DOI: 10.5846/stxb201805030987
张庆龙,梁宇,贺红士,黄超,刘波,姜思慧.树种水平的大兴安岭地上生物量变化特征及其与气候和干扰的关系.生态学报,2019,39(12): - .
Zhang Q L, Liang Y, He H S, Huang C, Liu B, Jiang S H.Changes in species-level biomass and its relationship with climate and forest disturbances in the Great Xing′an Mountains.Acta Ecologica Sinica,2019,39(12): - .

树种水平的大兴安岭地上生物量变化特征及其与气候和干扰的关系

张庆龙[1,2],梁 宇[2,*],贺红士[3,4],黄 超[2],刘 波[2],姜思慧[2,5]

1 山东理工大学建筑工程学院,淄博 255049
2 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
3 东北师范大学,长春 130000
4 美国密苏里大学,哥伦比亚 65211
5 中国科学院大学,北京 100049

摘要:树种水平地上生物量(每个树种的地上生物量)是衡量森林生态系统结构功能的重要指标。为揭示树种水平森林地上生物量变化机制及其与气候变化和干扰的关系,运用 KNN (*k*-nearest neighbor distance)方法将森林调查数据和 MODIS 数据相结合,估算了黑龙江大兴安岭 2000、2010 和 2015 年树种水平的森林地上生物量,在此基础上运用典型对应分析和随机森林方法,分析了研究区树种水平地上生物量变化特征及其与气候和干扰因素的关系。研究结果表明:2000—2015 年期间,研究区总的森林地上生物量增加了 8.9%(0.41×10^8 t),其中 2010—2015 年期间地上生物量的增加速度要明显高于 2000—2010 年;地上生物量增加最多的树种为白桦(*Betula platyphylla* Suk.),与 2000 年相比生物量增加了 0.40×10^8 t,其次为樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、山杨(*Populus davidiana* Dode)和蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.),落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen)地上生物量下降了 0.08×10^8 t,柳树(*Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. Skv.)和云杉(*Picea koraiensis* Nakai)基本上没有变化;林火、采伐和造林等森林干扰均对树种水平地上生物量影响显著,林火对树种水平地上生物量的影响要高于造林和采伐;气候要素显示出了比干扰要素更为重要的作用,多年平均温度和降水解释了最多的树种水平地上生物量变异。年均温度与阔叶树种的生物量以及林火干扰有显著的正相关性,与总的森林地上生物量呈现出显著的负相关,与落叶松和白桦表现出微弱的负相关,预示着气候变暖将影响该区域的树种组成并降低该区域的森林生产力。

关键词:气候因子;森林干扰;树种水平地上生物量;大兴安岭;中国东北

Changes in species-level biomass and its relationship with climate and forest disturbances in the Great Xing′an Mountains

ZHANG Qinglong[1,2], LIANG Yu[2,*], HE Hongshi[3,4], HUANG Chao[2], LIU Bo[2], JIANG Sihui[2,5]

1 *School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*
2 *CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Shenyang* 110016, *China*
3 *Northeast Normal University, Changchun* 130000, *China*
4 *University of Missouri, Columbia* 65211, *USA*
5 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Species-level biomass and its change are important indicators in the measurement of the reliability of forest ecosystem structure and function. To understand the changes in species-level biomass and its linkage to climate and forest

基金项目:国家重点研发项目(2017YFA0604402);国家自然科学基金项目(31570461,31570462)
收稿日期:2018-05-03; **网络出版日期**:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liangyu@iae.ac.cn

disturbances, maps of changes in species-level biomass in the Great Xing′an Mountains between 2000 and 2015 were generated by integrating Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images with forest inventory data using *k*-nearest neighbor distance (kNN) methods. The distribution information regarding fires, logging, and afforestation in the Great Xing′an Mountains between 2000 and 2015 were also extracted from MODIS production. The relationships between species-level biomass changes, climatic factors, and forest disturbances were explored using canonical correspondence analysis (CCA) and the random forests method. The results showed that the total aboveground biomass in the study area increased by 8.9% (0.41×10^8 t) from 2000 to 2015. For the species-level biomass, white birch (*Betula platyphylla* Suk.) increased most significantly (0.40×10^8 t), followed by pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.), aspen (*Populus davidiana* Dode), and Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.). The biomass of larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen) declined the most, decreasing by 0.08×10^8 t from 2000 to 2015. There were no obvious changes for the species-level biomass of willow (*Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. Skv.) and spruce (*Picea koraiensis* Nakai) during these period. The areas of fire disturbance derived from MODIS products were consistent with the records in the yearbook for the Great Xing′an Mountains ($R^2=0.97$). Fire disturbance, logging, and afforestation all significantly influenced the changes in the species-level biomass ($P<0.01$). Among the three disturbance factors, fire disturbance exhibited the greatest explanatory ability for the variation in species-level biomass change based on the random forests method. However, climatic factors exhibited a relatively greater importance value than did forest disturbances. Annual temperature and precipitation explained the greatest variation in species-level biomass change among all the climatic factors and forest disturbances, and exhibited a strong positive correlation with broad-leaf species biomass and fire disturbance, but a negative correlation with total aboveground biomass (AGB), logging, and afforestation. A weak negative correlation between annual temperature and the biomass of white birch and larch was observed. Annual precipitation was positively correlated with the biomass of white birch and total AGB but negatively correlated with the biomass of larch and annual temperature. Our results indicated that climatic warming would increase the proportion of deciduous broad-leaved tree species and reduce forest ecosystem productivity in the Great Xing′an Mountains in northeast China.

Key Words: climate factor; forest disturbances; species-level biomass; Great Xing′an Mountains; Northeast China

森林是陆地生态系统结构和功能的重要维持者,其碳储量占到整个陆地生态系统加上碳储量的45%左右,在气候变化和全球碳循环中扮演着重要的角色[1-2]。树种水平地上生物量(每个树种的地上生物量)包含树种组成和森林地上生物量信息,是衡量森林生态系统结构功能及其稳定性的重要指标[3],同时气候变化和人类活动在不同尺度上影响着树种水平地上生物量[4]。获取树种水平地上生物量的变化信息并分析造成这些变化的原因,可以揭示人类活动强度、各种自然干扰因素以及气候变化对森林生长演替的影响规律[5]。

目前关于树种水平生物量变化及其与气候和干扰关系的相关研究多是借助长期的样地观测[6]和模型模拟来实现的[7-8]。样地观测虽能准确的获取树种水平森林地上生物量的变化及其与气候的关系,但仅局限于样地范围内,且需要长期观测才能获取有效的信息,很难反映空间连续的森林生态系统树种水平生物量的整体变化及其驱动因素(例如,林火、采伐等干扰因素)。模型可以在较短的时间内模拟树种水平生物量的时空变化及其与气候变化和干扰因素的交互作用关系,但是由于森林植被生理生态过程与环境因素交互机制的复杂性,模型中所采用的响应函数通常是假定的,模型模拟结果的准确性还有待于确定[9]。遥感具有大空间范围和长时间序列的对地观测能力,客观的记录了森林植被的时空变化,目前已经被广泛应用于森林干扰提取、树种组成和森林地上生物量的遥感估算中[10-13]。相较于模型模拟的结果,遥感技术提取的树种水平地上生物量变化和干扰信息能够更加客观的反映人类活动强度、各种自然干扰因素以及气候变化对森林生长演替的影响规律。

中国黑龙江大兴安岭林区是我国北方森林的典型代表,也是我国木材重要产区[14]。因地处中高纬度,对

气候变化响应敏感[15]。气候变化以及来自自然和人为的干扰因素对该区域森林的树种组成和森林地上生物量都具有重要的影响,历史上长期的采伐和林火干扰使中幼龄林占据了该区域森林景观的主要部分[16]。因此,本研究选择该区域作为研究区,将遥感提取的树种生物量变化与干扰信息及气候要素相结合,分析了该区域树种水平地上生物量的变化及其与气候和干扰的关系,以期揭示森林气候变化及干扰因素对该区域树种水平生物量的影响机制。

1　研究区和研究方法

1.1　研究区概况

黑龙江大兴安岭林区位于中国东北部边陲地带,东西横跨 6 个经度,南北跨越 4 个纬度,由 10 个林业局组成(图 1),面积约为 8.46×10^4 km^2,其中林地面积为 6.84×10^4 km^2,约占研究区总面积的 81.91%。该区地势由东南向西北逐渐升高,海拔 139—1511 m,坡度大部分地区小于 15°,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润,寒温带大陆性季风气候显著,年均降雨量从 240—442 mm 不等,年均温为-6—1℃。兴安落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen)为该区域的地带性植被,是东西伯利亚寒温带明亮针叶林向南延伸的部分[16]。其他针叶树种有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、云杉(*Picea koraiensis* Nakai)等,分布较为零散。白桦(*Betula platyphylla* Suk.)是该区域分布最广的落叶阔叶树种,山杨(*Populus davidiana* Dode)分布次之。其他阔叶树种分布也有一定的特点,如黑桦(*Betula davurica* Pall.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.)主要分布在研究区的南部,柳树主要沿河岸分布。寒温带棕色针叶林土为本区的地带性土壤,该区土层较薄,含石量较高,树种根系均较浅。

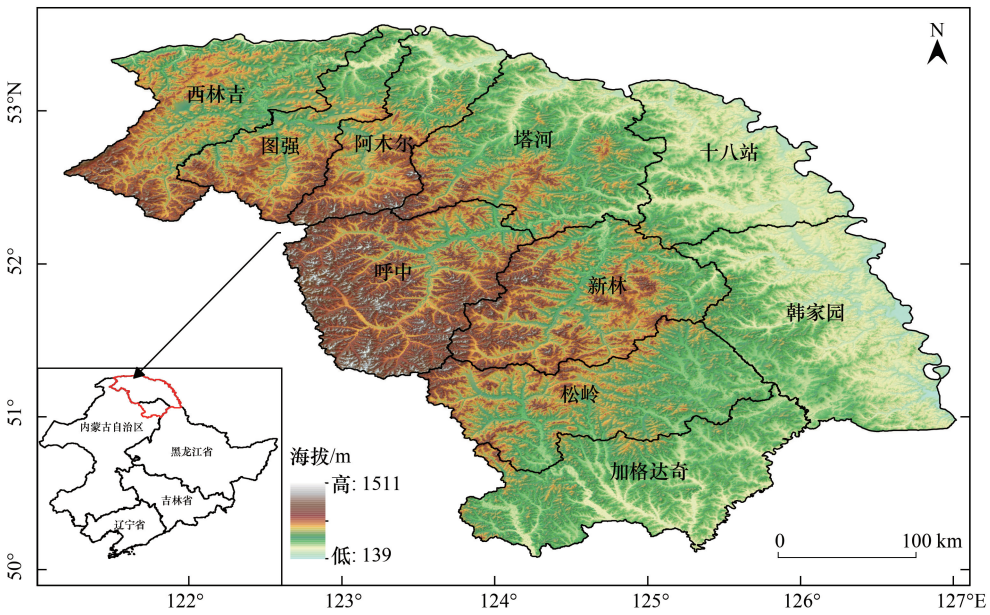

图 1　研究区海拔及位置分布

Fig.1　Elevation and location of the study area

1.2　树种水平地上生物量的估算

Zhang 等[13]使用基于 Random forests 距离参数的 KNN(*k*-nearest neighbor distance)方法将森林调查数据和 250 m 的空间分辨率的 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)数据以及气候、地形等环境因子相结合估算了黑龙江大兴安岭林区 2000 年树种水平的森林地上生物量。在此基础上,本研究将该方法应用于 2010 年和 2015 年的 MODIS 数据,在 250 m 分辨率上估算了研究区 2010 和 2015 年的树种水平地上生物量,并计算了 2000—2015 年期间森林地上生物量的变化(图 2)。

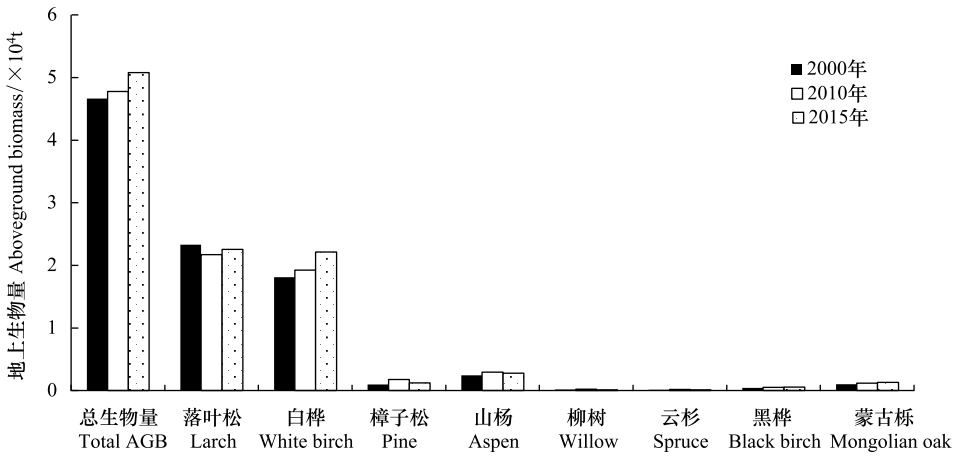

图 2 估算的 2000 年、2010 年和 2015 年研究区总森林地上生物量和各树种地上生物量

Fig.2 The estimated total AGB and species-level AGB of 2000, 2010 and 2015

AGB:地上生物量,Aboveground biomass

KNN 方法进行森林属性制图的基本原理为[17]:根据森林属性(如树种组成、生物量、林龄等)已知像元与森林属性未知像元之间光谱特征及环境变量的相似性,从已知森林属性的像元中选择与未知属性像元光谱及环境特征最为相似的一个($k=1$)或多个($k>1$)已知像元森林属性,按照一定的权重来填补未知像元的相应属性。本研究中选择 7635 个森林调查单元与 MODIS 和环境变量相结合来估算三个时间段的树种水平地上生物量。森林调查数据、MODIS 变量、环境变量的详细介绍及树种水平地上生物量估算的具体流程见 Zhang 等关于大兴安岭树种水平地上生物量估算的文章[13]。

1.3 森林干扰斑块的提取

本研究中涉及到的森林干扰包括林火、采伐和造林三类,干扰数据分别来自《大兴安岭年鉴》和 MODIS 数据产品。本研究从《大兴安岭年鉴》中收集了研究区 2000—2015 年间年度火烧面积、造林面积以及年度采伐量,用于对照 MODIS 数据的提取结果。MODIS 提取数据主要包括 2000—2015 年间林火、采伐和造林的空间分布和相应面积。林火的空间分布和面积主要来自 MODIS 火数据产品 MCD45A1,该数据为 500 m 空间分辨率的月数据合成产品,记录了每个月中过火像元的空间位置。尽管 MCD45A1 数据产品具有很大的不确定性,但根据 Zhang 等[9]的研究,该数据提取的东北地区年度火烧面积与国家林业局发布的森林统计年鉴中记录的过火面积相比,除没有捕捉到 2006 年过火面积的高峰点外,其余年份面积相差不大。

2000—2015 年采伐区域和造林区域均提取于 MODIS 植被连续字段产品(MODIS Vegetation Continuous Field,MOD44B)。该产品为 250 m 空间分辨率的年度数据合成产品,反映了森林覆盖度的连续变化情况。大面积的毁林和采伐会造成森林覆盖度迅速降低,造林会造成森林覆盖度迅速上升,因此我们参照统计年鉴中记录的相应年份的造林面积,对相邻年份的植被覆盖度差值设定相应的阈值来识别造林区域和采伐区域。经反复试验,确定像元值高于区域年度森林覆盖度变化均值与其 3.5 倍标准差之和的像元为造林区域,像元值低于区域年度森林覆盖度变化均值与其 3.5 倍标准差之差的像元为采伐区域。由于林火也会导致森林覆盖度的急剧下降,因此对于用阈值法提取的采伐区域,我们掩模掉了与林火像元重叠的部分。本研究中用到的 MODIS 数据产品均来自美国航空航天局官方数据下载网站(https://ladsweb.nascom.nasa.gov)。

1.4 气候数据

本研究用到的气候数据主要包括 1982—2009 年 29 年间的年平均降水量和气温,2000—2010 年 7、8、9 月份的 10 年平均月降水量、平均温度、平均风速、平均相对辐射、相对湿度以及对应的标准差等,数据的详细介绍见表 1。这些数据由 Mao 等[18]利用从中国国家气象数据共享服务平台(http://data.cma.cn/)收集到的气象数据结合同时期的 MODIS 和 AVHRR 数据进行插值而生成,空间分辨率均为 1 km,下载自中国国家地球系

统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn/)。

表 1　用于分析 2000—2010 年树种水平地上生物量变化的干扰和气候因子

Table 1　Environment variables for explaining the AGB change for 2000—2010

变量名 Variable name	变量定义 Definition
burt	MODIS 数据提取的过火像元,像元值为 2000—2010 年间探测到发生火灾的次数
log	MODIS 数据中提取采伐像元,像元值为 2000—2010 年间探测到发生采伐的次数
elevation	海拔(m)
slope	坡度(°)
pre	30 年平均年降雨量(mm)
pre7	2000—2010 年 10 年间 7 月份平均降雨量(mm)
pre8	2000—2010 年 10 年间 8 月份平均降雨量(mm)
pre9	2000—2010 年 10 年间 9 月份平均降雨量(mm)
rad7	2000—2010 年 10 年间 7 月份平均日总辐射量(w/m^2)
rad8	2000—2010 年 10 年间 8 月份平均日辐射量(w/m^2)
rad9	2000—2010 年 10 年间 9 月份平均日辐射量(w/m^2)
rhm7	2000—2010 年 10 年间 7 月份月平均相对湿度(%)
rhm8	2000—2010 年 10 年间 8 月份月平均相对湿度(%)
rhm9	2000—2010 年 10 年间 9 月份月平均相对湿度(%)
tem	30 年日平均气温(℃)
tmp7	2000—2010 年 10 年间 7 月份平均气温(℃)
tmp8	2000—2010 年 10 年间 8 月份平均气温(℃)
tmp9	2000—2010 年 10 年间 9 月份平均气温(℃)
wnd7	2000—2010 年 10 年间 7 月份平均风速(m/s)
wnd8	2000—2010 年 10 年间 8 月份平均风速(m/s)
wnd9	2000—2010 年 10 年间 9 月份平均风速(m/s)
sdpre7	2000—2010 年 10 年间 7 月份平均降雨量(mm)的标准差
sdpre8	2000—2010 年 10 年间 8 月份平均降雨量(mm)的标准差
sdpre9	2000—2010 年 10 年间 9 月份平均降雨量(mm)的标准差
sdrad7	2000—2010 年 10 年间 7 月份平均日总辐射量(w/m^2)的标准差
sdrad8	2000—2010 年 10 年间 8 月份平均日总辐射量(w/m^2)的标准差
sdrad9	2000—2010 年 10 年间 9 月份平均日总辐射量(w/m^2)的标准差
sdrhm7	2000—2010 年 10 年间 7 月份月平均相对湿度(%)的标准差
sdrhm8	2000—2010 年 10 年间 8 月份月平均相对湿度(%)的标准差
sdrhm9	2000—2010 年 10 年间 9 月份月平均相对湿度(%)的标准差
sdtmp7	2000—2010 年 10 年间 7 月份平均气温(℃)的标准差
sdtmp8	2000—2010 年 10 年间 8 月份平均气温(℃)的标准差
sdtmp9	2000—2010 年 10 年间 9 月份平均气温(℃)的标准差
sdwnd7	2000—2010 年 10 年间 7 月份平均风速(m/s)的标准差
sdwnd8	2000—2010 年 10 年间 8 月份平均风速(m/s)的标准差
sdwnd9	2000—2010 年 10 年间 9 月份平均风速(m/s)的标准差

1.5　分析方法

为研究 2000—2010 年期间树种水平地上生物量的变化与气候和干扰的关系,典型对应分析方法(canonical correspondence analysis,CCA)[17]和 random forests[18]方法被用来分析树种水平地上生物量变化量与潜在的解释变量之间的关系,用于分析的潜在解释变量如表 1 所示。

本研究在分析树种水平地上生物量变化与潜在变量之间关系时,对干扰区域和非干扰区域均分别进行了研究。首先,本研究对树种水平地上生物量的变化分别在干扰区域和非干扰区域使用逐步增加变量的方法建

立 CCA 模型来识别潜在因子的重要性,并保留对模型解释变异显著的变量($P<0.01$)。然后,对保留的解释变量与环境因子之间的关系,通过 Biplot 图进行了进一步的分析。该过程通过 R 软件中 vegan 程序包来实现。

为进一步评价气候和干扰因素对树种水平地上生物量的影响,random forests 方法被用来评价保留的解释变量对树种水平地上生物量变化的相对重要性。该方法通过 bootstrap 方法随机抽取若干样本来建立分类树,对于每一个样本,每个解释变量均被剔除一次,分别建立一棵分类树,并记录通过袋外数据(out of bag,未参与建立相应分类树的数据)评价的误差。不包含某变量的所有分类树的误差均值被用于评价该预测变量的相对重要性,误差越大说明该变量的相对重要性越高。该过程通过 R 软件中的 randomForest 包来实现。

2 结果与分析

2.1 树种水平地上生物量的变化

2000 年到 2010 年期间研究区森林地上生物量增加了 0.11×10^8 t(2.4%),到 2015 年研究区地上生物量比 2000 年增加了 0.41×10^8 t(8.9%)。Zhang 等[15]估算的 2000—2010 年期间东北地区森林地上生物量增加了 8.25%,大兴安岭年鉴记录的 2000—2010 年和 2000—2015 年期间活立木变化量分别为 0.07×10^8 m^3和 0.51×10^8 m^3,较 2000 年分别增加了 1.3%和 9.8%,我们的研究结果与统计年鉴数据较为接近。这是由于大兴安岭地区位于中国东北地区最北部,森林生长速度在整个东北林区最缓慢。在树种水平地上生物量中,落叶松呈现出先下降后上升的趋势,2010 年比 2000 年减少 0.16×10^8 t,2015 年比 2010 年增加了 0.08×10^8 t;白桦、山杨、樟子松、蒙古栎均有所增加,其中白桦增加最为明显,2010 年和 2015 年分别比 2000 年增加了 0.11×10^8 t 和 0.40×10^8 t;柳树和云杉地上生物量基本上没有变化(图 2)。从树种水平地上生物量变化区域来看,1987 年大火过火区域,白桦和落叶松都有较大幅度的增加;2000—2015 年火干扰区域,落叶松明显减少,山杨有了较大幅度的增加,白桦除十八站林业局外,也明显增加;樟子松增加区域主要位于研究区北部(图 1、图 3 和图 4)。

2.2 影响树种水平地上生物量的潜在因子

根据 MODIS 火数据产品,2000—2015 年研究区共有 104.47×10^4 hm^2的面积遭受了火干扰,火干扰面积在 2003 年最大(图 5),与统计年鉴记录的过火面积极为接近,相关系数达到 0.97。研究区部分区域 15 年间存在重复发生火灾的现象,部分像元最高发生过 7 次过火事件(图 4a)。2000—2015 年间从 MODIS 数据探测到的造林面积高峰与年鉴记录的人工造林高峰并不完全一致,可能是有些造林区域的快速成林过程发生在造林一两年之后导致的(图 5)。另外,受到 MODIS 数据空间分辨率的限制,很多发生在精细尺度的干扰事件很难被探测到,例如择伐、抚育伐等[9, 19-20]。本研究中 MODIS 数据提取的采伐区域在造林区域中均有所体现(图 4b 和 4c),与我国目前《森林采伐更新管理办法》中规定的采伐当年或者次年内必须完成更新造林任务是一致的[21]。因此,本研究探测的干扰区域和类型总体上是可靠的。

2000—2010 年期间 7—9 月份的平均风速、温度、日辐射量、相对湿度和月降水量均没有表现出显著的变化(表 2)。因此,本研究主要考虑多年平均气候要素在空间上的变化对树种水平地上生物量的影响。

2.3 主要因子对树种水平地上生物量的影响

在干扰区域,经过逐步 CCA 分析,27 个解释变量被保留了($P<0.01$)(图 6);在未发生干扰区域,32 个解释变量被保留了($P<0.01$)(图 7)。林火、造林和采伐均对树种水平地上生物量的变化产生了显著的影响,但气候、地形等环境要素的差异对树种水平地上生物量的变化的重要性要显著高于干扰因素(图 6 和 8)。气候、地形等环境要素对树种水平地上生物量的影响主要包含两个方面:一是不同的气候、地形条件等环境要素影响干扰的发生频率及强度,对树种地上生物量造成的损失会有显著不同;二是当干扰发生后,不同气候、地形条件下相同树种的恢复更新速度会有很大差异。我们的结果表明在黑龙江大兴安岭地区,这两方面因素造成树种地上生物量的变化差异已经超过了干扰直接造成的森林地上生物量损失。火干扰发生的次数与总的

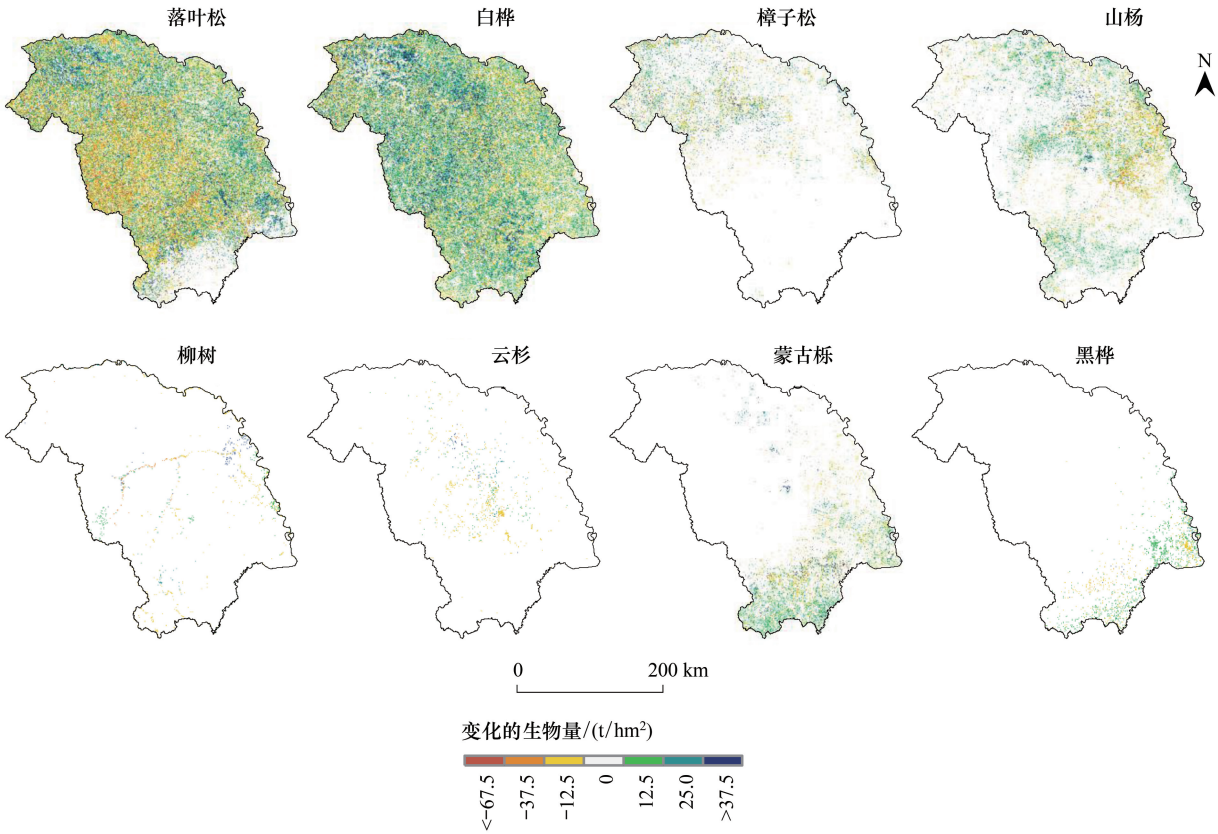

图 3　估算的 2000—2015 年黑龙江大兴安岭地区树种水平地上生物量的变化

Fig.3　The changed species-level biomasses of the Great Xing′an Mountains between 2000 and 2015 in Heilongjiang province

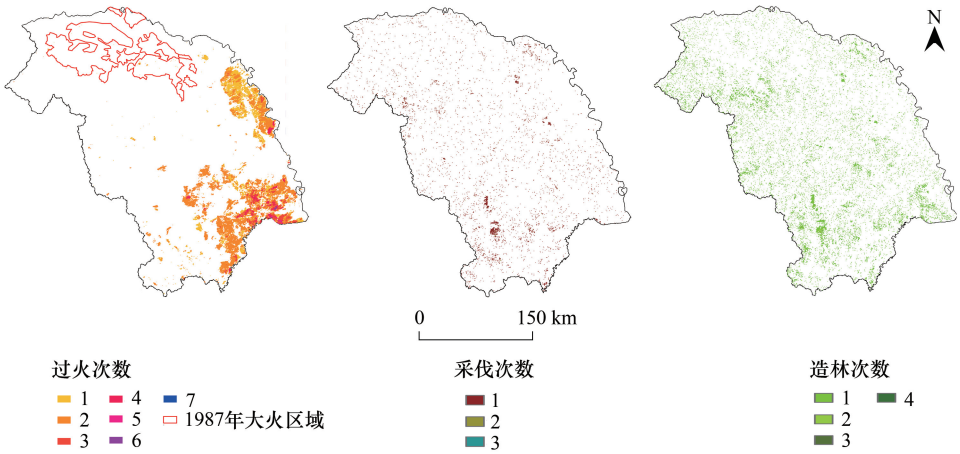

图 4　MODIS 数据中提取的研究区 2000—2015 年干扰区域

Fig.4　The disturbed areas derived from MODIS data during the years of 2000—2015

森林地上生物量、造林、采伐以及相对湿度和降水呈现出显著的负相关,与温度以及蒙古栎、黑桦、云杉、柳树、樟子松等树种的地上生物量呈现出显著的正相关,说明降水在大兴安岭地区是限制植被生长的重要因子,湿度越大,降水越多的区域,林火越不容易发生,发生林火干扰时植被恢复较快。造林和采伐呈显著的正相关,造林是造成干扰区域 2000—2015 年森林地上生物量恢复的最重要因素(图 6),采伐区域及时进行了造林恢复。

CCA1 和 CCA2 分别代表典型对应分析(canonical correspondence analysis,CCA)的第 1 主轴和第 2 主轴,

AGB 代表总森林地上生物量的变化,Larch、White birch、Pine、Aspen、Willow、Spruce、Mongolian oak 和 Black

表 2 2000—2010 年 7—9 月份 3 个月的平均风速、温度、日辐射量、相对湿度和月降水量

Table 2 Mean wind speed, temperature, solar radiation, relative humidity monthly precipitation

年份 Year	平均风速 Mean wind speed/(m/s)	平均温度 Mean temperature/℃	平均日辐射量 Mean solar radiation/(w/m^2)	平均相对湿度 Mean relative humidity/%	平均月降水量 Mean monthly precipitation/mm
2000	2.47	13.76	1362.83	65.20	58.92
2001	2.69	14.94	1424.66	64.53	55.31
2002	2.55	16.23	1476.67	57.14	36.59
2003	2.46	12.78	1296.62	77.66	95.40
2004	2.61	15.07	1359.11	67.10	72.73
2005	2.57	16.06	1479.38	63.80	50.30
2006	2.50	14.87	1463.59	65.58	61.22
2007	2.51	16.03	1468.74	64.82	64.03
2008	2.67	15.09	1361.00	66.87	76.92
2009	2.43	14.04	1323.69	76.74	94.26
2010	2.41	13.94	1367.21	72.76	82.83

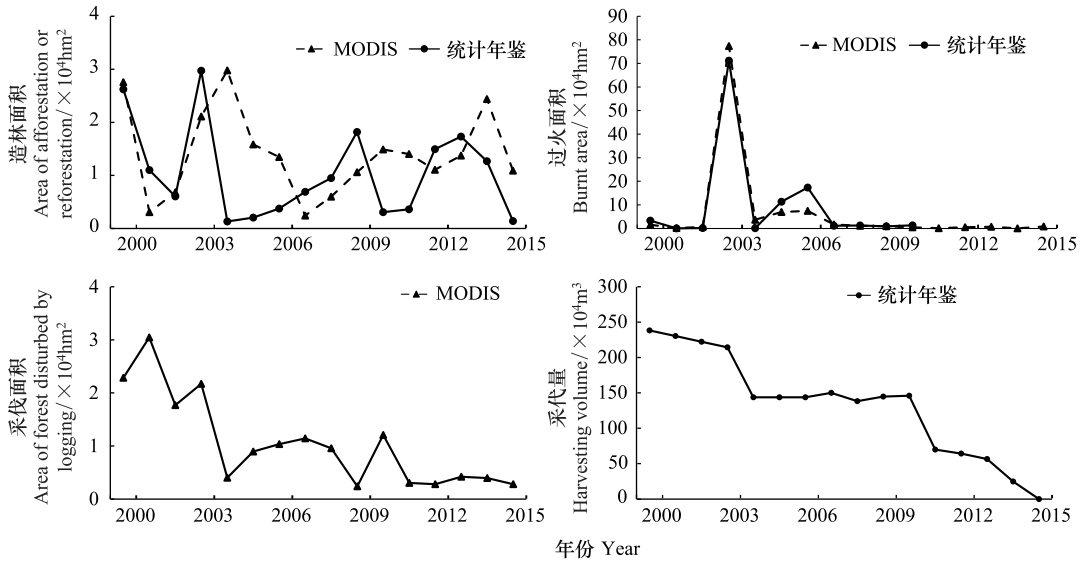

图 5 2000—2015 年期间研究区受火、造林和采伐影响的面积

Fig.5 Disturbed areas by fire, afforestation and logging during the years of 2000—2015

birch 分别代表落叶松、白桦、樟子松、杨树、柳树、云杉、蒙古栎和黑桦等树种地上生物量的变化,黑色的箭头代表经逐步 CCA 分析后得到的解释变量,箭头越长代表该变量的作用越强,箭头之间的夹角越小代表相关性越高。解释变量的具体含义见表 1

多年平均温度和降水是影响树种水平地上生物量变化差异的最为重要的因素,坡度以及 7、8 月份的日辐射总量次之(图 9)。白桦地上生物量增加与海拔和降水呈现出显著的正相关,与 7—9 月份的温度及年均温度呈现出显著的负相关;总森林地上生物量变化与白桦与落叶松的地上生物量变化呈现出一定的正相关性,与其他树种的森林地上生物量变化以及年均温均呈现出较强的负相关性(图 6 和 7)。这表明研究区森林地上生物量的变化主要是由落叶松和白桦决定的,沿着温度梯度,研究区优势树种落叶松和白桦的比例降低,总的森林地上生物量降低。

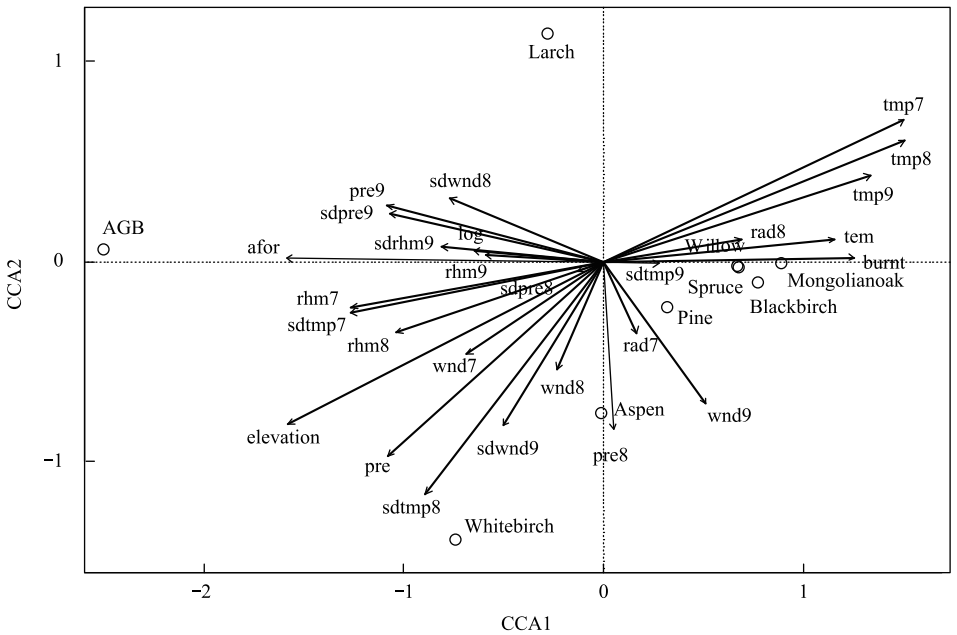

图 6　干扰区域树种水平地上生物量变化与环境因子之间的关系

Fig.6　The relationship between species-level biomass change and environment factors in disturbed area

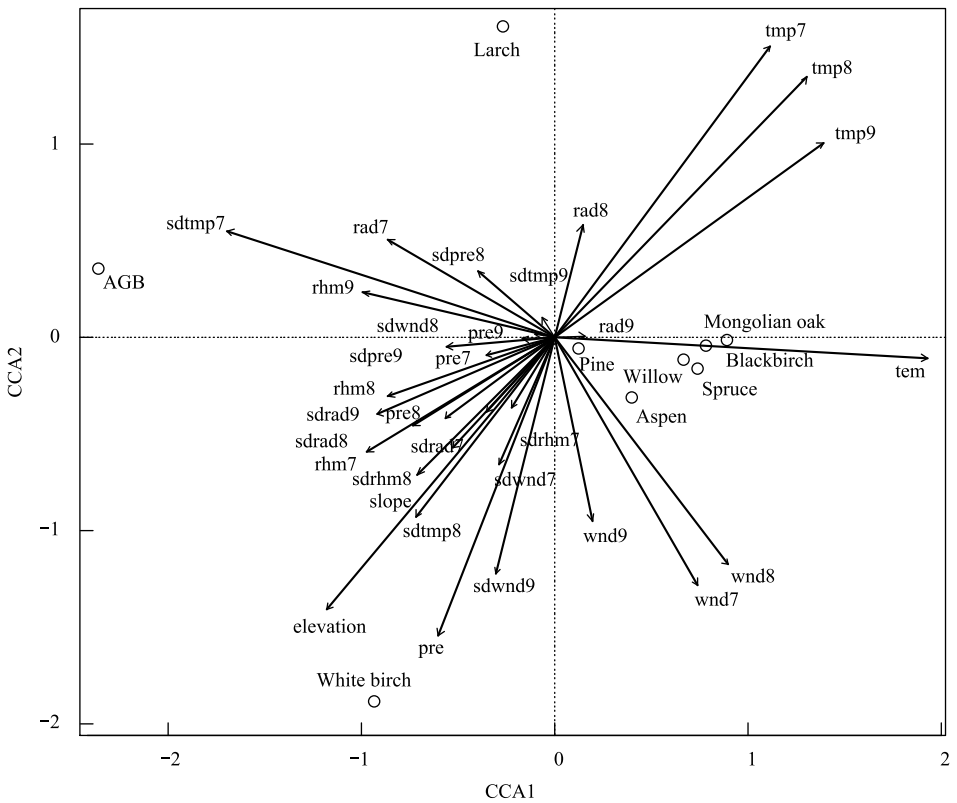

图 7　非干扰区域树种水平地上生物量变化与环境因子之间的关系

Fig.7　The relationship between species−level biomass change and environment factors in undisturbed area

红色变量的解释见图 6 注释

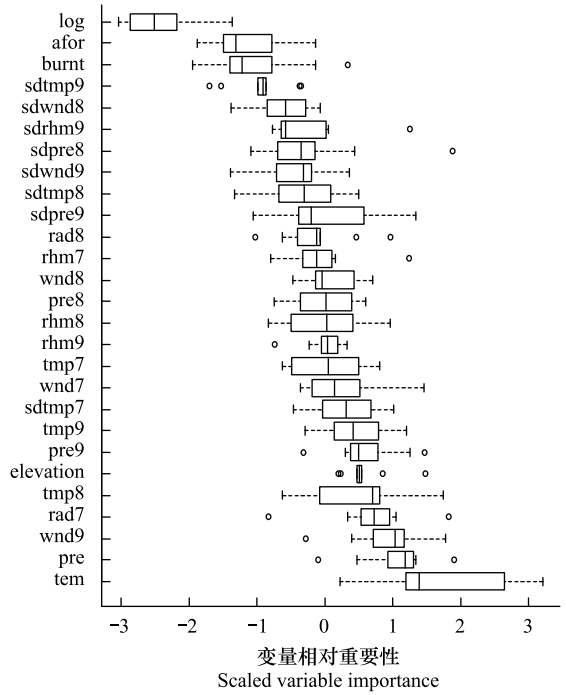

图 8 Random forests 方法计算的干扰区域解释变量对于树种水平地上生物量变化的相对重要性

Fig.8 Scaled important values of explanatory variables related to species-level biomass from the random forests model in the disturbed area

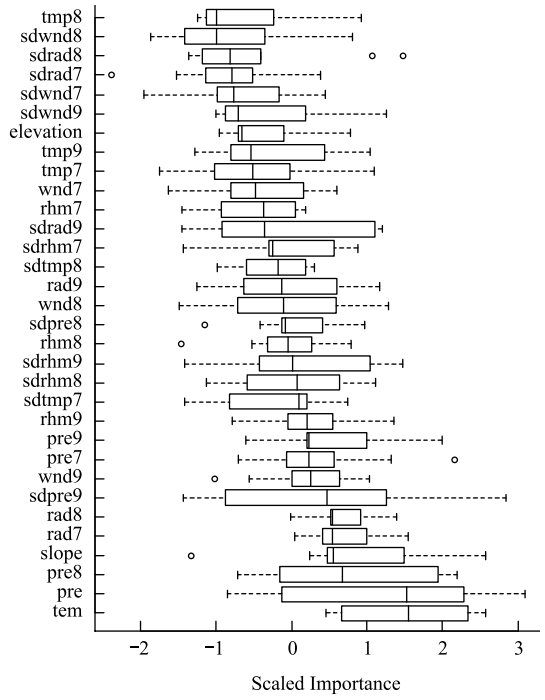

图 9 Random forests 方法计算的非干扰区域解释变量对于树种水平地上生物量变化的相对重要性

Fig.9 Scaled important values of explanatory variables related to species-level biomass from the random forests model in the undisturbed area

3 讨论

3.1 气候和干扰对树种水平地上生物量的影响

在短时间尺度上,气候要素通过作用于各种干扰因素来直接改变树种水平地上生物量;在长时间尺度上,气候要素将使树种的生理状况发生改变,影响树种的建群生长速率,进而改变区域植被的演替轨迹[22-23]。树种水平地上生物量差异是气候要素在不同时间尺度上与森林生态系统相互作用的结果[7, 24-25]。本研究以树种水平地上生物量的变化为响应变量更能反映出短时间内气候因素对树种水平地上生物量的影响。Zhang 等[9]将 MODIS 数据和 GLAS 数据相结合估算了整个东北地区 2000—2010 年期间的森林地上生物量,并分析了东北地区森林地上生物量变化的主要驱动因子,指出气候因子对短期内森林地上生物量的变化具有很大的贡献,尤其是年平均气温和降水。程肖侠和延晓冬[26]模拟了气候变化对东北地区主要林型的影响,发现气候增暖会使东北主要森林类型的生产力降低,使占优势的针叶树种比例降低,阔叶树种比例增加。在我们的研究中,随着温度的升高,阔叶树种(蒙古栎、黑桦和杨树等)生物量增加量明显提高,而优势树种落叶松和白桦的生物量增加量下降,总的森林地上生物量的增加量却呈现出了下降的趋势,我们的研究结果与这些类似的研究具有一致性。这预示着如果未来研究区的气候变暖,研究区的优势树种将会逐渐发生变化,而这一过程中的某个阶段森林生态系统的生产力可能会出现下降。

研究表明林火是引起北方森林动态变化的主要驱动力,在气候变暖背景下,增强的林火干扰可能引起北方森林中占优势的针叶树种的生物量减少,落叶阔叶树种生物量增加,进而影响森林演替的轨迹[27-31]。我们的研究表明温度与林火发生频率以及蒙古栎、黑桦等阔叶树种地上生物量的变化量均具有很强的正相关性(图 6),这一点与前人的研究结果是一致的[32]。尽管林火、采伐等干扰因素会造成短时期内树种水平地上生

物量的急剧下降[8, 14, 33-35],但是我们的研究结果发现,2000—2010 年期间黑龙江大兴安岭气候要素的差异(如温度、降水、辐射、风速和相对湿度等)对于树种水平地上生物量变化量的相对重要性要明显高于林火和采伐(图 8)。我们认为以下 3 个方面的因素可以用来解释这一现象。首先,林火的发生概率以及林木的生长速率与气候要素密切相关。气温升高会导致森林的相对湿度降低,从而导致短期内可燃物累积速率加快,进而会使林火高发季节可燃物更加干燥从而更易引发火灾;气温升高还会导致树种组成的变化,使阔叶树种比例增加,针叶树种比例降低[30]。从某种意义上可以说气候因素决定了林火的发生概率和植被的分布类型[29, 36-37]。其次,自 1998 年天然林保护工程实施以来,黑龙江大兴安岭的采伐强度不断下降[38],采伐方式也由原来的皆伐向择伐和抚育伐等方式转变,采伐对树种水平地上生物量的影响大为减弱,2000 年以来该区森林总体上处于一个恢复的过程,年均采伐面积仅占研究区森林总面积的 0.2%。第三,长期以来我国实行了严格的森林防火灭火政策,虽然不能完全避免林火对森林生态系统造成的损失,大大减轻了林火对森林生态系统的影响[39]。例如,根据胡海清等[40-41]人的研究,2000—2010 年间黑龙江大兴安岭林地年均过火面积为 4.87×10^4 hm^2,约占研究区森林总面积的 0.72%,因火灾造成的乔木年均碳损失量为 53.6×10^4 t,相较于 1980—1999 年林地年均过火面积(8.53×10^4 hm^2)和碳损失量(152×10^4—239×10^4 t)均有明显的降低,这与 2000 年以来更为严格的森林防火灭火政策密切相关。

20 世纪 90 年代中期之前,我国森林资源管理政策一直以如何更好的开发和利用森林资源为主要目标,长期的采伐使研究区森林资源质量出现了严重的下降,除自然保护区外,中幼林构成了整个森林景观的整体[42-43]。自 1998 年“天然林保护工程”实施以来,黑龙江大兴安岭的森林采伐强度有了逐年下降,每年采伐量由天然林保护工程实施之前的 330×10^4 m^3下降到 2010 年的 146×10^4 m^3,采伐对森林地上生物量影响逐渐降低,天保工程区森林资源恢复增长尤为明显[44-45]。这与本研究估算的 2000—2015 年期间森林地上生物量变化趋势以及年度采伐量的变化趋势是一致的。2015 年 4 月随着国家天然林全面禁伐政策的实施,林火对树种水平生物量变化的相对重要性将进一步增强。我国长期以来实行的森林灭火政策,虽然在短期内减轻了林火对森林生态系统树种组成和的影响,但是长远来看,可能会导致森林可燃物的大量累积,更容易引发灾难性的森林火灾[46]。

3.2　本研究的局限性

林火、采伐和造林是造成树种水平地上生物量在短时间内急剧变化的主要因素,其他因素例如病虫害、风灾、干旱和雪冰雹等,也会对树种水平地上生物量的变化造成影响,但是这种影响相对较小[47-48],本研究并没有把这些因素包含在内。然而在本研究中用到的气象因子,在一定程度上反映了这些干扰因子对树种水平地上生物量的影响。例如风速在一定程度上反映了风干扰对树种水平地上生物量变化的影响,降水和温度在一定程度上代表了干旱对树种水平地上生物量的影响。有研究表明,海拔、相对湿度、降水和温度与落叶松毛虫的发生密切相关[49],后续应对这类干扰事件对树种生物量的影响进行进一步的探讨。

由于受遥感数据空间分辨率、时相及同物异谱和同谱异物现象的影响,采用遥感手段对干扰事件及森林属性误判是不可避免的[20,50-55]。由于 MODIS 数据空间分辨率较为粗糙,未来需结合更高空间分辨率的遥感影像(如 Landsat)对发生在更精细尺度上的干扰事件进行探测,并据此进一步分析其对森林生态系统的影响。

4　结论

本研究估算了黑龙江大兴安岭 2000—2010 年树种水平地上生物量的变化,并将气候和干扰因素与树种水平地上生物量相结合,分析了气候因子和干扰因子对树种水平地上生物量变化的影响和相对重要性。研究结果表明:2000—2015 年期间,研究区总的森林地上生物量增加了 8.9%(0.41×10^8 t),其中 2010—2015 年期间地上生物量的增加速度要明显高于 2000—2010 年;地上生物量增加最多的树种为白桦,与 2000 年相比生物量增加了 0.40×10^8 t,其次为樟子松、山杨和蒙古栎;地上生物量下降最多的树种是落叶松,与 2000 年相比下降了 0.08×10^8 t;柳树和云杉的地上生物量基本上没有变化;林火、采伐和造林等森林干扰均对树种水平地

上生物量影响显著,林火对树种水平地上生物量的影响要高于造林和采伐;气候因子对于树种水平地上生物量的变化表现出了较干扰因子更强的作用,温度增加会导致阔叶树种的比例增加,传统优势树种的比例降低,总的森林地上生物量降低。气候因子除直接影响树种的生长和建群概率外,还通过影响林火等干扰因素的发生间接影响了森林演替的动态。

参考文献(References):

[1] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science, 2008, 320(5882): 1444-1449.

[2] Houghton R A, Hall F, Goetz S J. Importance of biomass in the global carbon cycle. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(G2): G00E03.

[3] Führer E. Forest functions, ecosystem stability and management. Forest Ecology and Management, 2000, 132(1): 29-38.

[4] Dale V H, Joyce L A, McNulty S, Neilson R P, Ayres M P, Flannigan M D, Hanson P J, Irland L C, Lugo A E, Peterson C J, Simberloff D, Swanson F J, Stocks B J, Wotton B M. Climate Change and Forest Disturbances: climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. BioScience, 2001, 51(9): 723-734.

[5] Gustafson E J, Shvidenko A Z, Sturtevant B R, Scheller R M. Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia. Ecological Applications, 2010, 20(3): 700-715.

[6] Du H B, Liu J, Li M H, Buntgen U, Yang Y, Wang L, Wu Z F, He H S. Warming-induced upward migration of the alpine treeline in the Changbai Mountains, northeast China. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1256-1266.

[7] Liang Y, Duveneck M J, Gustafson E J, Serra-Diaz J M, Thompson J R. How disturbance, competition, and dispersal interact to prevent tree range boundaries from keeping pace with climate change. Global Change Biology, 2018, 24(1): e335-e351.

[8] Li X N, He H S, Wu Z W, Liang Y, Schneiderman J E. Comparing effects of climate warming, fire, and timber harvesting on a boreal forest landscape in northeastern China. PLoS One, 2013, 8(4): e59747.

[9] Zhang Y Z, Liang S L. Changes in forest biomass and linkage to climate and forest disturbances over Northeastern China. Global Change Biology, 2014, 20(8): 2596-2606.

[10] Savage S L, Lawrence R L, Squires J R. Predicting relative species composition within mixed conifer forest pixels using zero-inflated models and Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 2015, 171: 326-336.

[11] Beaudoin A, Bernier P Y, Guindon L, Villemaire P, Guo X J, Stinson G, Bergeron T, Magnussen S, Hall R J. Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through *k*NN and MODIS imagery. Canadian Journal of Forest Research, 2014, 44(5): 521-532.

[12] Wilson B T, Lister A J, Riemann R I. A nearest-neighbor imputation approach to mapping tree species over large areas using forest inventory plots and moderate resolution raster data. Forest Ecology and Management, 2012, 271: 182-198.

[13] Zhang Q L, He H S, Liang Y, Hawbaker T J, Henne P D, Liu J X, Huang S L, Wu Z W, Huang C. Integrating forest inventory data and MODIS data to map species-level biomass in Chinese boreal forests. Canadian Journal of Forest Research, 2018, 48(5): 461-479.

[14] 罗旭, 王聿丽, 张金茎. 气候变化和林火干扰对大兴安岭林区地上生物量影响的动态模拟. 应用生态学报, 2018, 29(3): 713-724.

[15] Fang L, Yang J, Zu J X, Li G C, Zhang J S. Quantifying influences and relative importance of fire weather, topography, and vegetation on fire size and fire severity in a Chinese boreal forest landscape. Forest Ecology and Management, 2015, 356: 2-12.

[16] 徐化成. 中国大兴安岭森林. 北京: 科学出版社,1998.

[17] Zald H S J, Ohmann J L, Roberts H M, Gregory M J, Henderson E B, McGaughey R J, Braaten J. Influence of lidar, Landsat imagery, disturbance history, plot location accuracy, and plot size on accuracy of imputation maps of forest composition and structure. Remote Sensing of Environment, 2014, 143: 26-38.

[18] Mao D H, Wang Z M, Luo L, Ren C Y. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 528-536.

[19] Pouliot D, Latifovic R, Fernandes R, Olthof I. Evaluation of annual forest disturbance monitoring using a static decision tree approach and 250 m MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8): 1749-1759.

[20] Sulla-Menashe D, Kennedy R E, Yang Z Q, Braaten J, Krankina O N, Friedl M A. Detecting forest disturbance in the Pacific Northwest from MODIS time series using temporal segmentation. Remote Sensing of Environment, 2014, 151: 114-123.

[21] 国务院. 森林采伐更新管理办法. 北京: 林业部, 1987.

[22] 王纪军, 裴铁璠. 气候变化对森林演替的影响. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1722-1730.

[23] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71-78.

[24] 肖辉林. 森林衰退与全球气候变化. 生态学报, 1994, 14(4): 430-436.

[25] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
[26] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国东北主要森林类型的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 534-543.
[27] Tautenhahn S, Lichstein J W, Jung M, Kattge J, Bohlman S A, Heilmeier H, Prokushkin A, Kahl A, Wirth C. Dispersal limitation drives successional pathways in Central Siberian forests under current and intensified fire regimes. Global Change Biology, 2016, 22(6): 2178-2197.
[28] 李晓娜, 贺红士, 吴志伟, 梁宇. 大兴安岭北部森林景观对气候变化的响应. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3227-3235.
[29] 杨光, 舒立福, 邸雪颖. 气候变化影响下大兴安岭地区 21 世纪森林火险等级变化预测. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3236-3242.
[30] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国大兴安岭森林演替动态的影响. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1277-1284.
[31] 罗旭, 贺红士, 梁宇, 吴志伟, 黄超, 张庆龙. 林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究. 生态学报, 2016, 36(4): 1104-1114.
[32] 冷文芳, 贺红士, 布仁仓, 胡远满. 气候变化条件下东北森林主要建群种的空间分布. 生态学报, 2006, 26(12): 4257-4266.
[33] 李月辉, 胡远满, 常禹, 徐崇刚, 李秀珍, 布仁仓, 贺红士. 大兴安岭呼中林业局森林景观格局变化及其驱动力. 生态学报, 2006, 26(10): 3347-3357.
[34] 罗旭. 林火和采伐对大兴安岭森林地上生物量预测的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
[35] 徐文茹, 贺红士, 罗旭, 黄超, 唐志强, 刘凯, 丛毓, 谷晓楠, 宗盛伟, 杜海波. 停止商业性采伐对大兴安岭森林结构与地上生物量的影响. 生态学报, 2017, 38(4): 1203-1215.
[36] 杨志香. 气候变化对我国兴安落叶松天然林地理分布及生产力的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
[37] 蔡文华. 气候变化下大兴安岭火干扰对森林演替及 NPP 的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
[38] 大兴安岭地区行署统计局. 大兴安岭统计年鉴 2012. 大兴安岭: 大兴安岭地区行署统计局, 2012.
[39] 魏书精, 胡海清, 孙龙, 周汝良. 气候变化背景下我国森林防火工作的形势及对策. 森林防火, 2011, (2): 1-4.
[40] 胡海清, 魏书精, 孙龙. 大兴安岭 2001-2010 年森林火灾碳排放的计量估算. 生态学报, 2012, 32(17): 5373-5386.
[41] 胡海清, 孙龙, 国庆喜, 吕新双. 大兴安岭 1980-1999 年乔木燃烧释放碳量研究. 林业科学, 2007, 43(11): 82-88.
[42] 侯振宏, 张小全, 肖文发. 中国森林管理活动碳汇及其潜力. 林业科学, 2012, 48(8): 11-15.
[43] 张佩昌. 试论天然林保护工程. 林业科学, 1999, 35(2): 124-131.
[44] 屈红军, 朱颖, 张忠林, 孟庆彬. 我国天然林保护工程一期实施效果概述. 林业科技开发, 2012, 26(6): 5-8.
[45] 魏亚伟, 周旺明, 于大炮, 周莉, 方向民, 赵伟, 包也, 孟莹莹, 代力民. 我国东北天然林保护工程区森林植被的碳储量. 生态学报, 2014, 34(20): 5696-5705.
[46] 刘志华, 常禹, 贺红士, 胡远满, 王文娟. 模拟不同森林可燃物处理对大兴安岭潜在林火状况的影响. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1462-1469.
[47] 郭笑怡. 中国东北森林干扰遥感研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
[48] 陈宏伟, 胡远满, 常禹, 布仁仓, 贺红士, 刘淼, 刘志华, 韩文权. 落叶松毛虫对大兴安岭呼中林区森林的景观长期影响模拟. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1090-1096.
[49] 于跃. 大兴安岭林区落叶松毛虫发生的影响因子分析[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2016.
[50] Hawbaker T J, Vanderhoof M K, Beal Y J, Takacs J D, Schmidt G L, Falgout J T, Williams B, Fairaux N M, Caldwell M K, Picotte J J, Howard S M, Stitt S, Dwyer J L. Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. Remote Sensing of Environment, 2017, 198: 504-522.
[51] White J C, Wulder M A, Hermosilla T, Coops N C, Hobart G W. A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series. Remote Sensing of Environment, 2017, 194: 303-321.
[52] Guindon L, Bernier P Y, Beaudoin A, Pouliot D, Villemaire P, Hall R J, Latifovic R, St-Amant R. Annual mapping of large forest disturbances across Canada′s forests using 250 m MODIS imagery from 2000 to 2011. Canadian Journal of Forest Research, 2014, 44(12): 1545-1554.
[53] Zhu Z, Woodcock C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. Remote Sensing of Environment, 2014, 144: 152-171.
[54] Zhao F, Huang C Q, Zhu Z L. Use of vegetation change tracker and support vector machine to map disturbance types in greater yellowstone ecosystems in a 1984-2010 landsat time series. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(8): 1650-1654.
[55] Beaudoin A, Bernier P Y, Villemaire P, Guindon L, Guo X J. Tracking forest attributes across Canada between 2001 and 2011 using a k nearest neighbors mapping approach applied to MODIS imagery. Canadian Journal of Forest Research, 2018, 48(1): 85-93.