

# 重庆青华林场树轮宽度指数分析及其与 NDVI 的关系

柳凯茜, 曾彪, 杨太保, 贾蕾

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

**摘要:**利用重庆市东南酉阳土家族苗族自治县青华林场的杉木树轮样本、2000—2010 年的 MODIS-NDVI 数据以及气象资料,对原始轮宽进行标准化处理后采用一次线性拟合与相关分析的方法,分析树轮宽度指数与气候因子、NDVI 的关系,探讨揭示树木主干与冠层的关系。结果表明:研究时段内,树轮宽度原始值呈减少的趋势;树轮宽度指数与前一年及当年的气候因子存在不同程度的相关关系,NDVI 与同期气候因子呈现显著的相关性;树轮的整轮宽度和早材宽度与前一年 NDVI 以及前一年 7—9 月 NDVI 均呈显著的正相关关系,而树轮的晚材宽度与当年 4—5 月 NDVI 呈显著的负相关关系。

**关键词:**树轮宽度; NDVI; 气候因子

**中图分类号:**Q948; P468

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)03-0170-06

## Analysis of Tree Ring Width Index and Its Relationship with NDVI in Qinghua Forest of Chongqing

LIU Kaixi, ZENG Biao, YANG Taibao, JIA Lei

(College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** This study aims at analyzing the relationships between tree ring width index, climatic factors, and NDVI, using MODIS-NDVI data from 2000 to 2010, meteorological data, and fir [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb). Hook] tree ring samples. The tree ring samples were collected from Qinghua forest in Youyang Tujia and Miao Ethnic groups Autonomous County, southwest of Chongqing. Correlation analysis and a linear fitting were used to investigate and reveal the relationship between trunks and canopies. The findings showed that the original value of the tree ring width presented the declining trend during the study period. There are correlations of different levels between climatic factors and tree ring width index. Meanwhile, NDVI and climatic factors in the same periods show the significant correlation. The entire wheel width and earlywood width both have significantly positive correlation with the NDVI of the last year and the NDVI from July to September of the last year, while latewood width and NDVI of April and May in the same years have the significantly negative correlation.

**Keywords:** tree ring width; NDVI; climatic factors

植被作为生产者,在陆地生态系统中占有重要的位置,而森林是陆地生态系统的主体。在陆地与大气 CO<sub>2</sub> 的交换中,90% 以上是由森林植被完成的,森林生态系统碳储量占陆地生态系统碳库总量的 56%<sup>[1-3]</sup>。森林吸收固定碳主要通过树木的叶片、主干和根。光合作用表明叶片直接吸收固定大气中的 CO<sub>2</sub>,主干中的碳则来源于各种途径的 CO<sub>2</sub> 的同化和转化,叶片和主干中碳的存在形式不太相同,且形成过程不同步,由此可能导致主干与林冠叶片固碳量

不同<sup>[4]</sup>。同时叶片与主干具有不同的生长周期,在森林生态系统的 C 循环中,植物凋落分解后部分碳会进入土壤,其余在分解过程中释放。因此研究树木冠层与主干固定碳的不同步性与固碳量的差异对估算一定时间内森林的固碳量和森林生态系统的碳循环有重要意义。

近年来遥感卫星监测被用于研究植被的生物量、净初级生产力的变化及其与气候变化的关系<sup>[5]</sup>。对于森林来说,通过遥感图像解译计算出的 NDVI、

NPP等,仅代表冠层的变化情况。而冠层与主干的生长状况变化存在怎样的差异,或者有着怎样的联系,还有待研究,目前国内外关于这一问题的研究比较少见<sup>[6-7]</sup>。研究植被冠层与主干之间的关系对利用植被遥感数据进行气候变化方面的研究有参考意义,有助于理解气候变化对植物的影响以及植被对气候变化响应在全球C循环中的作用,特别是对于明确植物冠层变化和主干径向变化的不同C效应具有借鉴意义。

在利用树轮资料分析气候与环境变化的研究中,年轮宽度是最常用的指标,因为它获取容易,定年准确,指标量测精确,而且树木年轮的宽窄能够真实地记录气候变化对树木生长有利或不利的影 响,直观地反映气候因子的变化情况<sup>[8]</sup>。与此同时,归一化植被指数(NDVI)是利用国际通用的最大值合成法(MVC)生成,能消除部分云、气溶胶、太阳高度角和地物双向反射等的干扰,因此是反映冠层光合能力、植被生长状况的良好指标。

本文为了比较气候变化影响下的林冠与主干生长变化的差异,选取树轮宽度指数与归一化植被指数(NDVI)分别作为反映主干与冠层的生长量指标。树轮宽度指数为标准化的早材宽度、晚材宽度及整轮宽度。以重庆市森林二类调查为基础,结合2000—2010年的MODIS-NDVI数据及气象资料,探讨树木主干与冠层的关系。对明确该地区杉木冠层与主干的生长量有重要意义,有利于更好地了解研究区针叶林的C循环过程,而且对于指导今后的植被保护,改善生态环境,以及林业生产也有一定的有现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 树轮样本采集与处理

树轮样本采自重庆市酉阳土家族苗族自治县青华林场(108°42′—109°1′E, 28°38′—28°52′N)。研究区地处四川盆地巫山至大娄山中山区,地势中间高,东西两侧低,海拔高差较大,最高处为1 965 m,最低处仅为263 m。该地属亚热带湿润季风气候区,热量丰富,年平均气温11.9℃,雨量丰沛,年平均降水量1 344 mm;气候温和,光、热、水同季,年日照时数1 000~1 400 h,积温大于10℃累计4 500℃以上,无霜期较长,年均260.6 d。

本文研究时段为2000—2010年,收集50株杉木胸径处轮盘作为样本,为了避免树木“幼龄效应”的影响,选取树龄大于24 a的成熟杉木<sup>[9]</sup>,共计21株。根据树木年轮学分析的基本程序<sup>[10]</sup>,首先使用240目与800目的砂纸对所采集的轮盘进行打磨,直至年

轮界线清晰可见;由于所采集杉木树龄不大,存在部分未达30 a的样本,因此采用折线图对比法对树轮进行交叉定年;树轮的早、晚材宽度及年轮宽度用LINTAB5树木年轮分析仪分别从三个方向测量,精度为0.001 mm。运用国际年轮库ARSTAN软件消除生物因子如树木自身遗传作用导致的生长趋势,使用样条函数进行树轮宽度的标准化<sup>[11]</sup>,得到树轮早材宽度、晚材宽度及整轮宽度的标准化序列即树轮宽度指数。同时本研究利用一次线性拟合的方法计算研究时段内树轮宽度原始值的变化趋势。

### 1.2 遥感数据来源与处理

NDVI数据选取16天合成的MODIS植被指数数据产品MOD13Q1,空间分辨率为250 m,数据时间自2000—2010年,来自NASA网站(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)。该数据为MODIS三级陆地产品,已经进行了辐射校正、大气校正、几何校正,数据质量较高。在MRT软件中进行重投影与数据格式转换,选用横轴墨卡托投影,影像输出格式为tif;然后在ENVI 4.8软件中对影像进行裁剪,得到研究区的影像。最后在软件TIMESAT 3.0中利用不对称高斯函数对NDVI序列进行降噪处理<sup>[12]</sup>,采用最大值合成法得到研究时段内NDVI年最大化值来表示研究区植被生长变化,并且逐月计算NDVI的月值数据。

### 1.3 气象数据来源与处理

气象数据取自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),选取酉阳县气象站1999—2010年的平均气温、平均最低气温、平均最高气温,平均降水量,平均相对湿度以及日照时数的月值数据,计算得到年值数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 树轮宽度原始值分析

对2000—2010年杉木整轮宽度及早晚材宽度的原始测量值求平均值,得到杉木整轮的平均宽度为3 109.35  $\mu\text{m}$ ,早材的平均宽度为2 385.15  $\mu\text{m}$ ,晚材的平均宽度为724.20  $\mu\text{m}$ 。从图1中可以看出,杉木成熟后的11年来整轮宽度的变化范围是2 500~3 500  $\mu\text{m}$ ,以65.84  $\mu\text{m}/\text{a}$ 的速率减少;早材宽度的变化为1 900~2 800  $\mu\text{m}$ ,以50.307  $\mu\text{m}/\text{a}$ 的速率减少;晚材宽度的波动幅度比较小,为500~900  $\mu\text{m}$ ,以15.532  $\mu\text{m}/\text{a}$ 的速率减少。杉木整轮宽度的变化趋势与负指数曲线相似,由于树木成熟期的生长曲线是负指数曲线,说明树轮样本处于树木成熟期。而早材宽度与整轮宽度的变化趋势基本相似,与晚材宽度变

化趋势明显不同。进一步对树木整轮宽度、早晚材宽度做相关分析,结果表明:杉木整轮宽度与早材宽度呈极显著的正相关关系,相关系数高达 0.978,显著性水平小于 0.001;同时整轮宽度与晚材宽度在 0.05 的水平上显著正相关,相关系数为 0.656;而早材与晚材的宽度没有明显的相关关系。进一步分析发现,当年晚材宽度与上一年早材宽度在 90%置信水平下呈正相关关系,这与商志远等<sup>[13]</sup>对漠河地区樟子松的研究结果相反,可能由于研究的树种不同以及研究区域不同造成的。

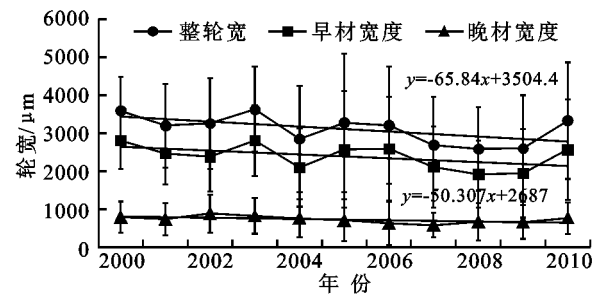


图 1 树轮宽度原始值年际变化

2.2 树轮宽度指数与气候因子的相关关系

气候因素对树木生长有复杂的影响,本研究运用相关分析,选取包括平均气温、平均最低气温和平均最高气温、降水量和平均相对湿度、日照时数等气候因子的月值数据,分析这些气候因子与树轮宽度指数的关系。由于植被本身对自然环境变化适应的复杂性,使得它对气候变化往往不能及时响应而存在一定的滞后性,因此选取前一年到当年的气候因子与轮宽指数进行相关分析,表 1 所示为显著相关的月份。

表 1 树轮宽度指数与气候因子的相关关系

气候因子	月份	整轮宽度	早材宽度	晚材宽度
平均气温	5	-0.252	-0.209	-0.674*
	7	0.497	0.623*	-0.055
	8	0.341	0.613*	0.063
平均最低气温	10	-0.249	0.019	-0.622*
	p6	0.808**	0.76**	0.583
	4-6	-0.633*	-0.354	-0.267
平均最高气温	p6	0.562	0.704*	0.428
	4-5	-0.641*	-0.464	-0.748**
降水量	p10-3	-0.785**	-0.69	-0.376
	5	0.236	0.167	0.621*
	p9	0.648*	0.525	0.393
日照时数	p10	0.622*	0.713*	0.627*
	3-6	-0.742**	-0.488	-0.501

注:“p”代表前一年;“\*”表示  $p<0.05$ ;“\*\*”表示  $p<0.01$ 。下表同。

从表 1 中可以看出,当年 5 月及 10 月的气温与晚材在置信度  $p<0.05$  的水平上呈显著的负相关关

系,也就是当年 5 月和 10 月气温的升高不利于晚材的积累。而当年 7 月与 8 月的气温均与早材宽度在显著性  $p<0.05$  的水平上呈显著的正相关关系,表明 7 月与 8 月气温的升高利于早材的生长。与此同时前一年 6 月的平均最低气温和平均最高气温均与当年早材呈显著的正相关关系,显著性水平高达 0.01,表明前一年 6 月气温的升高有利于早材宽度的增长;并且前一年 6 月的月平均最低气温与当年晚材也在 0.01 的水平上显著正相关,相关系数为 0.808。分析当年平均最低气温、平均最高气温与树轮宽度,也发现树轮宽度与月平均最低温度及月平均最高温度相关的月份较一致。具体表现为当年 4 月、5 月及 6 月的平均最低气温与整轮宽度呈显著负相关关系;并且当年 4 月和 5 月的平均最高气温也与整轮宽度呈负相关。此外晚材宽度与当年 4 月和 5 月的平均最高气温在 0.01 的显著性水平上呈负相关关系。

7 月、8 月是树木生长的高峰期,气温升高配合该地区丰沛的降水有利于植物的光合作用,产生更多的碳水化合物,因此为树轮的径向生长带来正向效应。位于生长季末 10 月的温度降低会使树木进入晚材的生长期,形成的细胞体积小,颜色深,细胞壁厚。相反如果温度升高则会使树木活跃起来,体积大,颜色浅,细胞壁薄的早材会继续积累,因此影响到晚材的增宽。虽然温度的影响,一般表现为某年的温度状况与当年年轮宽度变化相对应,但也有的能影响到下一年年轮宽窄,这在生理学上称为滞后效应<sup>[14]</sup>。本研究中 6 月的气温与下一年树轮早材宽度呈显著正相关关系,可能是由于 6 月温度升高有利于树木合成更多的养分,在保证生长消耗的同时,可以为下一年储备部分营养物质。

崔明星等<sup>[15]</sup>研究了河北木兰围场油松的生长与气候要素之间的关系,发现生长季前期 5 月、6 月的月均温及平均气温与树轮宽度序列的负相关性达到显著性水平。本研究也有类似的结果:树轮晚材宽度与当年 5 月的平均温度、平均最高温度均呈负相关关系;并且 4—5 月份平均最低温度与树轮整轮宽度的负相关关系达到显著性水平。然而当年 5 月的月降水量与晚材宽度在 0.05 的显著性水平下呈正相关关系,相关系数为 0.621,说明当年 5 月的降水有利于晚材的积累。从植物生理特点来看,气孔开度一般随温度升高而增大,在 30℃左右达到最大,研究区 5 月份气温的升高会使树木的蒸腾作用加剧,蒸发量增大,加快水分散失和养分消耗,从而影响树木内部营养物质的积累,导致轮宽变窄。与此同时,当年 5 月降水对树轮晚材生长有正向影响,结合 5 月的气温来

看,降水量的增多可以平衡气温增高的不利影响,补充了树木因气温升高而损失的水分,将气候条件调节到利于树木生长积累的状态。

前一年 10 月到当年 3 月的降水量与整轮宽度在 0.01 的显著性水平上呈负相关关系,相关系数为 -0.785,也就是说上一个生长季末到生长季开始前,降水越多越不利于当年树轮宽度的增长。对于月平均相对湿度与树轮宽度也做了相关分析,但并未发现明显的相关关系。一般来说树木的水分主要来自于土壤,植被根系从土壤中吸收水分,所以土壤条件直接影响植被根系吸水。研究区位于湿润的季风区,在生长季末与下一个生长季开始前即非生长季,降水量仍然比较多,而水分会储存在土壤中以供植物生长。当降水过多时,土壤的含水量增高,水分会占据土壤内的孔隙,所以土壤内空气减少,造成通气不良,根系环境内缺乏  $O_2$ ,积累  $CO_2$ ,呼吸作用受到抑制,影响根系吸水,抑制植被的生长。此外降水过多,还可能形成生理干旱。因此树木生长活动受到抑制,产生 ATP 减少,限制了许多耗能反应,如矿质元素的吸收、有机物(如细胞分裂素)的合成和运输,可能就会出现研究结果中非生长季(即前一年 10 月到当年 3 月)的降水增多,反而不利于树轮增宽。

分析日照时数与轮宽的关系,可以发现前一年 9 月及 10 月的日照时数与当年早材及整轮宽度在 0.05 的显著性水平上均呈正相关关系,表明前一年 9 月和 10 月日照时数的增加有利于当年树轮宽度的增长。而当年 3—6 月的日照时数与晚材宽度表现为显著的负相关关系,说明生长季前期日照时数的增加反而不利于晚材的积累。由于该地区多云雨,少日照,日照对该地区植物生长的影响较大。9 月与 10 月日照时数的增加,会促进植物的光合作用,积累更多干物质,部分用于下一年生长,因此 9 月、10 月的日照时数与下一年树轮宽度表现为正相关。而生长季前期树木生长活动活跃,营养物质用来促进枝叶繁盛,同时良好的日照可以促进树木的生理活动,因此当年 3—6 月的日照时长增加,会使树木加快生长,进而使用主干中积累的营养物质,不利于轮宽的增加。

2.3 NDVI 与气候因子的相关关系

植物叶片中的多种化学物质成分对各种波段的光有着不同程度的吸收和反射作用,通过计算 NDVI 可以分析树木叶片的生长变化情况。将 NDVI 年最大值与同期气候因子进行相关分析,列出相关系数显著的月份,如表 2 所示。NDVI 与平均气温、平均最低气温及平均最高气温的关系均在 6 月表现为显著正相关。并且 2—4 月的降水量与 NDVI 最大值在

0.05 的显著性水平上呈正相关关系。而 7 月的平均相对湿度与 NDVI 最大值呈显著的负相关关系,说明 7 月湿度的增加不利于林冠的生长。在日照时数方面,4 月和 6 月的日照时数均与当年 NDVI 最大值呈显著的正相关关系。

表 2 NDVI 与气候因子的相关关系

气候因子	月份	NDVI
平均气温	6	0.646*
平均最低气温	6	0.613*
平均最高气温	6	0.656*
降水量	2—4	0.609*
平均相对湿度	7	-0.758**
日照时数	4	0.652*
	6	0.612*

气候与 NDVI 的联系既可以反映气候对植物的影响,也可以反映植被对气候的响应,在植物的生长过程中会受不同气候因子的作用和影响。刘灿等通过对 NDVI 与气温、降水进行相关性分析,研究了 2000—2011 年重庆市 NDVI 的变化及其对气候因子响应,发现植被生长与气温、降水均呈显著相关,植被生长对气温、降水的滞后效应不明显。本研究中 6 月气温对 NDVI 值有正向影响,6 月是植物生长旺盛期,气温的升高有利于光合作用的进行,树木叶片的面积及数量得以增加,因此对遥感监测中 NDVI 值的增加是有利的。对于该地区降水来说,生长季前 2—4 月降水量的增加,水分储存于土壤中,为植物的生长提供了充足的水分条件。研究区 4 月和 6 月日照时数增加对 NDVI 的影响与温度作用类似,同样加强了光合作用,对植物的生长具有正向影响,有利于 NDVI 的增加。相对湿度的增加会使 NDVI 的值减少,因为相对湿度反映的是空气中水蒸汽的含量,当空气中的水蒸汽含量高时,易产生云雾。对多云雨少日照的研究区来说,相对湿度的增加表明该地区日照的减少,植物光合作用因此受到影响。此外过多的云雨不利于遥感卫星监测,也会降低 NDVI 的值。

2.4 树轮宽度指数与 NDVI 的相关关系

从图 2 可以看出,11 年来 NDVI 值在 0.84 与 0.88 间波动上升,线性年增长率为 0.11%,同时树轮宽度也在增长,但树轮宽度的变化相比于 NDVI 存在一年的滞后期。考虑到这种情况,采用相关分析方法,分别分析前一年及当年 NDVI 与树轮宽度指数标准化序列的关系,结果表明树轮的整轮宽度及早材宽度与前一年的 NDVI 有正相关关系。如表 3 所示,树木整轮宽度与前一年 NDVI 在 0.05 的显著性水平下正相关,相关系数为 0.682;而树木早材宽度与前一年 NDVI 的相关系数高达 0.801,在 0.01 的显著

性水平下呈正相关。此外,晚材宽度与前一年及当年 NDVI 没有显著的相关性。

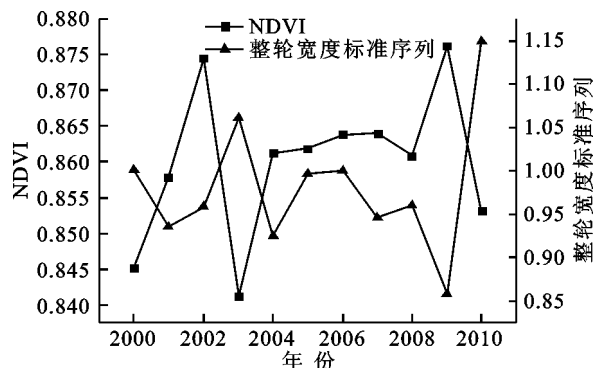


图 2 树轮宽度标准序列与 NDVI 的年际变化

对研究时段月 NDVI 数据进行分析,结果表明研究区月 NDVI 的最小值出现在 2 月为 0.40,最大值出现在 9 月为 0.74。并且 11 年来各月 NDVI 的标准差均小于 0.19,离散度较小,说明月 NDVI 变化不大。为了更加细致地研究树轮宽度指数与 NDVI 的关系,将月 NDVI 值与树轮宽度指数标准化序列进行相关分析(表 3),发现早材宽度与前一年 7 月、8 月及 9 月 NDVI 的平均值在 0.01 的水平上呈显著正相关,相关系数为 0.777,这与何吉庆等<sup>[6]</sup>的研究结果相似。虽然晚材与前一年月 NDVI 变化仍然没有显著的相关关系,但与当年 4 月和 5 月 NDVI 的平均值在 0.05 的水平上呈显著负相关关系,相关系数为-0.646。

表 3 树轮宽度标准序列与 NDVI 的相关关系

NDVI	整轮宽度	早材宽度	晚材宽度
年最大 NDVI(前一年)	0.682*	0.801**	-0.159
7—9 月 NDVI(前一年)	0.761*	0.777**	0.406
4—5 月 NDVI	-0.618*	-0.439	-0.646*

3 讨论

树木通过光合作用将二氧化碳、水及矿质盐转变为有机化合物,同时将太阳的辐射能转变为内能,为自身的生长提供营养物质。叶片是光合作用的主要器官,植物通过光合作用将 CO<sub>2</sub> 固定和同化,产生碳水化合物。其中同化作用是将碳水化合物、脂肪和蛋白质合成原生质、细胞壁和大量酶促系统等其他物质的过程<sup>[17]</sup>,所合成的这些同化物质不断地向根、茎、叶等组织中运输,为这些器官的生长发育提供能量或作为贮存物质积累起来。因此实际上,树木生长轮的形成是由同化作用产生的。

商志远等对大兴安岭樟子松树轮的研究中发现当年早材宽度与前一年晚材宽度呈显著正相关,因此认为早材的形成可能利用了前一年光合作用的产

物<sup>[11]</sup>。国外的许多研究认为,早材形成期间利用了前一年光合作用的产物或每年早材形成时主要利用了前一年生长储存的碳<sup>[18-20]</sup>。Robertson 等通过研究英国东部橡树中的碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )发现早材中的碳同位素与前一年晚材中的碳同位素是相关的,认为早材中的碳是利用前一年碳水化合物同化作用合成的<sup>[21]</sup>。之前已有研究证明在生长季初期树叶中的  $\delta^{13}\text{C}$  会有明显下降,说明同化物质被运输到其它器官以供植物生长<sup>[22]</sup>。因此树木的光合作用主要通过叶片实现,其产物可以为下一年的早材积累提供碳水化合物,表现为使早材增宽。这种情况也被本研究结果(表 3)所证实:当年树轮的早材宽度与整轮宽度均与前一年 NDVI 有显著的正相关关系。既然 NDVI 可以反映树木冠层的情况,也就是树叶生长的情况,同时也间接反映了光合作用强度,所以早材宽度与前一年 NDVI 相关表明早材的形成会利用前一年光合作用的产物。本研究中早材宽度与前一年 7 月、8 月、9 月 NDVI 的月平均值正相关也说明了这一结论。7 月、8 月、9 月是研究区植物生长的高峰时期,有较好的环境条件,因此会产生更多的碳水化合物,之后进入生长季末期,碳水化合物的盈余会被储存下来,以供来年生长。当早春幼芽破壳而出时,一株树木的幼嫩部生长全靠去年贮存在茎和根中的干物质,糖、氨基酸和生长调节物质被运输到生长的芽中。之后当叶子长成时,就把多余的物质送回茎和根。茎利用这些物质实现自身增宽,根也在土壤中繁殖起来。如果再有剩余,那就贮藏起来以供来年春天使用<sup>[23]</sup>。因此生长季末晚材的生长也会部分利用当年贮存在库里的光合产物,可以反映当年的环境条件<sup>[24]</sup>。如果 4 月、5 月的 NDVI 升高,说明树木生长比较活跃,枝叶生长状况较好,需要消耗较多的营养物质,积累下来的碳水化合物就会减少,所以晚材会与 4 月、5 月的 NDVI 值呈负相关。

综上所述,NDVI 与树木的树轮宽度表现出的正相关关系,实际上是受到气候对树木冠层的影响,经过植物的生理过程,表现为当年树木的主干生长利用了上一年储存的营养物质。这种关系说明相对于林冠变化,研究区杉木主干的变化要滞后一年,当年的 NDVI 不能完全反映当年树木主干的生长情况。

4 结论

(1) 2000—2010 年以来,树轮宽度原始值呈减少的趋势,整轮宽度以 65.86  $\mu\text{m/a}$  的速率减少,早材宽度以 50.307  $\mu\text{m/a}$  的速率减少,晚材宽度减少的速率为 15.532  $\mu\text{m/a}$ 。

(2) 标准化后的树轮宽度指数与前一年及当年的气候因子存在不同程度的相关关系。在前一年的气候因子中,6月的平均最低气温和平均最高气温均与树轮整轮宽度呈显著的正相关关系;9月和10月的日照时数也与树轮整轮宽度呈正相关关系;而前一年10月到当年3月的降水与整轮宽呈负相关关系。轮宽与当年气候因子的关系表现为,当年5月与10月的平均气温与晚材宽度均呈显著的负相关关系,而当年7月和8月的气温与晚材呈正相关关系;当年5月的降水与晚材宽度呈负相关关系,与此同时当年3—6月的日照与整轮宽度呈负相关关系。

(3) NDVI与同期气候因子呈现显著的相关性,表现为NDVI与6月的气温和日照时数均呈显著的正相关,同时NDVI与2—4月的降水呈显著的正相关关系,而与7月的相对湿度有显著的负相关关系。

(4) 树轮的整轮宽度及早材宽度与前一年NDVI有显著的正相关关系,并且也与前一年7—9月的NDVI呈显著的正相关关系;而树轮的晚材宽度与当年4—5月NDVI呈显著的负相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 徐德应. 中国森林与全球气候变化的关系[J]. 林业科技管理, 2002(4): 23-27.
- [2] 宫超, 汪思龙, 曾掌权, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1935-1941.
- [3] 沃晓棠, 田松岩, 韩丽冬, 等. 小兴安岭两种林型的土壤有机碳研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 13-23.
- [4] 库姆斯 J, 霍尔 D O, 朗 S P, 等. 生物生产力和光合作用测定技术[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [5] 刘正佳, 邵全琴. 三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 334-339.
- [6] 何吉庆, 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.
- [7] Wang J, Rich P M, Price K P, et al. Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(16): 3127-3138.
- [8] 范玮熠, 王孝安. 树木年轮宽度与气候因子的关系研究进展[J]. 西北植物学报, 2004, 24(2): 345-351.
- [9] 李坚, 刘一星, 崔永志, 等. 人工林杉木幼龄与成熟材的界定及材质早期预测[J]. 东北林业大学学报, 1999, 27

(4): 24-28.

- [10] Fritts H C. Tree Rings and Climate[M]. London: Academic Press, 1976.
- [11] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization[M]. Tucson: Univ. of Arizona, 1985.
- [12] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 两种 NDVI 时间序列数据拟合方法比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 183-188.
- [13] 商志远, 王建, 崔明星, 等. 樟子松树轮  $\delta^{13}\text{C}$  的年内变化特征及其对气候要素的响应[J]. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1256-1267.
- [14] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [15] 崔明星, 何兴元, 陈玮, 等. 河北木兰围场油松年轮生态学的初步探究[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2339-2345.
- [16] 刘灿, 高阳华, 李月臣, 等. 基于 NDVI 的重庆市植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1514-1520.
- [17] 陈忠辉. 植物与植物生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [18] Smith J L, Paul E A. Use of an in situ labeling technique for the determination of seasonal  $^{14}\text{C}$  distribution in Ponderosa pine[J]. Plant and Soil, 1988, 106(2): 221-229.
- [19] Lacointe A, Kajji A, Daudet F A, et al. Mobilization of carbon reserves in young walnut trees[J]. Acta Botanica Gallica, 1993, 140(4): 435-441.
- [20] Hoch G, Richter A, Körner C. Non-structural carbon compounds in temperate forest trees[J]. Plant, Cell & Environment, 2003, 26(7): 1067-1081.
- [21] Robertson I, Loader N J, McCarroll D, et al.  $\delta^{13}\text{C}$  of Tree-ring lignin as an indirect measure of climate change[J]. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2004, 4(2/3): 531-544.
- [22] Leavitt S W, Long A. Evidence for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  fractionation between tree leaves and wood[J]. Nature, 1982, 298: 742-743.
- [23] 罗宗洛. 植物生理知识[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- [24] Porté A, Loustau D. Seasonal and interannual variations in carbon isotope discrimination in a maritime pine (*Pinus pinaster*) stand assessed from the isotopic composition of cellulose in annual rings[J]. Tree Physiology, 2001, 21(12/13): 861-868.