

长白山东坡植被指数变化及其对气候变化的响应*

于健^{1,2} 刘琪璟^{1**} 徐倩倩³ 罗春旺¹ 王红梅² 李俊清¹

¹北京林业大学林学院省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 北京 100083

²江苏农林职业技术学院风景园林系 句容 212400

³中国农业科学院郑州果树研究所 郑州 450009

摘要 长白山地处温带针阔混交林的中心地带,对气候变化较为敏感。因此,探讨长白山区落叶松 (*Larix olgensis*) 树轮宽度和森林归一化植被指数 (NDVI) 与气候因子的关系,对于了解全球气候变暖背景下陆地生态系统的响应具有重要意义。以长白山自然保护区东坡为研究地点,利用东坡落叶松树轮宽度指数和选取1982-2006年UMD GIMMS NDVI数据及天池气候数据,在分析树轮宽度及NDVI与气候因子关系的基础上,重点探讨长白山东坡落叶松径向生长与NDVI之间的关系,并利用多元回归分析建立落叶松树轮指数与气候因子及年生物量生长量与NDVI的模拟回归方程。结果显示:(1)1957年以来该区温度呈极显著上升趋势,冬季升温最为显著,降水呈微弱下降趋势。(2)1982-2006年年均、夏季和生长季NDVI均呈缓慢下降趋势。(3)长白落叶松年表特征分析表明其生长对气候敏感,适用于进行年轮气候学分析。(4)NDVI与月平均温度相关性较强,且多以正相关为主,与月降水量多为负相关性。(5)落叶松径向生长受当年生长季的气候因子的影响强于上年,但是显著相关的月份略有差异,并且降水的影响要优于温度。(6)落叶松树轮宽度和年生物量生长量与NDVI以负相关为主,生长季NDVI与树轮年表相关性较差,而非生长季NDVI与年表相关性较好。(7)林分单位面积地上生物量为240.72 t/hm²,2009年林分生物量生长量约为2.91 t/hm² a⁻¹,即每公顷每年固碳约1.46 t,表明该地区老龄落叶松林仍具有较强的固碳能力。综上所述,在长白山地区,长时间序列的年轮宽度数据并不能很好地反映NDVI的长时期变化,利用树轮宽度指数重建该区NDVI有待进一步研究。图9表2参43

关键词 树轮宽度;气候变暖;落叶松;NDVI;年生物量生长量

CLC Q948.112(23)

Variation of vegetation index in response to climate change on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China*

YU Jian^{1,2}, LIU Qijing^{1**}, XU Qianqian³, LUO Chunwang¹, WANG Hongmei² & LI Junqing¹

¹Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

²Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China

³Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450009, China

Abstract Changbai Mountain is located in the heartland of the temperate coniferous and broadleaved mixed forest, which is sensitive to climate change. Studying how the tree-ring width of *Larix olgensis* and forest NDVI in the Changbai Mountain are related to climatic factors could lead to better understanding of the responses of the terrestrial ecosystem in the background of global climate warming. In this work, the tree-ring width index of *L. olgensis* in the eastern slope of Changbai Mountain, UMD GIMMS NDVI from 1982 to 2006, and the weather data of Tianchi were selected to analyze the relationships between the tree-ring width and NDVI and climatic factors, and to find out the relationship between radial growth of *L. olgensis* and NDVI in the eastern slope of Changbai Mountain. The simulated regression equations of the tree-ring index of *L. olgensis* and climatic factors, of biomass increment and NDVI, were established by multiple regression analytical method. The results were as follows: 1. Since 1957, the temperature of the region studied was in a highly significant rising trend, with winter temperatures changing most remarkably; but precipitation was in a weak downward trend. 2. From 1982 to 2006, NDVI of annual average, summer, and growing season decreased slowly. 3. The analysis of chronology characteristics of *L. olgensis* in Changbai Mountain showed that growth of *L. olgensis* was sensitive to the climate, thus applicable for ring climate analysis. 4. NDVI was strongly related to monthly average temperature with a positive correlation, but was negatively related to monthly precipitation. 5. Radial growth of *L. olgensis* was more strongly influenced by climatic factors in the growing season of the current year than that of the previous year, with different period of significant correlation, and higher impact of precipitation than temperature. 6.

收稿日期 Received: 2014-08-09 接受日期 Accepted: 2014-10-20

*国家林业公益性行业科研专项项目(200804001)资助 Supported by the Special Research Program for Forestry Welfare of China (200804001)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: liuqijing@gmail.com)

The tree-ring width and biomass increment of *L. olgensis* were mainly negatively correlated with NDVI. NDVI in the growing season was poorly correlated to tree-ring chronology, but NDVI outside growing season was well correlated to the chronology. The stand aboveground biomass was 240.72 t/hm² per unit area now, and the stand biomass increment was about 2.91 t hm⁻² a⁻¹ in 2009, which means about 1.46 t carbon sequestration per hectare per year. It indicated that forest of old *Larix olgensis* in the region still had a strong capacity of carbon sequestration. In summary, ring width data of long time is not adequate to reflect the variation trend of NDVI in the Changbai Mountain. Further study on the regional NDVI redevelopment is needed.

Keywords tree-ring width; climate warming; *Larix olgensis*; NDVI; annual biomass increment

我国东北地区是20世纪增温最显著的地区之一^[1]。随着东北地区气温上升和降水量减少,该区气候逐渐呈现显著的暖干化趋势,且极端温度和降水的出现频率也显著增加^[2]。植被是陆地生态系统的重要组成部分,与地理环境关系极为密切,植被的变化可以准确反映土地覆盖的变化。作为气候变化的指示器,植被变化已成为全球气候变化研究的重要内容^[3]。探讨植被动态变化有助于揭示气候变暖对陆地生态系统的影响,为分析、预测未来气候变暖条件下植物的响应策略提供依据。

树木年轮资料由于定年准确、分辨率高、样本分布广泛和易于获取、时间序列长以及记录了树木长期径向生长的丰富信息等特点,近年来在评估过去气候变化已被广泛应用^[4]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够精确地反映植被的覆盖度、生长状况和光合作用,已被公认为表征植被生长状态的有效参数,常用于森林生长动态监测和净初级生产力估算等^[5]。但NDVI数据时间序列有限,无法满足在长时间尺度上研究植被变化的要求,如果树轮指数能够指示NDVI的变化,那么长时间序列的树轮指数将弥补NDVI数据在植被长期变化研究中的不足。目前已有很多学者对NDVI与树轮指数的关系进行了研究,已有的研究主要集中在中、高纬度和海拔地区: Berner等研究发现加拿大和俄罗斯高纬度地区1982-2008年夏季森林NDVI值与树木年轮宽度呈正相关^[6], D'Arrigo等研究发现美国北部地区树轮的最大晚材密度与NDVI呈显著相关^[7];国内学者在该方面也开展了尝试性工作,王文志等利用祁连山树轮宽度指数重建了1843-2003年间该区生长季的NDVI变化曲线^[8],王瑞丽等研究了北亚热带马尾松年轮宽度与1982-2006年NDVI的关系^[9],何吉成等研究了漠河7种树轮指数与森林NDVI的相关关系^[10],何吉成等研究了石羊河上游地区树轮年表与1982-2006年逐月NDVI的关系^[11]。

长白山地处我国北方中高纬度,属于典型的温带大陆性季风气候区,是我国气候变化最剧烈的地区之一^[12]。以往在该区就树轮指数和植被指数之间关系的研究较少,大多数学者是将二者独立展开研究。例如侯光雷等研究了长白山植被生长季NDVI时空变化及其对气候因子敏感性^[3],南颖等对2000-2008年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应进行了研究^[13],吴祥定等建立了上限落叶松(*Larix olgensis*)年轮轮宽指数与气候因子的回归方程并定量分析了气候变暖对树木生长量的影响^[14],邵雪梅等分析了长白山森林上线落叶松年轮与气候的关系并重建了长白山过去339年1-4月均最高气温^[12],于大炮等研究了长白山北坡森林上限和下限落叶松与

气候因子的关系^[15]。以往有关树轮气候学的研究均基于北坡。与北坡具有完整的温带地区植被垂直分布不同,东坡无明显的垂直分布。该区受人类干扰少,是开展植被、树轮宽度和气候关系三者关系研究的天然实验室,但是目前在有关三者关系的研究工作尚未见报道。

因此,本研究将采样点设置在无明显垂直植被带的长白山东坡地区,采用落叶松年轮宽度指数与1982-2006年森林逐月NDVI数据及气候数据进行相关分析,对落叶松年轮宽度指数与NDVI二者之间的关系进行探讨,旨在为研究长白山区树木年轮与森林植被指数的关系奠定基础。

1 材料与方法

1.1 样品的采集和数据处理

长白山(41°23' N-42°36' N, 126°55' E-129°08' E)位于我国东北吉林省东南部中朝交界处,为我国乃至全球自然生态系统保存最为完整的地区之一,总面积约为 2.2×10^5 hm²。研究地点位于长白山东坡自然保护区圆池附近(128°15' E, 42°03' N, 海拔1 451 m),该地区受人为干扰较少并且群落结构特征明显。土壤为棕色针叶林土。气候特征为受季风影响的温带大陆性季风气候,春季多大风,夏季温暖多雨,秋季凉爽多雾,冬季寒冷漫长,温度与降水四季变化明显,年平均温度3.68℃,年平均降水量815 mm。

长白山东坡植被垂直分布规律不如北坡完整和明显。受火山喷发的影响,东坡自山底到山上林线处(海拔约2 000 m)均为长白落叶松林^[16]。落叶松为该地区优势树种,林分为落叶松纯林,混有少量的白桦(*Betula platyphylla*)。林分株数密度为1 057株/hm²,林分平均年龄170年,平均胸径29.0 cm,平均树高24.0 m。林下灌木主要有长白蔷薇(*Rosa koreana*)、宽叶杜香(*Ledum palustre* var. *dilatatum*)、蓝靛果忍冬(*Lonicera edulis*)、毛脉忍冬(*Lonicera nigra* var. *barbinervis*)、越桔(*Vaccinium vitis-idaea*)等。林下草本主要有蓝果七筋菇(*Clintonia udensis*)、林奈草(*Linnea borealis*)、毛蕊老鹳草(*Geranium eriostemon*)、毛缘苔草(*Carex pilosa* var. *pilosa*)、细叶苔草(*Carex duriuscula*)、全叶山芹(*Ostericum maximowiczii*)等,苔藓层发达。

1.2 树轮资料和年表建立

严格依据国际树轮数据库(International Tree-ring Data Bank, ITRDB)标准,于2010年7-8月在长白山东坡利用生长锥进行野外采样。采样地点平缓,随机选取91株位于上层林冠、生长健康的长白落叶松,以每棵树钻取一根年轮样芯的采样策略在胸径(1.3 m)处取样,共获得91株年轮样芯。将取样后

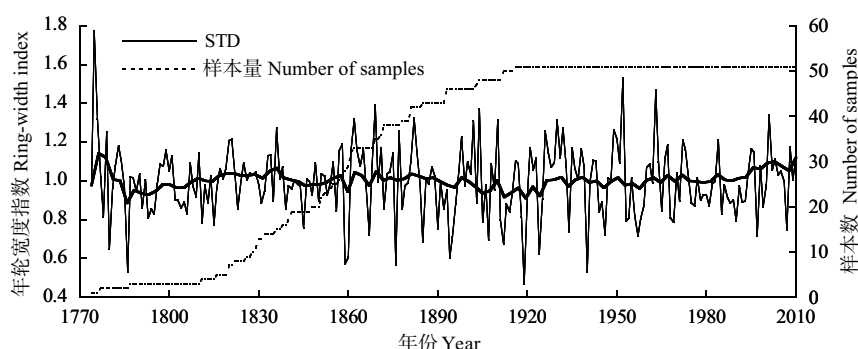


图1 落叶松差值年表。

Fig. 1 Residual chronology of *Larix olgensis*.

的样芯装入自制纸筒内,并记录相应编号及树木的胸径、皮厚和树皮开裂深度等信息。样芯带回实验室后按照国际通用方法进行预处理^[17],待样芯自然干燥后将其固定于自制木槽内并先后分别使用300目和600目的砂纸对其进行打磨,直至显微镜下能够清晰分辨树轮界限为止。

利用Lintab 6.0树轮宽度测量仪(精度0.01 mm)量测年轮样芯宽度,并结合COFECHA程序^[18]进行交叉定年检验,剔除其中年代较短、与主序列序列相关性较差和难以交叉定年的序列(共计40根),最终有51根树轮样芯通过检验进入主序列,用于建立年表。年表建立是通过计算机程序ARSTAN^[19]完成的。以2/3年龄作为步长的样条函数法去除树木本身的遗传因子和干扰竞争产生的生长趋势,最终得到长白落叶松3类年表,分别是标准年表、差值年表(图1)和自回归年表。

1.3 生物量生长量

2010年8月在长白山东坡长白落叶松林建立了一块1 hm²的样地,对样地内所有林木(胸径≥5 cm)进行每木检尺,记录林内乔木层全部树木的树种名称、胸径和树皮厚度。由于样地内树种主要为落叶松,伴生树种所占比例很小(生物量约占2%),因此在计算林分尺度的相关数据时,均参照落叶松的相关公式计算。利用已通过交叉定年的51根年轮样芯的宽度数据,结合样地调查和历史资料,树高曲线方程参考黑龙江省绥棱林业局立木材积表[落叶松树高计算公式: $H = 1.3 + 29.97114 \times e^{-14.56468/D}$,式中, H 为树高(m), D 为胸径(cm)]。拟合的落叶松地上生物量方程为 $B = 6.3789 - 3.3579D + 0.5800D^2 - 0.0011D^3$ ($R = 1, P < 0.01$),式中, B 为落叶松生物量(kg); D 为胸径(cm),并计算生物量生长量 $[W_n = B_n - B_{n-1}]$,式中, W_n 为第 n 年的生物量生长量(kg), B_n 为第 n 年的单株落叶松生物量(kg), B_{n-1} 为第 $n-1$ 年的单株落叶松生物量(kg)。将这些年轮样芯的相对应生理年龄的生物量生长量平均,得到落叶松连年的年均生物量生长量,绘制落叶松年份-年均生物量生长量图。计算年均生物量生长量时,使用的是没有经过去除生长趋势的年轮宽度数据,由于生物量是二维尺度(即断面积)上的树木生长指标,相关研究表明断面积的年生长量与树木的年龄变化关系不大,在气候分析中,不需要进行去趋势、标准化处理^[20]。

1.4 气象数据

本研究所用气候资料源于距离采样点最近且在同一气候区的天池气象站(编号:54287;地理坐标:42°01'N,

128°05'E, H 2 623.0 m)(图2)。气象数据由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供。采用Kendall方法^[21]检查了时间序列的气象数据是否存在突变点,用Double-mass方法^[22]检查序列的非随机趋势变化。经过检验确认气象数据可靠,气温和降水数据资料变化相对均一,该站气象数据可用来代表气候的基本特征。数据包括1957-2009年完整的月平均温度(T_m)、月降水量(P_m)、月平均最高温度(T_{max})和月平均最低温度(T_{min})。选取1982-2006年42°-43°N、128°-129°E区域的UMD GIMMS NDVI数据。通常认为NDVI值超过0.1表示有植被覆盖,NDVI值越大则植被覆盖率越高。

本研究还选取了帕尔默干旱指数(PDSI)作为气候分析要素之一^[23]。PDSI是反映干湿变化的指数之一,综合了降水和蒸发的影响,是水分亏缺量与持续时间的函数,比降水量更能解释树木在生长期水分供应平衡^[24]。PDSI值越高表明水分供应情况越好,反之越低则表明某一时间越干旱。本研究所用PDSI数据是由Dai提供的2.5个经纬度网格点数据^[25],本研究使用的是区域(42°-43°N、128°-129°E)的数据,时间跨度为1959-2005年。NDVI和PDSI数据均下载自荷兰皇家气象研究所的数据共享网站(<http://climexp.knmi.nl>)。

1.5 数据分析

利用天池气象站观测数据分析近53年来长白山气候特征。以时间作为自变量,气候因子为因变量,建立一元回归模型 $y = at + b$,其趋势变化率方程为 $dy/dx = a$,式中, t 为年份, $a \times 10$ 为气候倾向率,用于定量分析气候序列的趋势变化特征。

由于气候因子对树木径向生长的影响通常存在“滞后效应”,导致树木生长受上年和当年气候因子共同影响。因此本研究选择东岗气象站自1958年起的时间跨度为上年5月到当年9月(共17个月)的气候因子与落叶松差值年表进行相关及响应函数分析,该分析通过DENDROCLIM 2002程序完成^[26]。并通过多元逐步回归分析法建立落叶松差值年表与逐月气候因子的多元回归模型,利用模型模拟落叶松径向生长量变化。由于PDSI序列时间结点为2005年,为了在时间序列上与NDVI数据统一,本研究仅选用1982-2005年间的差值年表数据和气候数据,利用Pearson相关系数来表征NDVI和年轮宽度之间以及NDVI与气候因子之间的相互关系。数据分析在SPSS 18.0中进行,统计的显著性水平取0.05。

2 结果与分析

2.1 区域气候变化的特点

53年以来,研究区呈明显的暖干化趋势:温度呈极显著上升趋势,气候倾向率为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ (图3),达到了0.01的显著性水平.该区年降水量呈现微弱的下降趋势($P>0.05$),以 $19.4\text{ mm}\text{ (10 a)}^{-1}$ 的速率递减.为了解不同季节温度和降水量变化分别对年平均温度上升和年降水量下降的贡献,根据北半球季节划分标准,按季节(春季为3-5月,夏季为6-8月,秋季为9-11月,冬季为12月-翌年2月)分析温度和降水量的变化趋势.该区不同季节平均气温气候倾向率差别较大.各季节气候倾向率分别为春季 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 、夏季 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 、秋季 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 和冬季 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$.发现冬季增温最为明显,其次是春季,两者均达到了0.01极显著性水平,夏季、秋季增温速率达到了0.05显著性水平.该地区各季节降水量气候倾向率差异较大,分别为春季 $4.05\text{ mm}\text{ (10 a)}^{-1}$ 、夏季 $14.54\text{ mm}\text{ (10 a)}^{-1}$ 、秋季 $1.23\text{ mm}\text{ (10 a)}^{-1}$ 和冬季 $0.42\text{ mm}\text{ (10 a)}^{-1}$.夏季降水量减少明显,但各季节降水量变化均没有达到0.05显著性水平.

2.2 树轮年表的基本统计特征

长白落叶松的标准年表及差值年表的统计特征及公共区间分析结果见表1.标准年表和差值年表的统计特征以及公共区间(1882-2010)的分析结果表明,各年表样本总体代表性均高于0.96,说明所选样本能够很好地反映该区域特

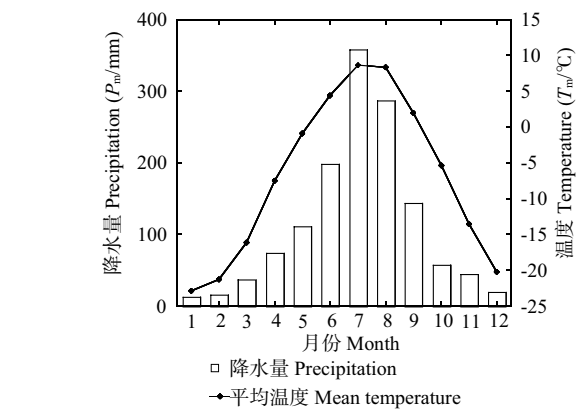


图2 研究区域温度和降水量的月值变化。
Fig. 2 Monthly changes of temperature and precipitation in the study area.

定年龄组树木年轮的基本特征;两个年表第一主分量的解释量均超过44%,进一步表明影响树木生长的因子相对集中或者主要受某些因子的限制.标准年表和差值年表树与树间平均相关系数分别为0.443和0.424,说明各单株间的年轮生长较为一致.平均敏感度度量了相邻年轮之间的轮宽变化情况,主要反映气候的短期变化和高频变化,本研究两个年表的平均敏感度分别为0.160 9和0.189 5.年表的信噪比较高,较好地记录了落叶松生长环境的变化,表明落叶松对本地区环境变化相当敏感.标准差、平均敏感度和样本总体代表性经常被用于判定树轮年表的价值^[27].一般高质量的树轮年表具

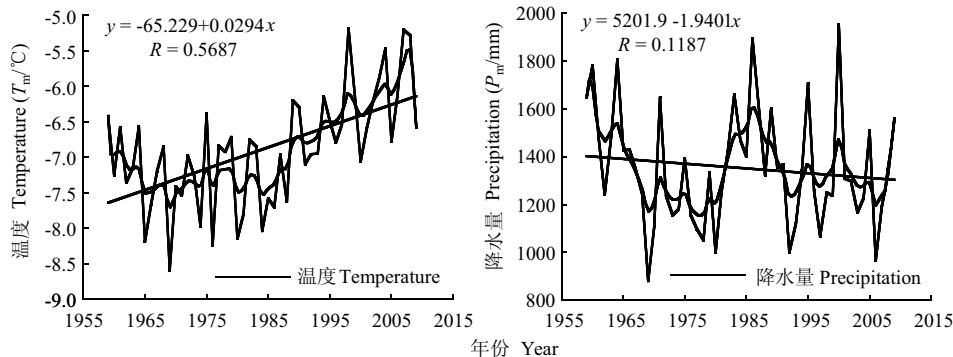


图3 天池气象站年平均温度和降水量的变化。
Fig. 3 Variation of annual mean temperature and precipitation at the Tianchi Meteorological Station.

表1 长白山东坡落叶松差值年表的主要统计特征及公共区间(1882-2010)分析
Table 1 Statistic characteristics and common interval (1882-2010) analysis for residual chronology of *Larix olgensis* in the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China.

统计特征 Statistics	年表类型 Chronology type		
	标准年表 STD	差值年表 RES	自回归年表 ARS
样本株数 Number of stems	51	51	51
平均值 Mean	0.9835	0.9971	0.9893
中位数 Median	0.9709	1.0029	0.9528
平均敏感度 Mean sensitivity	0.1609	0.1895	0.1611
标准差 Standard deviation	0.2348	0.1796	0.2576
一阶自相关系数 Autocorrelation order 1	0.6272	0.0975	0.6775
树间相关系数 Correlation coefficient	0.443	0.424	
样本总体代表性 Expressing population signal	0.971	0.969	
信噪比 Signal-to-noise ratio	33.410	30.899	
第一主成分量 Variation in first eigenvector	46.26%	44.19%	

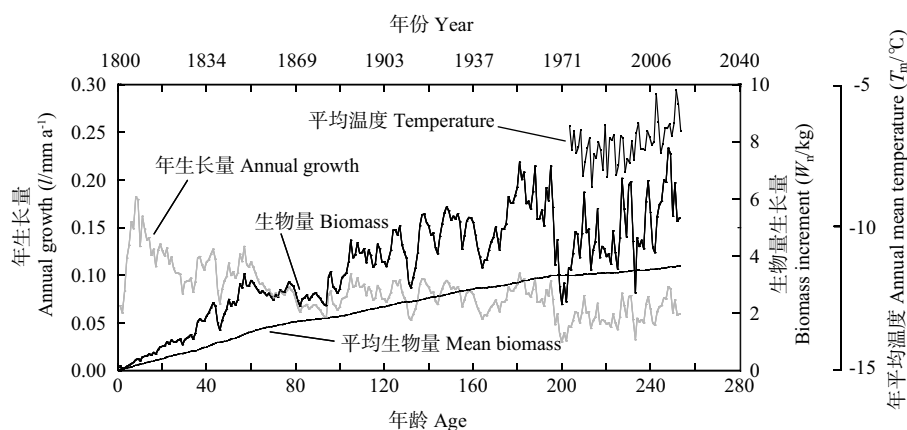


图4 落叶松树轮宽度径向生长曲线和生物量生长过程。

Fig. 4 Growth curves and biomass growing process of *Larix olgensis*.

有平均敏感度大、标准差大、信噪比高等特点^[28]。综合以上分析,所建立的落叶松年表完全满足树轮气候学分析的要求。本研究选用信噪比较高的落叶松差值年表进行气候要素相关及响应分析。

2.3 生物量生长量

挑选10株树龄最长且已经钻至髓心的落叶松样芯分析其树轮宽度和年生物量生长过程,这些年轮样芯的径向生长趋势非常一致,将它们的结果按生理年龄对齐进行累加平均得到具有代表性的长白山东坡落叶松径向生长过程曲线(图4)。落叶松树轮径向生长过程和生物量生长过程基本吻合,在幼龄林时期(0-40年)生长过程较快;中龄林至成熟林阶段(41-140年)生长速度减缓,其原因可能是树木间的竞争所致;而到过熟林阶段(>141年)落叶松生长再次加速,这可能与林分中部分树木枯死导致竞争减弱,以及近年来全球气候变暖有关。落叶松过熟林的快速生长也说明该地区老龄林仍然具有较强的固碳能力。据样地调查数据计算得到林分平均胸径为22.6 cm,株树密度为1 023株/hm²,林分每公顷蓄积量约为376.57 m³。结合拟合的该区地上生物量方程计算得到目前林分单位面积生物量为240.72 t/hm²。近1年直径平均生长量为0.087 cm,单位面积林分生物量生长量约为2.91 t hm⁻² a⁻¹,即每公顷每年固碳约1.46 t。

2.4 近20年研究区NDVI变化

长白山地区的植被生长一般在每年的5-9月。由该区多年平均逐月NDVI的变化趋势(图5)可知,NDVI变化趋势呈单峰型曲线,该区的NDVI值在1-3月和11-12月几乎没有变化,基本维持在全年的低值水平,表明这些时段植被基本不生长。进入4月,NDVI开始生长,由4月的0.325增长到5月的0.561。6-7月内,该区的NDVI处于快速增长期,其值分别为0.768和0.772。8月NDVI达到全年的最高值,为0.782。总体来讲,7、8两月NDVI值最高,植被达到一年中最茂盛的时期。随后植被开始枯萎,NDVI值逐渐下降。基于上述分析和图4可知,长白山区的植被生长主要集中在夏季6-8月。虽然5、9月的NDVI值也较大,但是5月处于植被生长的初始阶段,9月的植被已经基本停止生长。本研究发现,该区树轮采样点的森林NDVI月均值与月平均温度存在极显著正相关($R^2 = 0.819$, $P < 0.01$)。在

年内变化上(图6),该区夏季(6-8月)、生长季(5-9月)和年均NDVI均呈微弱的下降趋势,变化的一致性较好。

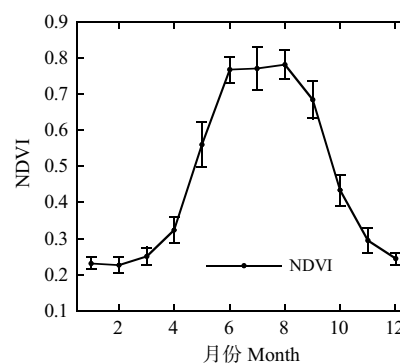


图5 长白山地区NDVI逐月的变化趋势。

Fig. 5 Changes of average monthly NDVI values in Changbai Mountain.

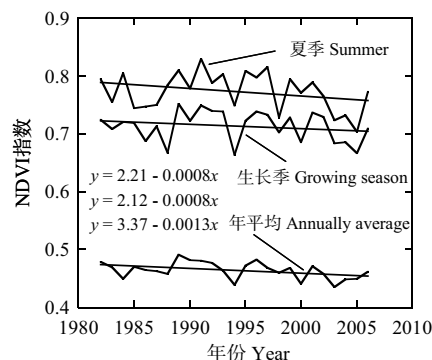


图6 长白山地区夏季(6-8月)、生长季(5-9月)和年均NDVI的年际变化(1982-2006)。

Fig. 6 Interannual variability of NDVI of the summer (Jun. to Aug.), the growing season (May to Sep.) and the average annual NDVI (1982-2006) in Changbai Mountain.

2.5 NDVI月值与气候因子的关系

为了揭示长白山区NDVI与气候因子之间的关系,本文对1982-2006年共24年间12个月份NDVI与同期逐月气候因子(包括月平均温度和月降水量)进行相关分析(图7)。结果

表明, 长白山地区逐月NDVI值与月平均温度相关性较强, 且多以正相关为主, 与月降水量多为负相关性. 总体看来, 该区NDVI与气温的相关性要明显高于与降水之间的相关性, 表明该区植被受气温影响强于降水. 其中, NDVI与当月4月平均温度呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与当月5月平均温度呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 10月降水量与当月NDVI呈显著负相关 ($P < 0.05$).

2.6 径向生长与气候因子的关系

为探讨长白落叶松树轮径向生长的主要限制因子, 本研究利用落叶松差值年表代表其径向生长与逐月气候因子进行了相关及响应函数分析(图8). 相关分析表明, 落叶松径向生长受较多气候因子的限制. 落叶松径向生长与上年6月平均最高温度显著正相关; 与当年2、9月降水量显著正相关; 与上年6、7月PDSI显著负相关, 与当年8、9月PDSI显著正相关. 落叶松径向生长与月平均温度和月平均最低温度均未达到显

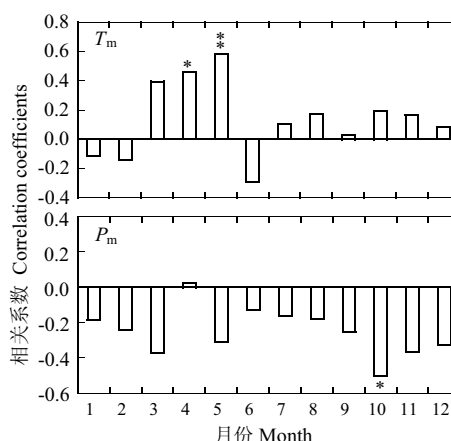


图7 1981-2001年内逐月NDVI与气候因子的相关系数.
Fig. 7 Correlation coefficients between monthly NDVI and climatic factors (1981-2001).

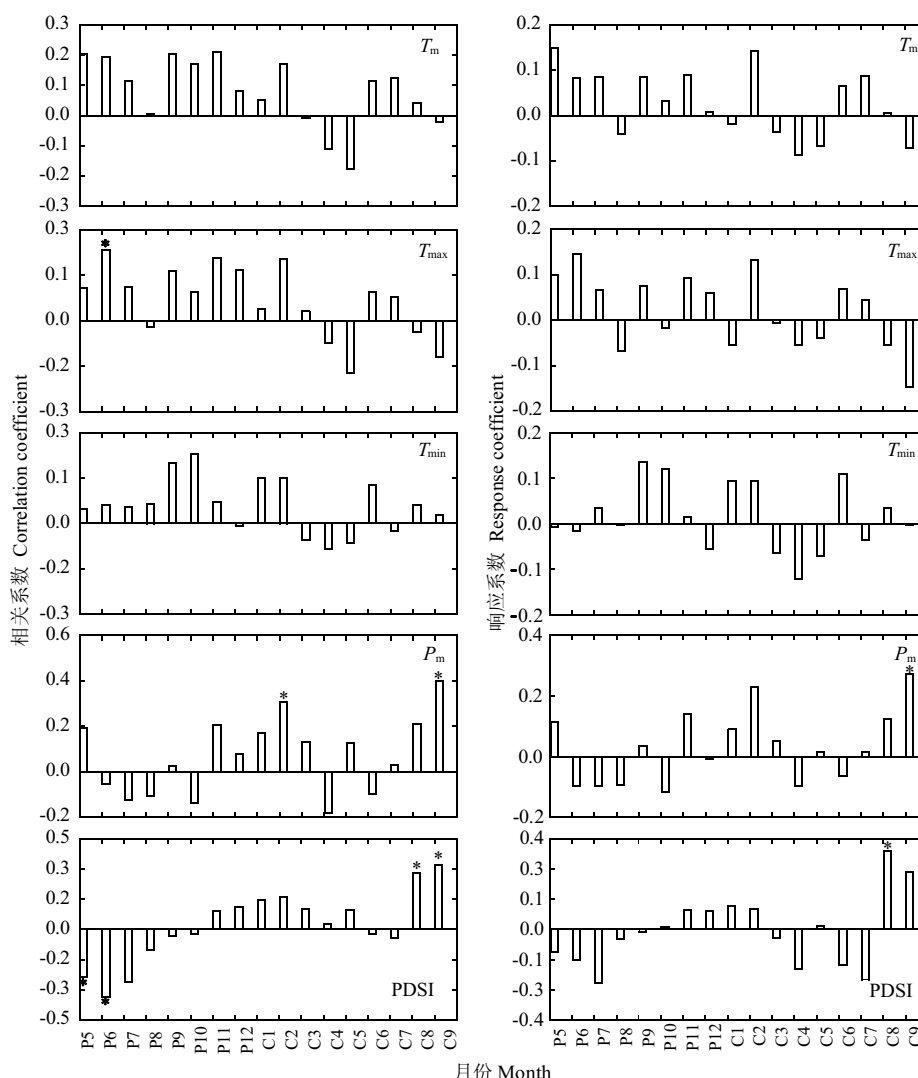


图8 落叶松差值年表序列与气候因子的相关及响应函数分析. T_m : 月平均温度; T_{max} : 月平均最高温度; T_{min} : 月平均最低温度; P_m : 月降水量; PDSI: 帕尔默干旱度指数. *表示达到95%的显著水平. P代表上年, C代表当年.

Fig. 8 Correlation and response function analyses between residual chronology of *Larix olgensis* and climatic factors. T_m : Monthly mean temperature; T_{max} : Monthly mean maximum temperature; T_{min} : Monthly mean minimum temperature; P_m : Monthly precipitation; PDSI: Palmer Drought Severity Index. *: $P < 0.05$; P: data of the previous year; C: data of the current year.

著水平. 响应函数分析剔除不同月份气候因子之间可能存在的相关关系对分析结果的影响^[18]. 响应分析表明, 落叶松径向生长与当年9月降水量呈显著正相关, 与当年8月PDSI呈显著正相关. 综上所述, 当年9月降水量和8月水热条件有助于落叶松的径向生长.

2.7 NDVI与年轮宽度及年生物量生长量的关系

通过分析长白山东坡地区1982-2006年年轮宽度、年生物量生长量、NDVI及气候因子的相关性(表2), 发现该区RES与ABI呈极显著正相关($P < 0.01$), 与NDVI年值之间呈显著负相关($P < 0.05$), 与其它NDVI指标之间关系均未达到显著水平($P > 0.05$). RES与气候因子相关性不明显($P > 0.05$), 与年平均温度和年降水量正相关, 与年PDSI负相关. ABI与NDVI_{max}、NDVI₆₋₈和NDVI₅₋₉相关性不显著($P > 0.05$), 与NDVI_a呈极显著负相关($P < 0.01$), 与年平均温度、年降水量呈正相关, 与年PDSI呈负相关($P > 0.05$). NDVI_{max}、NDVI_a均与NDVI₆₋₈、NDVI₅₋₉呈极显著正相关($P < 0.01$). NDVI_{max}反映了该区当年地表植被生长的最好水平, 在研究区内多出现在6-8月. NDVI₆₋₈与NDVI₅₋₉呈极显著正相关. 所有NDVI指标与年平均温度、年降水量和年PDSI均表现为负相关($P > 0.05$).

进一步分析落叶松年轮宽度和年生物量生长量与NDVI月值的相关性(图9), 可以发现二者与NDVI月值以负相关为主, 4、11月年轮宽度与NDVI呈显著负相关($P < 0.05$). 落叶松年生物量生长量与NDVI月值以负相关为主, 仅与9月NDVI呈正相关, 年生物量生长量与3、10月NDVI呈显著负相关($P < 0.05$).

2.8 落叶松的模拟方程

落叶松差值年表与气候因子和落叶松连年年均生物量生长量与NDVI的模拟回归方程为:

$$Y = 1.172 + 0.047T_{p5} - 0.055T_{p8} + 0.002P_{p5} + 0.001P_{C9} - 0.039PDSI_{p6} + 0.017PDSI_{p9} + 0.014PDSI_{C8} \quad (R = 0.797, R^2 = 0.636, \text{调整} R^2 = 0.569, F = 4.649, P = 0.037)$$

式中: Y 表示落叶松年轮宽度指数; T_{p5} 和 T_{p8} 分别表示上一年5月和8月的平均温度; P_{p5} 和 P_{C9} 分别表示上年5月和当年9月的降水量; $PDSI_{p6}$ 、 $PDSI_{p9}$ 和 $PDSI_{C8}$ 分别为上年6、9月和当年8月的PDSI.

$$ABI = 40.157 - 18.258X_1 - 24.887X_2 - 21.873X_3 \quad (R = 0.759, R^2 = 0.577, \text{调整} R^2 = 0.513, F = 9.081, P = 0.001)$$

式中: ABI 表示落叶松年生物量生长量; X_1 、 X_2 和 X_3 分别表示4、6和10月的NDVI.

配对 T 检验表明, 差值年表模拟值和真实值之间相关性高达0.787, 连年年均生物量生长量的模拟值和真实值相关性为0.759, 均达到了极显著相关水平, 说明拟合的方程能够较好地模拟落叶松径向生长与气候因子及连年年均生物量生长量与NDVI之间的关系. 落叶松差值年表、连年年均生物量生长量的模拟回归方程综合解释率分别为56.9%和51.3%, 且均达到了显著水平. 差值年表与气候因子的拟合方程中共有7个自变量, 涉及温度的变量仅有2个. 表明降水对落叶松径向生长的影响要强于温度, 这与上文差值年表与气候因子的相关分析结果一致. 连年年均生物量生长量与NDVI的拟合方程自变量系数均为负值, 进一步说明二者受气候因子响应不一致. 同时也证明了前文年均生物量生长量与NDVI相关性差的研究结论.

3 讨论与结论

3.1 长白山地区温度和降水变化特征

本文通过分析长白山天池气象站近53年(1957-2009年)

表2 年轮宽度、生物量生长量和NDVI值与气候因子的相关性分析

Table 2 Correlation of tree-ring width indices, biomass increment and NDVI with climatic factors

	RES	ABI	NDVI _{max}	NDVI _a	NDVI ₆₋₈	NDVI ₅₋₉	AT	AP	APDSI
RES	1								
ABI	0.656**	1							
NDVI _{max}	0.087	-0.164	1						
NDVI _a	-0.460*	-0.622**	0.404	1					
NDVI ₆₋₈	-0.183	-0.367	0.805**	0.601**	1				
NDVI ₅₋₉	-0.344	-0.358	0.573**	0.782**	0.734**	1			
AT	0.086	0.202	-0.264	-0.021	-0.333	-0.048	1		
AP	0.227	0.044	-0.095	-0.029	-0.171	-0.269	-0.229	1	
APDSI	-0.011	-0.038	-0.256	-0.142	-0.339	-0.384	-0.108	0.613**	1

ABI、AT、AP和APDSI分别表示连年生物量生长量、年均温、年均降水量和年均PDSI.

ABI: annual biomass increment; AT: annual average temperature; AP: annual average precipitation; APDSI: annual PDSI.

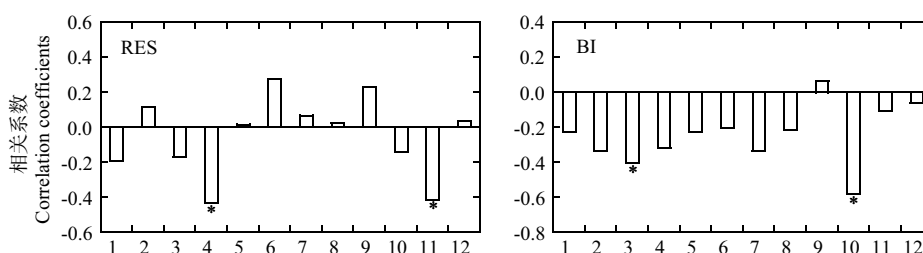


图9 落叶松差值年表、年生物量生长量与NDVI月值的相关性.

Fig. 9 Correlation of residual chronology and biomass increment of *Larix olgensis* with monthly NDVI.

温度和降水数据,探讨该区近年来气候的变化特征.结果显示,1957-2009年,研究区年平均气温呈显著上升趋势($P < 0.01$),气候倾向率为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$,该结果低于孙凤华等对整个东北地区所有气象站的研究结果 $[0.34\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}]^{[29]}$,稍高于任国玉等对全国近50年来的气候倾向率的研究 $[0.25\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}]$.长白山地区年降水量下降趋势不明显,这与左洪超等对全国近50a降水量研究所得结论 $[31]$ 一致.

不同季节气候倾向率差异较大,春季和冬季气候倾向率最大,表明春季和冬季升温最为明显 $[0.32\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}, 0.45\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}, P < 0.01]$,这一结论与任国玉等的研究结果 $[30]$ 一致.冬季气候倾向率高于同期近50年全国值 $[0.39\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}]^{[30]}$,低于整个东北地区 $[0.54\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}]^{[29]}$.秋季、夏季气候倾向率分别为 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$,均达到95%显著性水平.夏季气候倾向率高于全国值 $[0.15\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}]^{[30]}$.综上分析,气候变化趋势具有局地性和季节性,地域和季节差异均可以造成温度和降水气候倾向率的差异,应根据具体地区的气候资料进行分析.

3.2 NDVI动态变化及与气候因子的关系

该区NDVI数值在1982-2006年时段内呈缓慢下降趋势,表明植被覆盖有所减少,这与前人研究发现整个长白山区近10年来NDVI总体呈增长趋势所得结论 $[3]$ 相反.造成差异的原因可能是研究地点所处的地形和纬度不同,气候会随坡向、海拔高度等不同而存在明显差异 $[32]$,前人的研究发现长白山区NDVI增长区域在空间上主要集中在北坡和西坡,减少区域主要集中在南坡,而东坡尚未得出明确研究结论.其次,NDVI数据来源不同,也可能造成与前人研究结果 $[3]$ 存在差异.

本研究表明长白山植被受温度影响较大,这与侯光雷等 $[3]$ 以及何吉成等 $[10]$ 对漠河樟子松的研究结果一致.影响NDVI变化的因素很多,而气候因子是主要因子之一.前人研究也得出生长季前期的温度与NDVI的相关性最好 $[33]$.长白山森林下限生长季主要集中在5-9月,5月初,日最低温度达 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,平均温度达到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,这恰是树木生长的生理学温度 $[34]$.5月份是该区植被的生长季初期,温度快速上升有利于植被对营养物质和水分的吸收,为植物进行光合作用提供足够的物质储备.NDVI与降水量关系不显著可能与植被类型有关,该区植被以落叶针叶林为主,降水对树木径向生长影响较大,而对叶片的影响较小,NDVI主要反映的是叶片的生长变化,NDVI与降水关系不如与温度显著,这在前人研究结论中也同样有所发现 $[8]$.

3.3 树木生长与气候因子的关系

研究发现,当年生长季气候因子对树木生长的影响作用大于上年生长季对树木生长的影响作用,这与前人的报道一致 $[15]$.温度对树木生长的影响不及水分,说明水分条件是低海拔落叶松生长的主要限制因子,这与前人的研究所得结论 $[35]$ 相似.长白山低海拔地区温度适宜,基于水分胁迫是低海拔地区主要的影响因子,降水对树木的生长起到了显著的促进作用 $[36]$.在生长季之初,温度决定生长季的开始,但是生长结束的时候,充足的降水有利于延长植物的生长季,9月份降水的增加有利于延长植物的生长季,增加树轮宽度 $[37]$,这与前人在长白山北坡对低海拔落叶松的研究结论 $[15]$ 一致.该结论在前文NDVI与气候因子的研究中也有所展示.自上年11

月PDSI与差值年表表现出持续的正相关,但这种正效应在一年的大部分时间里并不显著,在当年8、9月相关性达到显著水平,这在前人的研究中也得出类似结论 $[38-39]$.PDSI作为表征土壤干旱程度的重要指数,不仅考虑到某一时段的土壤水分吸收,同时综合了空气温度、地表蒸发和径流等因子,是土壤有效水分、温度和降水的综合反映,它比温度和降水单独对树木生长的影响更有意义 $[24]$.树木生长所需的水分主要通过根部从土壤中吸收得到,持续的正相关关系说明土壤干湿变化对长白山落叶松径向生长具有积极的作用.9月份充足的水分条件有利于落叶松的径向生长,进一步说明在该区水分条件对落叶松径向生长的影响要强于温度.

3.4 年轮宽度、年生物量生长量与NDVI的关系

前人的报道多为树轮宽度指数与生长季NDVI呈显著相关性 $[8, 10]$.但本研究结果表明二者相关性却很差,这可能与树种和植被类型存在差异有关.NDVI是植被叶面由红光和近红外两个波段反射所合成的指数,主要反映的是叶片的生长变化,而该区植被主要以落叶针叶林为主,针叶树对外界恶劣的环境变化具有较强的抵抗能力,气候变化对叶片的影响较小,因此,生长季NDVI变化不显著.但气候因子的变化会对树木的光合作用产生影响,进而影响有机物质的积累,使得树木径向生长发生明显变化.由于生长季NDVI与树轮宽度指数对气候限制因子的响应存在差异,这在前文已被证实,最终导致二者相关性较差.王瑞丽等对北亚热带马尾松的研究也得出同样结论 $[9]$.

本研究发现,非生长季的NDVI与树轮宽度指数和年生物量生长量具有很好的相关关系,这与前人在石羊河地区研究所得结论 $[11]$ 一致.NDVI并不是植物生长状况的直接反映,而只是地物反射波谱曲线不同波段反射值的一个组合,当研究区地物类型发生变化时同样可以引起研究区NDVI的变化.由于非植被地物与植被地物的反射波谱一般情况下不同,当非植被类型地物发生变化时,会对正常的NDVI变化情况造成严重干扰.长白山区冬季降水主要以降雪为主,且在整个冬季积雪都很少融化,雪对可见光红光波段具有强烈的反射作用,而对近红外波段却是吸收的,由此计算的NDVI结果是负的,当与正常植被正的NDVI叠加在一起,会使整个地区的NDVI降低.冬季降水越多,积雪的覆盖面积就越大,研究区NDVI就越低.而冬季的降水却为第2年树轮的生长提供了充足水分,进而导致宽年轮的出现.所以,非生长季NDVI与树轮宽度指数和年生物量生长量呈显著负相关.综上所述,在长白山区,长时间序列的树轮宽度数据并不能很好地反映NDVI的变化,利用树轮宽度指数重建该区NDVI需做进一步研究.未来应加强树轮宽度数据与NDVI之间进行大尺度、多因素和长期性的综合研究.

3.5 气候变化对落叶松生长的影响

IPCC第四次评估报告称,近100年中国地表年平均温度明显增加 $[40]$.假设本研究区域未来气候变化延续过去50年的变化趋势,依据本文研究所得气候因子各季节气候倾向率带入拟合方程.结果表明,气候变化将促进落叶松径向生长和年生物量生长量的生长,这与前人研究全球增暖将导致长白山区落叶松径向生长量和材积增加所得结论 $[14]$ 一致.而这种增加趋势在其近年来落叶松年生物量生长量上也有体现

(图4)。但本文研究结论却与于大炮等在长白山北的研究所得结论^[15]不同。这可能是研究地区坡向不同以及假定气候变量增加量不同造成的。落叶松地上总生长量高于李文华等对长白山落叶松地上总生物量的研究结果,但生物量生长量低于李文华等对该林型生产量的研究结果^[41]。这可能是由于该林分林木已进入过熟龄阶段,落叶松径向生长量较为缓慢,并且表现出逐年波动,但生物量积累较为快,总体趋势仍呈逐年增加。表明在全球变暖背景下,该地区老龄林仍然具有相当的固碳能力。长期以来人们认为老龄林已经处于碳中和(Carbonneutral)阶段。但已有研究结果证明,占全球总森林面积15%的老龄林仍然是重要的碳汇,它们提供的净生态系统生产力约占全球的10%左右^[42]。这与林波等的研究结论^[43]一致。本研究也证实了这一观点。

综上所述,随着全球温度不断升高,降水量逐渐下降,与树木径向生长过程相关的许多生理过程都将改变,从而影响树木径向生长,并最终会对区域森林生态系统产生影响。因此,需要合理加强森林经营管理和生态环境建设,改善气候条件,逐步改进长白山地区植被的恢复和重建。

致谢 张国春、刘文慧、徐琼瑶、孟晓清和孟盛旺等参加野外取样工作和部分室内分析,王晓春、高露双和封晓辉在交叉定年、年表研制等数据处理及论文写作中给予悉心指导,在此一并致谢。

参考文献 [References]

- 贾建英,郭建平.东北地区近46年气候变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(10):109-115 [Jia JY, Guo JP. Characteristics of climate in northeast China for last 46 years [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2011, 25(10): 109-115]
- 刘学华,季致建,吴洪宝,于秀晶.中国近40年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J].热带气象学报,2006,22(6):618-624 [Liu XH, Ji ZJ, Wu HB, Yu XJ. Distributing characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in China for latest 40 years [J]. *J Trop Meteorol*, 2006, 22(6): 618-624]
- 候光雷,张洪岩,郭聘,郭笑怡.长白山区植被生长季NDVI时空变化及其对气候因子敏感性[J].地理科学进展,2012,31(3):285-292 [Hou GL, Zhang HY, Guo D, Guo XY. Spatial-temporal variation of NDVI in the growing season and its sensitivity to climatic factors in Changbai Mountains [J]. *Prog Geogr*, 2012, 31(3): 285-292]
- Hasenauer H, Nemani R R, Schadauer K. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria [J]. *For Ecol Manage*, 1999, 122: 209-219
- 余振,孙鹏森,刘世荣.中国东部南北样带主要植被类型物候期的变化[J].植物生态学报,2010,34(3):316-329 [Yu Z, Sun PS, Liu S R. Phenological change of main vegetation types along a North-South Transect of Eastern China[J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, 34(3): 316-329]
- Berner LT, Beck PSA, Bunn AG, Lloyd AH, Goetz SJ. High-latitude tree growth and satellite vegetation indices: correlations and trends in Russia and Canada (1982-2008) [J]. *J Geophys Res*, 2011, 116: G01015, doi:10.1029/2010JG001475
- D'Arrigo RD, Malmstrom CM, Jacoby GC. Correlation between maximum latewood density of annual tree rings and NDVI based estimates of forest productivity[J]. *Intern J Remote Sensing*, 2000, 21(11): 2329-2336
- 王文志,刘晓梅,陈拓,安文玲,徐国保.基于祁连山树轮宽度指数的区域NDVI重建[J].植物生态学报,2010,34(9):1033-1044 [Wang WZ, Liu XH, Chen T, An WL, Xu GB. Reconstruction of regional NDVI using tree-ring width chronologies in the Qilian Mountains, northwestern [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, 34(9): 1033-1044]
- 王瑞丽,程瑞梅,肖文发,封晓辉,刘泽彬,王晓荣.北亚热带马尾松年轮宽度与NDVI的关系[J].生态学报,2011,31(19):5762-5770 [Wang RL, Cheng RM, Xiao WF, Feng XH, Liu ZB, Wang XR. Relationship between masson pine tree-ring width and NDVI in North Subtropical Region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(19): 5762-5770]
- 何吉成,王丽丽,邵雪梅.漠河樟子松树轮指数与标准化植被指数的关系研究[J].第四纪研究,2005,25(2):252-257 [He JC, Wang LL, Shao XM. The relationships between Mongolian scotch pine tree ring indices and normalized difference vegetation index in Mohe, China [J]. *Quaternary Sci*, 2005, 25(2): 252-257]
- 路俊伟,王乃昂,侯迎,张学敏,常金龙.石羊河上游地区树轮年表与NDVI关系分析[J].干旱区研究,2012,29(4):667-673 [Lu JW, Wang NA, Hou Y, Zhang XM, Chang JL. Analysis on the correlation between NDVI and tree-ring width chronologies in the upper reaches of the Shiyang River [J]. *Arid Zone Res*, 2012, 29(4): 667-673]
- 邵雪梅,吴祥定.利用树轮资料重建长白山区过去气候变化[J].第四纪研究,1997,17(1):76-85 [Shao XM, Wu XD. Reconstruction of climate change on Changbai Mountain, northeast China using tree-ring data [J]. *Quaternary Sci*, 1997, 17(1): 76-85]
- 南颖,刘志锋,董叶辉,李秀霞,吉喆.2000-2008年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应研究[J].地理科学,2010,30(6):921-928 [Nan Y, Liu ZF, Dong YH, Li XX, Ji Z. The responses of vegetation cover to climate change in the Changbai Mountain Area from 2000 to 2008 [J]. *Sci Geogr Sin*, 2010, 30(6): 921-928]
- 吴祥定,邵雪梅.采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试[J].地理学报,1996(S1):92-101 [Wu XD, Shao XM. A preliminary study on impact of climate change on tree growth using tree ring-width data [J]. *Acta Geogr Sin*, 1996(S1): 92-101]
- 于大炮,王顺忠,唐立娜,代力民,王庆礼,王绍先.长白山北坡落叶松年轮年表及其与气候变化的关系[J].应用生态学报,2005,16(1):14-20 [Yu DP, Wang SZ, Tang LN, Dai LM, Wang QL, Wang SX. Relationship between tree-ring chronology of *Larix olgensis* in Changbai Mountains and the climate change [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(1): 14-20]
- 戴璐,罗耀祥,韩士杰,李玉文.火山大爆发对长白山东坡历史植被演替的影响[J].生态学杂志,2008,27(10):1771-1778 [Dai L, Wu YX, Han SJ, Li YW. Effects of great volcanic eruption on historical vegetation succession on eastern slope of Changbai Mountains [J], 2008, 27(10): 1771-1778]
- Stokes A, Smiley TL. An introduction to tree ring dating. Chicago: University of Chicago Press, 1968

- 18 Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bull*, 1983, **43**: 69-78
- 19 Cook ER, Holmes RL. Users manual for ARSTAN [M]. Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, Tucson, AZ, USA, 1986
- 20 Jump AJ, Hunt JM, Penuelas J. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica* [J]. *Global Change Biol*, 2006, **12** (11): 2163-2173
- 21 Kendall MG. Rank correlation methods [M]. London: Griffin, 1970:125-130
- 22 Kohler MA. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1949, **82**: 96-97
- 23 Alley WM. The palmer drought severity index as a measure of hydrologic drought [J]. *J Am Water Resour*, 1985, **21** (1): 105-114
- 24 Palmer WC. Meteorological drought research paper 19, No. 45 [R]. Weather Bureau, Washington D.C., 1965: 58
- 25 Dai AG, Trenberth KE, Qian TT. A global dataset of palmer drought severity index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. *J Hydrometeorol*, 2004 (5): 1117-1130
- 26 Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies [J]. *Computer Geosci*, 2004, **30**: 303-311
- 27 Fritts HC. Tree rings and climate [M]. London: Academic Press, 1976: 64-90, 1-242, 376-412
- 28 王晓明, 赵秀海, 高露双, 姜庆彪. 长白山北坡沿海拔梯度岳桦径向生长对气候的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (6): 929-934 [Wang XM, Zhao XH, Gao LS, Jiang QB. Climatic response of *Betula ermanii* tree-ring growth along an altitudinal gradient on the northern slope of the Changbai Mountains [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (6): 929-934]
- 29 孙凤华, 杨修群, 路爽, 杨素英. 东北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析[J]. 气象科学, 2006, **26** (2): 157-163 [Sun FH, Yang XQ, Lu S, Yang SY. The contrast analysis on the average and extremum temperature trend in Northeast China [J]. *Sci Meteorol Sin*, 2006, **26** (2): 157-163]
- 30 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 郭军, 李庆祥, 刘小宁, 王颖. 近54年中国地面气温变化[J]. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 717-727 [Sun GY, Xu MZ, Chu ZY, Guo J, Li QX, Liu XN, Wang Y. Changes of surface air temperature in China during 1951-2004 [J]. *Climatic Environ Res*, 2005, **10** (4): 717-727]
- 31 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近50年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 2004, **23** (2): 238-244 [Zuo HC, Lv SH, Hu YQ. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years [J]. *Plateau Meteorol*, 2005, **10** (4): 717-727]
- 32 Kaufmann RK, D'Arrigo RD, Paletta LF, Tian HQ, Jolly WM, Myneni RB. Identifying climatic controls on ring width: the timing of correlations between tree rings and NDVI [J]. *Earth Interactions*, 2008, **12** (14): 1-14
- 33 Ding MJ, Zhang YL, Liu LS, Zhang W, Wang ZF, Bai WQ. The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau [J]. *J Geogr Sci*, 2007, **17**: 259-268
- 34 Vaganov EA, Hughes M.K, Shashkin AV. Growth dynamics of conifer tree-rings: images of past and future environments [J]. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006
- 35 Fritts HC. Relationships of ring widths in arid-site conifers to variations in monthly temperature and precipitation [J]. *Ecol Monogr*, 1974, **44**: 411-440
- 36 Robertson EO, Jozsa LA. Climatic reconstruction from tree rings at Banff [J]. *Can J For Res*, 1988, **18** (7): 888-900
- 37 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山过渡带红松和鱼鳞云杉径向生长对气候因子的响应[J]. 植物生态学报, 2011, **35** (1): 27-34 [Gao LS, Wang XM, Zhao XH. Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35** (1): 27-34]
- 38 Foster TE, Brooks JR. Long-term trends in growth of *Pinus palustris* and *Pinus elliotii* along a hydrological gradient in central Florida [J]. *Can J For Res*, 2001, **31**: 1661-1670
- 39 Henderson JP, Grissino-Mayer HD. Climate-tree growth relationships of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) in the southeastern coastal plain, USA [J]. *Dendrochronologia*, 2009, **27**: 31-43
- 40 IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007
- 41 李文华, 邓坤枚, 李飞. 长白山主要生态系统生物生产量的研究[A]//森林生态系统研究(第2卷). 北京: 林业出版社, 1981: 34-50 [Li WH, Deng KM, Li F. Study on biomass and primary production of main ecosystems in Changbai Mountain [A]//Research of Forest Ecosystem (Vol 2). Beijing: Forestry Press, 1981: 34-50]
- 42 Luyssaert S, Schulze E, Börner A. Old-growth forests as global carbon sinks [J]. *Nature*, 2008, **455**: 213-215
- 43 Lin B, Xu QQ, Liu WH, Zhang GC, Xu QY, Liu QJ. Dendrochronology-based stand growth estimation of *Larix olgensis* forest in relation with climate on the eastern slope of Changbai Mountain, NE China [J]. *Frontiers Earth Sci*, 2013, **7** (4): 429-438