不同时期气候变化、林火和采伐对土壤有机碳储量的相对影响

Fig.10 Relative impact of climate change, fire and harvest on soil organic carbon storage at different periods.

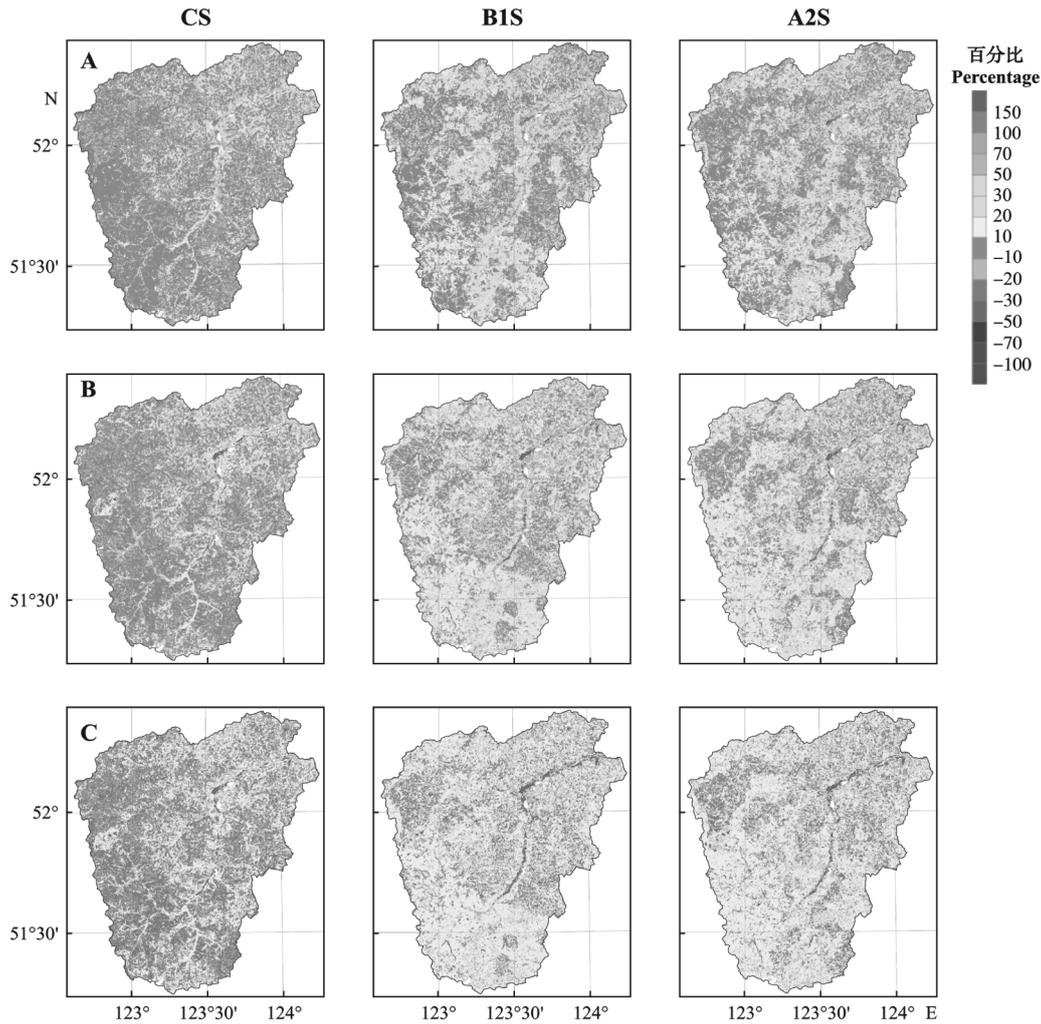


图 11 不同气候变化情景下近期、中期和远期森林碳储量相对模拟初始年(2000年)的空间变化

Fig.11 Carbon storage spatial variation in near term , medium term and long term , compared with base period (2000) under different climate change scenarios.

A: 近期(2020年) Short-term (2020); B: 中期(2050年) Medium-term (2050); C: 远期(2100年) Long-term (2100).

比 3 个气候情景研究区森林碳储量总体上呈增加趋势.近期(2020年)呼中森林碳储量有所增加,其中 B1 和 A2 气候变化情景增加趋势较为明显,现行气候碳储量增加幅度相对较小.在空间分布上呼中林区森林碳储量增加最为明显的为东北部和南部,而在呼中林区西南部分高海拔地区受到林火的影响碳储量反而有所降低.在中期(2050年),森林碳储量增加的区域面积逐渐扩大,其中,A2 和 B1 气候变化情景森林碳储量显著增加的区域面积远大于现行气候碳储量增加区域的面积.A2 气候变化情景碳储量明显降低的区域面积大于现行气候和 B1 气候变化情景碳储量降低区域的面积.在远期(2100年),呼中林区大部分区域森林碳储量都有所增加.从空间分布来看,碳储量增加幅度超过 100%的区域主要分布在呼中林区东北部,碳储量降低的区域主要

是在发生林火和进行采伐活动的地区.由于 A2 气候变化情景林火发生面积大于 B1 气候变化情景,导致 A2 气候变化情景呼中林区森林碳储量增加幅度小于 B1 气候变化情景.

2.5 不同气候情景下呼中林区森林碳储量估算不确定性

由图 12 可以看出 3 种气候情景下呼中林区森林碳储量存在较大的不确定性,且不同气候情景之间的碳储量不确定性存在差异.2050 年,现行气候不同模拟预案呼中林区地上碳储量 95%置信区间为 32.4~34.9 t·hm⁻²,B1 气候变化情景不同模拟预案地上碳储量 95%置信区间为 37.2~39.8 t·hm⁻².到 2100 年 A2 气候变化情景不同模拟预案地上碳储量 95%置信区间为 39.2~41.3 t·hm⁻²,比 2100 年现行气候不同模拟预案地上碳储量置信区间大.2050 年

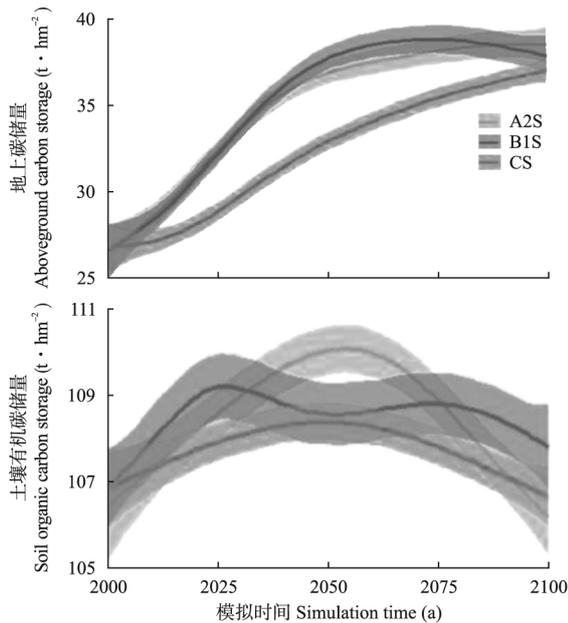


图 12 现行气候、A2 和 B1 气候变化情景下地上和土壤有机碳储量估算不确定性

Fig.12 Uncertainty in estimating aboveground and soil organic carbon storage under baseline, A2 and B1 climate change scenarios.

现行气候不同模拟预案土壤有机碳储量 95% 置信区间为 $98.2 \sim 102.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2100 年 B1 气候变化情景不同模拟预案土壤有机碳储量 95% 置信区间为 $105.3 \sim 109.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，A2 气候变化情景不同模拟预案土壤有机碳储量 95% 置信区间为 $104.6 \sim 108.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，大于现行气候变化情景不同模拟预案土壤有机碳储量的置信区间。此外，敏感性分析表明，整个模拟阶段 3 个气候情景之间地上碳储量不确定性在 12.4% ~ 16.2%，土壤有机碳储量不确定性为 6.6% ~ 10.4%。

3 讨 论

本研究耦合森林景观模型 LANDIS PRO 和森林生态系统模型 LINKAGES v2.2 模拟未来 100 年大兴安岭碳储量动态变化，结果表明，气候变化、林火和采伐及其交互作用会显著改变未来 100 年大兴安岭森林碳储量。在 A2 和 B1 气候变化情景中，气候变暖将会显著增加大兴安岭森林地上和土壤有机碳储量，但采伐和林火将会抵消掉相当一部分由气候变化增加的碳储量。在短期，气候变化对森林碳储量的影响大于林火的影响，而在中期和长期气候变化的影响小于林火和采伐的影响。受气候变化影响，大兴安岭地区林火频率和面积增加，使得林火对该地区森林碳储量的长期影响大于采伐和气候变化的

影响。

虽然林火、采伐及其交互作用会抵消一部分由气候变化增加的森林碳储量，但气候变化仍能增加大兴安岭森林地上碳储量。这一结论与现有北方森林碳动态研究结果基本一致^[37-38]。如 Shanin 等^[38]利用 EFIMOD 模型来模拟不同气候变化情景和干扰对俄罗斯北方森林碳动态的影响，结果表明，气候变化情景下森林净初级生产力的提高会抵消干扰导致的碳损失。此外，不同气候变化情景改变了大兴安岭森林树种组成，兴安落叶松分布面积有所降低，而以白桦和山杨为代表的阔叶树种分布面积逐渐增加（图 7）。这意味着气候变化既可以通过提高净初级生产力来增加森林植被固碳能力，还能通过改变森林树种组成来间接影响森林地上碳储量。

不同气候变化情景土壤有机碳储量增加的原因可能是现行气候条件下研究区温度较低，凋落物分解速度较慢，从而形成较厚的枯落物层。随着气候变暖，土壤枯落物层的分解速度加快，使得土壤矿质层碳的输入量增加。受气候变化影响，北方森林生长季的延长和植被生产力的提高可能会增加凋落物和细根产量，从而在一定程度上抵消由土壤呼吸增强造成的碳损失^[39]。但本研究结果与部分模型和控制试验结论不一致^[40-41]。这些研究表明，温度升高会加快北方森林土壤有机碳分解速率，从而导致大量固定在土壤中的碳释放到大气中^[42]。本研究与这部分研究之间的差异主要在于森林土壤碳循环不仅受到气温和降雨的影响，也与森林树种组成、年龄、干扰状况和土壤养分状况等密切相关^[43]。因此，研究气候变化对森林土壤有机碳的影响不仅需要考虑温度和降雨变化，还不能忽视森林演替过程、干扰和土壤养分状况的影响。

本研究表明，在气候变化、林火、采伐及其交互作用共同影响下，未来 100 年大兴安岭碳储量估算结果存在较大的不确定性（图 14）。不同气候变化情景下大兴安岭森林碳储量的不确定性为 6% ~ 23%。本研究结果与 Kurz 等^[44]对气候变化和干扰对加拿大北方森林碳循环影响的不确定性估算结果相似。未来大兴安岭森林碳储量的不确定性主要来源于以下 2 个方面：1) 气候变化幅度的不确定性，不同气候变化情景下大兴安岭温度升高 $2.4 \sim 5.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，降雨增加 16% ~ 35%，有可能导致该地区森林生态系统的碳储量增加 6% ~ 9%；2) 未来 100 年大兴安岭林火和采伐发生状况存在较大的不确定性，特别是受气候变化影响，该地区林火发生概率可能增加

30%~200% 将会进一步增加该地区森林碳储量估算结果的不确定性。目前,我国森林碳储量估算较少考虑林火和采伐等干扰的影响,本研究表明,继续按照现行方法来估算森林碳储量可能会高估我国北方森林碳储量,导致我国碳减排承诺偏高,不利于国际气候谈判和制定减缓气候变化影响的政策。

4 结 论

气候变化、林火、采伐及其交互作用将会显著影响未来大兴安岭森林碳储量。虽然林火和采伐将会抵消掉一部分由气候变化所增加的碳储量,但未来 100 年大兴安岭森林仍然能够持续固碳。短期气候变化对大兴安岭森林碳储量的影响大于林火的影响,而在中期和长期气候变化对森林碳储量的直接影响小于林火和采伐的影响。受气候变化的影响,大兴安岭林火发生的频率与火烧面积增加,在未来 100 年将会进一步降低大兴安岭森林地上和土壤有机碳储量。这意味着气候变化既可以通过提高净初生产力来增加森林碳储量,还能够通过改变林火等干扰状况来间接影响森林固碳能力。未来 100 年大兴安岭地区温度和降低变化幅度存在不确定,以及由此带来的不同林火干扰状况导致该地区森林碳储量变化存在较大的不确定性。准确估算森林生态系统碳储量,需要考虑种子传播、林火和采伐等景观过程的影响,从而为准确评估我国北方森林固碳在减缓全球气候变化的作用和有效实施森林生态系统管理提供科学依据。

参考文献

- [1] Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, **333**: 988-993
- [2] Bradshaw CJA, Warkentin IG. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. *Global and Planetary Change*, 2015, **128**: 24-30
- [3] Girardin MP, Bouriaud O, Hogg EH, et al. No growth stimulation of Canada's boreal forest under half-century of combined warming and CO₂ fertilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**: E8406-E8414
- [4] Fang JY, Chen AP, Peng CH, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, **292**: 2320-2322
- [5] Fang JY, Brown S, Tang YH, et al. Overestimated biomass carbon pools of the northern mid- and high latitude forests. *Climatic Change*, 2006, **74**: 355-368
- [6] Chen HY, Luo Y. Net aboveground biomass declines of four major forest types with forest ageing and climate change in western Canada's boreal forests. *Global Change Biology*, 2015, **21**: 3675-3684
- [7] Ford SE, Keeton WS. Enhanced carbon storage through management for old-growth characteristics in northern hardwood-conifer forests. *Ecosphere*, 2017, **8**: 1, doi: 10.1002/ecs2.1721
- [8] Goodale CL, Apps MJ, Birdsey RA, et al. Forest carbon sinks in the northern hemisphere. *Ecological Applications*, 2002, **12**: 891-899
- [9] Houghton RA. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 945-958
- [10] Stephenson NL, Das A, Condit R, et al. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, 2014, **507**: 90-93
- [11] Lenoir J, Gégout JC, Marquet P, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, **320**: 1768-1771
- [12] Reyer C, Lasch BP, Suckow F, et al. Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide. *Annals of Forest Science*, 2014, **71**: 211-225
- [13] Dale VH, Joyce LA, McNulty S, et al. The interplay between climate change, forests, and disturbances. *Science of the Total Environment*, 2000, **262**: 201-204
- [14] Johnstone JF, Hollingsworth TN, Chapin FS, et al. Changes in fire regime break the legacy lock on successional trajectories in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 1281-1295
- [15] Flannigan MD, Logan KA, Amiro BD, et al. Future area burned in Canada. *Climatic Change*, 2005, **72**: 1-16
- [16] Wotton BM, Nock CA, Flannigan MD. Forest fire occurrence and climate change in Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, **19**: 253-271
- [17] Li S (李 顺), Wu Z-W (吴志伟), Liang Y (梁宇), et al. Drivers of human-caused fire occurrence and its variation trend under climate change in the Great Xing'an Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2017, **28**(1): 210-218 (in Chinese)
- [18] Gong X (公 霞), Chang Y (常 禹), Bu R-C (布仁仓), et al. Long-term effects of different forest harvesting modes on forest landscape pattern in Huzhong Forestry Bureau. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2006, **25**(7): 805-812 (in Chinese)
- [19] Gao M (高明), Zhu Y-J (朱玉杰), Dong X-B (董希斌), et al. Effects of cutting intensities on biodiversity of timber forest in Daxing'an Mountains. *Journal of Northeast Forestry University (东北林业大学学报)*, 2013, **41**(8): 18-21 (in Chinese)
- [20] Chen H-W (陈宏伟), Hu Y-M (胡远满), Chang Y (常 禹), et al. Simulation of the effect of forest harvest mode on forest landscape: A case study in Huzhong forest region of Daxing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2013, **32**(7):

- 1888–1895 (in Chinese)
- [21] Keith H , Mackey B , Berry S , *et al.* Estimating carbon carrying capacity in natural forest ecosystems across heterogeneous landscapes: Addressing sources of error. *Global Change Biology* , 2009 , **16**: 2971–2989
- [22] Dale VH , Joyce LA , McNulty S , *et al.* Climate change and forest disturbances. *Bioscience* , 2001 , **51**: 723–734
- [23] Chen HYH , Shrestha BM. Stand age , fire and clearcutting affect soil organic carbon and aggregation of mineral soils in boreal forests. *Soil Biology & Biochemistry* , 2012 , **50**: 149–157
- [24] Xu H-C (徐化成). Forests in the Great Xing'an Mountains of China. Beijing: Science Press , 1998 (in Chinese)
- [25] Wang WJ , He HS , Fraser JS , *et al.* LANDIS PRO: A landscape model that predicts forest composition and structure changes at regional scales. *Ecography* , 2014 , **37**: 225–229
- [26] Pastor J , Post WM. Influence of climate , soil-moisture , and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry* , 1986 , **2**: 3–27
- [27] Jin WC , He HS , Thompson FR. Are more complex physiological models of forest ecosystems better choices for plot and regional predictions? *Environmental Modelling & Software* , 2016 , **75**: 1–14
- [28] Huang C , He HS , Hawbaker TJ , *et al.* A coupled modeling framework for predicting ecosystem carbon dynamics in boreal forests. *Environmental Modelling & Software* , 2017 , **93**: 332–343
- [29] He HS , Hao ZQ , Larsen DR , *et al.* A simulation study of landscape scale forest succession in northeastern China. *Ecological Modelling* , 2002 , **156**: 153–166
- [30] Wang XG , He HS , Li XZ , *et al.* Simulating the effects of reforestation on a large catastrophic fire burned landscape in Northeastern China. *Forest Ecology and Management* , 2006 , **225**: 82–93
- [31] Li XN , He HS , Wu ZW , *et al.* Comparing effects of climate warming , fire , and timber harvesting on a boreal forest landscape in northeastern China. *PLoS One* , 2013 , **8**(4): e59747
- [32] Liu ZH , Yang J , Chang Y , *et al.* Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of northeast China. *Global Change Biology* , 2012 , **18**: 2041–2056
- [33] Xu CG , He HS , Hu YM , *et al.* Assessing the effect of cell-level uncertainty on a forest landscape model simulation in northeastern China. *Ecological Modelling* , 2004 , **180**: 57–72
- [34] R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing , 2015 [EB/OL]. (2015-06-21) [2017-12-24]. <https://www.r-project.org>
- [35] Wang WJ , He HS , Spetich MA , *et al.* A framework for evaluating forest landscape model predictions using empirical data and knowledge. *Environmental Modelling & Software* , 2014 , **62**: 230–239
- [36] Wei YW , Li MH , Chen H , *et al.* Variation in carbon storage and its distribution by stand age and forest type in boreal and temperate forests in Northeastern China. *PLoS One* , 2013 , **8**(8): e72201
- [37] Peng CH , Zhou XL , Zhao SQ , *et al.* Quantifying the response of forest carbon balance to future climate change in northeastern China: Model validation and prediction. *Global Planet Change* , 2009 , **66**: 179–194
- [38] Shanin VN , Komarov AS , Mikhailov AV , *et al.* Modeling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes. *Ecological Modelling* , 2011 , **222**: 2262–2275
- [39] Deluca TH , Boisvenue C. Boreal forest soil carbon: Distribution , function and modelling. *Forestry* , 2012 , **85**: 161–184
- [40] Jones C , McConnell C , Coleman K , *et al.* Global climate change and soil carbon stocks: Predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology* , 2005 , **11**: 154–166
- [41] Fan ZS , Neff JC , Harden JW , *et al.* Boreal soil carbon dynamics under a changing climate: A model inversion approach. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* , 2008 , **113**: 189–203
- [42] Davidson EA , Janssens IA. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* , 2006 , **440**: 165–173
- [43] Luysaert S , Inglima I , Jung M , *et al.* CO₂ balance of boreal , temperate , and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* , 2007 , **13**: 2509–2537
- [44] Kurz WA , Stinson G , Rampley GJ , *et al.* Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , 2008 , **105**: 1551–1555

作者简介 黄超,男,1985年生,助理研究员.主要从事森林生态学和森林景观模型研究. E-mail: heipichao85@hotmail.com

责任编辑 孙菊

黄超,贺红士,梁宇,等. 气候变化、林火和采伐对大兴安岭森林碳储量的影响. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2088–2100
Huang C , He H-S , Liang Y , *et al.* Effects of climate change , fire and harvest on carbon storage of boreal forests in the Great Xing'an Mountains , China. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2018 , **29**(7): 2088–2100 (in Chinese)