

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*

吴祥定

邵雪梅

中国科学院
(地理研究所, 北京 100101)
国家计划委员会

(中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710054)

提 要 依据树木径向生长的基本特征, 本文采用吉林长白山和四川贡嘎山二个地点的树木年轮宽度资料, 建立了差值年表, 揭示了它们对气候因子的响应程度, 分析了气候变化对树木生长的影响。结果表明, 以树木年轮宽度指数为分析对象, 有利于提高分辨率, 研究逐年气候变化对树木生长的影响。同时, 当全球增暖分别为 1°C 、 2°C 和 3°C 时, 我国长白山区的树木径向生长量和材积增加量分别为 $9.2\% \sim 24.4\%$ 、 $15.7\% \sim 44.7\%$ 和 $22.3\% \sim 66.3\%$; 在贡嘎山区增加量则分别为 $5.3\% \sim 13.9\%$ 、 $10.1\% \sim 27.3\%$ 和 $14.7\% \sim 41.6\%$ 。增加量在东北地区高于西南地区。

关键词 树轮宽度指数 气候变化 树木生长量

1 引言

在林业上, 树木生长量通常包括三部分, 即胸径、树高与材积生长量^[1]。毫无疑问, 要测定一个特定树种在某种立地条件下的生长量, 宜选择样地作解析木分析, 计算出不同树龄段上述三部分的总生长量、连年生长量和平均生长量。然而, 我们注意到胸径生长与树高生长是既互相联系又互相制约的, 它们的生长趋势较为接近, 都是幼龄时生长快, 后逐渐减缓。材积通常是依据胸径与树高推算出来的, 同时也可以仅用胸径大小进行推算, 即所谓“二元材积”与“一元材积”。因此, 胸径高度的径向生长在一定程度上可以表征树木生长量的变化。尤其需要强调的是, 在分析气候变化对生长量的影响时, 由于气候年际变率大, 采用胸径的逐年生长变化值, 即以树木年轮宽度值作为代用指标, 显然有利于提高分辨率, 更具针对性。

本文采用的树木年轮宽度资料, 是一个经过标准化的、无量纲的、平均值为 1.0 的轮

* 国家科委全球气候变化国家研究项目及国家自然科学基金支持。

来稿日期: 1996—08; 收到修改稿日期: 1996—11。

宽指数序列^[2]。它的大小变化代表了年际间树轮宽度的相对变化，因为树龄大小对轮宽生长趋势的低频影响已被剔除，轮宽指数序列主要反映了高频变化。这种高频变化通常与气候要素的变化是相联系的。在树木年轮气候学中，采样点的选择往往保证树木生长对气候要素变化的响应是稳定的。欲分析树木生长与水分状况的关系时，采样点多选择在干旱、半干旱地区，而研究生长与热量状况的关系时，采样点宜在高寒的森林上限附近。这样一来，限制树木生长的气候因子相对稳定，有利于研究气候变化对生长量的影响。

树轮宽度指数序列的建立是更为严格的。在取样时，每个样点至少采集 20 株树，每株树取 2 个钻芯。经过交叉定年和宽度量测后，去除每株树由树龄造成的生长趋势及其它非气候原因引起的低频变化，再经过加权平均获得最终的树轮宽度指数序列。这就使得树木个体变化的“噪音”减至最小，而使群体变化的“信息”相对提高，从而表征树木生长的群体变化。显然，采用树轮宽度指数资料进行气候变化对树木生长量影响的研究，不仅是可行的，而且可能会使传统的生长量计算方法有所改进。

本文选用了我国东北林区 and 西南林区各一个地点的轮宽指数序列，尝试分析气候变化对树木生长量的影响。

2 资料来源与处理方法

所选用二个地点的树木年轮资料，一是取自我国东北的吉林省长白山天池附近，记为 CBL2，树种为长白落叶松(*Larix olgensis*)，是这一带主要优势建群树种之一^[3]；另一个是取自我国西南的四川省贡嘎山东坡，记为 HLG，树种为麦吊云杉(*Picea brachytyla*)，也是在川西山地一种分布很广的优势建群树种^[4]。它们所处的位置(纬度、经度和海拔高度)、样本量和序列长度等，均列在表 1 中。CBL2 的取样高度虽只有海拔 1750m，但它地处严寒的气候之中，且很接近当地森林上限 1900m。HLG 的取样高度亦十分接近当地的森林上限，而且紧依著名的海螺沟冰川前缘北翼，比冰川末端的高度还高出 20m 左右。

表 1 树轮取样地点概况
Tab.1 Information of tree-ring sampling site.

代号	地区	纬度(N)	经度(E)	高度(m)	树种	样本量	年代长度
CBL2	吉林长白山	42°03′	128°04′	1750	长白落叶松	22(44)	1602~1993
HLG	四川贡嘎山	29°33′	101°59′	3300	麦吊云杉	25(50)	1723~1993

依据树木年轮学分析的基本程序^[5-6]，将所取样本进行了交叉定年与量测，再用计算机程序 COFECHA 作交叉定年与量测的检验^[7]，确保结果准确无误。然后，采用程序 ARSTAN 建立树轮宽度指数序列^[8]，除了常规的标准化序列(STD)以外，还去除群体中所包含的树木个体特有的和由前期生理条件对后期生长造成的持续性影响，建立了一种新的差值序列(RES)。这二种序列的基本统计特征列于表 2。显然，尽管二种序列的平均值都为 1.0，但 RES 序列比起 STD 序列来平均敏感度有所提高，而一阶自相关系数却大为减小，接近于 0(表 2)。为说明 RES 序列中所含高频变化的有关信息，分别计算了这二种序列在共同区间内的二种平均相关系数(r_1 样本间， r_2 树间， r_3 树内)、序列的信噪比(SNR)、第一主分量解释总方差的百分比(PCA1)和样本对总体的解释信号(EPS)等统计量(表 3)。不难看出，除树木个

体特有持续性序列(RE)的各项统计量均比去趋势序列(DE)要高的多。这说明差值序列中的高频振荡很大程度上是同步的,更能代表总体变化。由于只有气候要素年际间的高频变化才能产生取样点样本群体的这种同步变化,因此差值序列的高频振荡往往表征了气候变化的信息^[9],这对研究气候变化影响是有价值的。因此,本研究所选用的、供进一步分析的二个地点树轮序列,均为差值序列。

表 2 不同树轮宽度序列的基本统计量
Tab.2 Ring-width chronology statistics.

代号	序列样本量	种类	平均值	平均敏感度	均方差	阶自相关
CBL2	20(40)	STD	1.0000	0.273	0.275	0.300
		RES	1.0000	0.309	0.262	-0.009
HLG	15(30)	STD	1.0000	0.1206	0.1559	0.4930
		RES	1.0000	0.1601	0.1400	-1366

表 3 不同树轮宽度序列共同区间分析的基本统计量
Tab.3 Statistics of Common interval analysis.

代号	序列种类	r ₁ 样本间	r ₂ 树间	r ₃ 树内	信噪比	EPS	PCA(1)
CBL2	DE	0.515	0.509	0.698	18.68	0.949	53.64
	RE	0.520	0.515	0.706	19.09	0.950	53.84
HLG	DE	0.183	0.171	0.492	2.898	0.743	22.81
	RE	0.257	0.246	0.532	4.579	0.821	29.72

为表明这二个地区的气候变化特征及其影响状况,分别选用距离取样地点最近的气象台站(吉林天池和四川泸定)自开始观测以来的各年逐月的气象记录。它们的基本气候概况大体可从逐月平均气温与降水量变化看出(图 1)。吉林长白山天池的月平均气温变化,最低和最高值分别出现在 1 月和 7 月,达-23.4℃和 8.53℃,月平均气温大于 0℃的月份仅 6 月~9 月。降水的年内变化呈单峰型,且 63.1%的降水集中在 6 月~8 月。离四川贡嘎山海螺沟不到 40km 的泸定县城,尽管海拔高度和地貌条件均与取样点很不相同,二者的气候状况必然有较大差异,但其年内与年际间的变化趋势较为相近。

3 树木生长对气候的响应

在树木年轮气候学研究中,广泛采用响应函数、相关函数与单年分析等途径,来判断树木年轮生长对生长季和生长前期气候要素的响应程度^[10~12]。由 CBL2 序列与天池气象站气象记录(1953 年~1993 年)计算出来的响应函数结果表明(图 2),树木生长对气温变化的响应较为明显,从前 1 年 10 月至当年的 4 月,树木生长大体与气温呈负线性关系,其中,以 3 月份为最显著,而在 5 月、6 月和 8 月树木生长与气温呈正线性关系,其中以 6 月份为最显著。树木径向生长对气温的这种响应关系主要是由于树木的生理过程所决定的。在天池气象站,从前 1 年 10 月至当年的 5 月上旬,日最高气温均低于 0℃,在相应的采样高度,

到4月中、下旬后,日最高气温才高于 0°C ,在如此低温的季节,一般没有光合作用,可能发生的生理过程为呼吸作用和蒸腾作用。而呼吸作用发生的最低温度不低于 -12°C ^[13],3月时在采样高度日最高气温通常均高于 -12°C ,正是有呼吸作用而没用光合作用时候,因此,3月气温越高,呼吸作用越强,消耗的养分越多,在生长季时径向生长就越慢,造

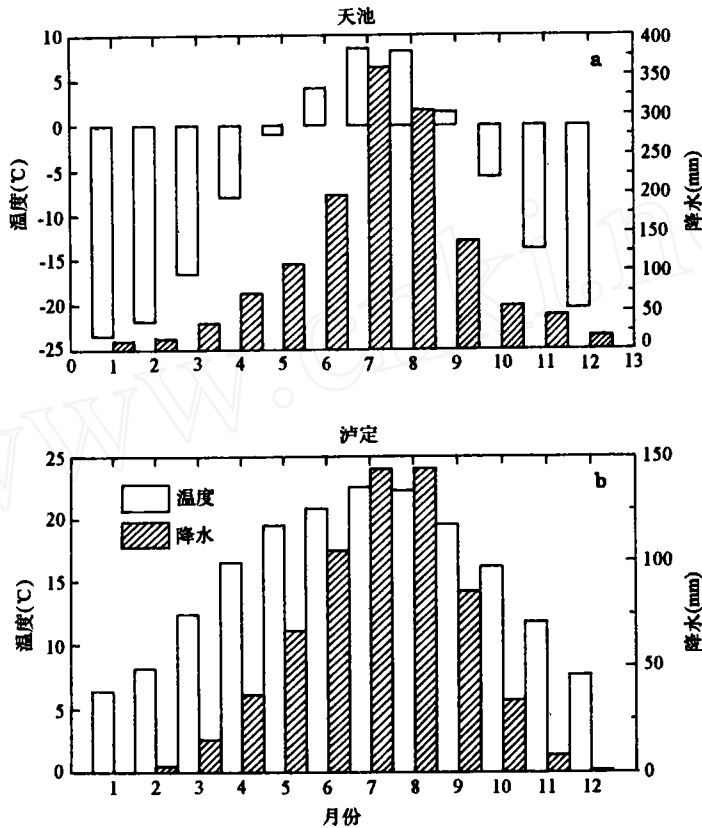


图1 二个地点的平均气温与降水量逐月分布

Fig. 1 Monthly mean temperature and total precipitation at
A) Tianchi meteorological station and B) Luding meteorological station

成3月气温与树木生长呈显著的负线性关系。到4月时,在采样高度,月平均最高气温会超过 2°C ,光合作用会补偿呼吸作用所消耗的部分养分,因此,4月气温与树木生长间的负线性关系不如3月的显著。5月时,在采样高度,月平均气温在 0°C 以上,光合作用开始明显加强,气温与树木生长呈正线性关系,但没达到统计上的显著水平,因为此时期夜间的气温还会很低,呼吸作用还会消耗养分。到6月上旬时,日最低气温达 0°C 以上,平均气温达 5°C ,此时,生长季开始,因此,6月平均气温越高,生长季开始越早,生长季也就会越长,从而产生较宽的年轮,气温与树木生长呈最显著的正线性关系。7月气温达全年最高,温度已不成为生长的限制因子,而云、雾可能会影响光合作用。8月随着气温的降低,温度的正影响又较显著,但低于6月。树木生长对降水的响应,部分表现为与前期降雪量的正线性关系。其余则不很明显。显然,可以认为CBL2既然属于接近森林上限的树木群体,那么它的生长状况主要对气温变化响应敏感。

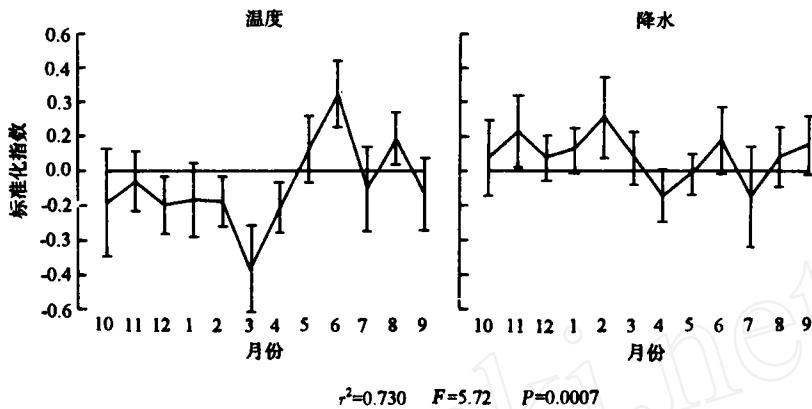


图 2 CBL2 的响应函数
Fig. 2 Response function for CBL2

由 HLG 轮宽指数与泸定气象观测记录(1956 年~1993 年)计算的响应函数(图 3),亦大体说明在川西高海拔,尤其是接近现代冰川的树木,其生长状况主要对生长季内的气温变化响应敏感。

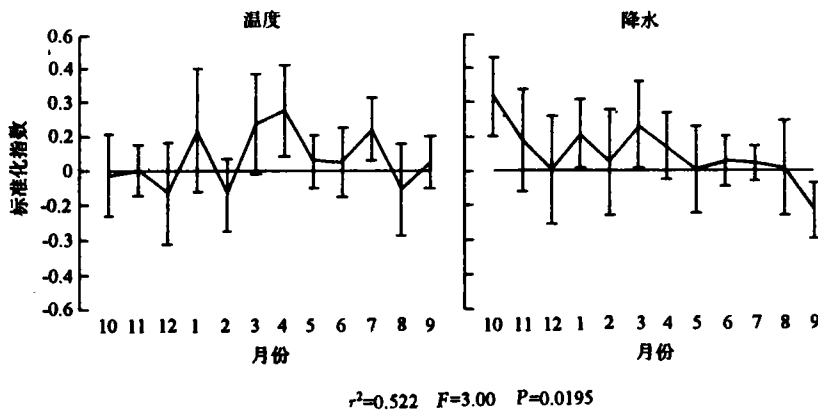


图 3 HLG 的响应函数
Fig.3 Response function for HLG

类似地,相关函数分析结果也表明这二个地点的树木生长主要与气温变化有明显的关联性,这里无需赘述。

单年分析的结果则进一步说明树木生长对气温变化的响应。在 70 年代,长白山天池附近,1970 年与 1972 年的气温变化有较明显的差异,从上 1 年 10 月份至当年 3 月,1970 年的气温均为负距平,而 1972 年则出现不少正距平;在 4 至 8 月,1970 年仅 7 月份为负距平,其余均为正距平,而 1972 年恰好相反,除 7 月为正距平以外,其余均为负值(图 4)。

这二年 CBL2 的树轮指数值就出现很大差异, 1970 年为 1.36, 而 1972 年仅为 0.65。同样, 1981 年与 1984 年的气温变化差异十分明显, 所造成的年轮指数值分别为 0.63 与 1.48。在四川西部贡嘎山东侧亦有类似的实例, 这里不再一一列举。

在判断树木生长对气温变化响应较为敏感的同时, 还深入分析了对气温要素中月平均气温(TEM), 月平均最高气温(MXT)和月平均最低气温(MIT)响应的差异。CBL2 轮宽指数与天池气象资料的相关系数计算表明, 尽管轮宽指数与 3 种气温变化的相关性大体一致, 但具体数值仍然有一些差异(表 4)。以达到 95 % 显著水平的要素为例(表中以 * 表示), 可以看到在 3 月的负相关中, 以与 MXT 的相关系数绝对值为最大, 达 -0.54, TEM 次之, MIT 最小, 仅 -0.41。在与 6 月的正相关中, 与 MXT 相关系数最高, 达 0.51, 而 MIT 最小。与 8 月的正相关中, MIT 与 TEM 均已达显著水平, 而 MXT 未达到显著水平。HLG 轮宽指数与泸定气象资料的相关系数计算结果中, 仍以达到 95 % 显著水平的要素为例, 在 4 月均为显著正相关, 其中以 MIT 达最大; 而 3 月与 7 月的正相关, 仅 MIT 达到显著水平。

与不同气温要素相关的差异, 将有助于我们进一步判断在树木生长过程中, 不同的气温要素影响径向生长的程度大小, 选择其重要的要素作为树木生长的控制因子。

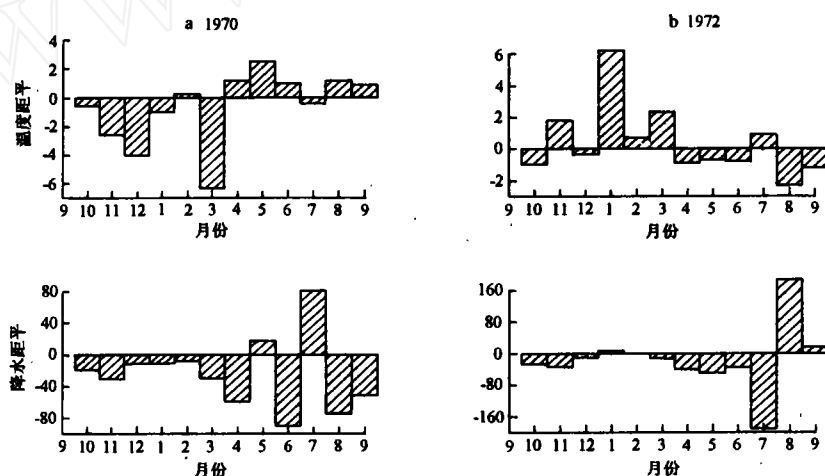


图 4 长白山天池 1970 年和 1972 年的气候状况

Fig.4 Monthly temperature and precipitation departure at Tianchi station for A)1970 and B)1972

4 气候变化影响的估算

为定量推算气候变化, 尤其是全球增暖对树木径向生长量的影响, 可利用树木年轮指数与气象记录之间的相关性, 建立起可信度较高的回归方程, 其中以树轮宽度指数值为预报对象(y), 而气候因子(x)为预报因子。依据回归方程, 就不难估算出由气候因子变化造成树木径向生长量变化的具体数值。

在树轮指数 CBL2 和天池气象站气候资料之间所建立的多元回归方程中, 经过筛选, 可信度较高的有如下 2 个。

表 4 树木年轮指数与不同气温要素变化的相关系数值
Tab. 4 Correlation coefficients between climatic elements and ring-width indices

代号	要素	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CBL2	MIT	0.17	-0.15	-0.11	-0.27	0.01	-0.41*	-0.13	0.26	0.48*	-0.19	0.43*	.00
	TEM	0.06	-0.20	-0.17	-0.24	-0.09	-0.50*	-0.15	0.26	0.49*	-0.23	0.39*	-0.11
	MXT	-0.02	-0.18	-0.19	-0.26	-0.22	-0.54*	-0.16	0.16	0.51*	-0.25	0.33	-0.12
	PPT	0.07	0.17	0.23	0.22	0.22	0.13	-0.01	0.07	0.02	0.10	0.08	0.27
HLG	MIT	-0.29	0.05	0.03	0.01	0.11	0.38*	0.48*	0.10	0.27	0.39*	-0.02	0.15
	TEM	-0.14	0.16	0.16	-0.03	0.10	0.30	0.45*	0.05	0.21	-0.27	-0.15	0.06
	MXT	-0.03	0.25	0.15	-0.05	0.11	0.32	0.36*	0.10	0.17	0.08	-0.11	-0.01
	PPT	0.50*	0.18	0.06	0.16	-0.20	0.06	-0.04	0.05	0.13	0.24	0.33*	-0.26

* 达到 95 %显著水平

一是对应于树轮指数(y)的秋、冬、春、夏四季平均气温($x_1\sim x_4$)的回归方程:

$$y = -1.39 - 0.0043x_1 - 0.0406x_2 - 0.0694x_3 + 0.132x_4$$

方程的复相关系数平方项,即方差解释量 $R^2 = 0.329$, 用作信度检验的 p 值为 0.041, 表明达到 95 %信度水平。在未来全球增暖,年平均气温不断升高的情况下,该地树木生长会受多大影响呢?这里讨论当年平均气温升高分别达 1℃、2℃和 3℃的三种情景,造成树木径向生长与材积的可能变化。

可以假定,年平均气温的升高是由于各月和每个季节平均气温的增加引起的,且增加量是相对均衡的。这样,将气温增加值($\Delta T=1℃$ 、 $2℃$ 、 $3℃$)分别代入方程式,可以计算出树木径向生长量分别达 5.0 %、6.8 %和 8.6 %。

依据我国林业部林业勘测设计院统计的吉林地区长白落叶松标准立木一元材积表,即材积 $V(m^3)$ 与树木胸径 $D(cm)$ 之间的关系式:

$$V = 0.00015568D^{2.5312}$$

可以推算当增加量分别达上述三个百分点时, V 的增加值则分别为 13.2%、18.1%和 23.2%。

另一个可以选用的回归方程为:

$$y = -0.513 + 0.0253x_1 - 0.0187x_2 - 0.0428x_3 + 0.101x_4$$

式中, y 为树轮指数, x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 分别为前 1 年 9 月、12 月和当年 3 月与 6 月的平均气温。尽管这 4 个月并非 4 个季节的中间月份,不完全代表季节平均状况,但它们分属 4 个不同季节,且对树木生长有较明显的影响。方程的 $R^2=0.501$, $p=0.02$, 可信度较前一方程有较大的提高。

当气温分别增加 1℃、2℃、3℃时,由此估算出的树木径向生长量分别达 9.2 %、15.7 %和 22.3 %。材积则分别增加 24.4 %、44.7 %和 66.3 %。

由这 2 个回归方程估算出来的树木生长量虽然有一定差异,但它们都表明随气温升高,无论是树木径向生长,还是材积量都有所增加。考虑到回归方程所解释的方差量与信度水平差异,选用后一个方程的计算结果似更可靠些。

对川西地区海螺沟树轮指数 HLG 和泸定气象站气候因子之间的关系,则以树轮指数与

平均最低气温的变化为最佳。由于在中纬度许多地区，气候增暖的现象往往夜间比白天更为明显^[14]，故采用平均最低气温进行分析有时会比平均气温更能反映全球增暖的特征。选用 1、4、7、10 月平均最低气温作为全年冬、春、夏、秋四季的代表，其中 10 月则是前一年的气温对当年树轮生长的影响。建立的回归方程如下：

$$y = 0.273 - 0.054x_1 + 0.007x_2 + 0.054x_3 + 0.039x_4$$

其中， y 为树轮指数， x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 分别为前 1 年 10 月及当年 1、4、7 月的平均最低气温。方程的 $R^2=0.436$, $p=0.003$ ，达到 99 % 的信度水平。

当未来气温升高分别 1℃、2℃ 和 3℃ 时，若不考虑最低气温可能会升高更多的情况，依据回归方程所推算出的树木径向生长量平均增加将分别达 5.3 %、10.1 % 和 14.9 %。

参照毗邻的西藏昌都川西云杉一元立木材积表：

$$V=0.00013113D^{2.51}$$

式中， V 为材积(m^3)； D 为胸径(cm)。对应于树木径向生长量的增加值，立木材积的增加大约为 13.9 %、27.3 % 和 41.6 %。

表 5 气温升高对树木生长量影响的估算(单位：%)

Tab. 5 Percentages of increase in radial growth and volume due to increase in temperature

地点	+ 1℃		+ 2℃		+ 3℃	
	径向	材积	径向	材积	径向	材积
吉林长白山	9.2	24.4	15.7	44.7	22.3	66.3
川西贡嘎山	5.3	13.9	10.1	27.3	14.9	41.6

从表 5 不难看出，同样气温升高 1℃、2℃ 和 3℃，二地树木生长量的增加不尽一致。大体说来，长白山地区无论是树木径向生长量，还是材积量的增加都高于贡嘎山地区，而且随气温升高值越大，这种差异表现得越明显。

根据现有各种大气环流模式模拟结果来看^[15]，同期内，全球增暖的数值在高纬地区大于低纬地区。这意味着，我国东北地区增暖可能会较西南地区更大些，那么近期内长白山树木生长量的增加较贡嘎山更明显些。

5 结论

本文以我国东北长白山和西南贡嘎山为例，采用树木年轮学方法，对全球气候增暖影响树木生长量进行了估算。有关分析途径与推算结果，大体可归纳如下：

(1) 以树木年轮轮宽指数为分析对象，替代传统的树木径向生长计算方法，有利于研究气候逐年变化对树木生长的影响。

(2) 随着气温升高 1℃~3℃，在长白山树木径向生长和材积增加量可达 9.2%与 24.4%~22.3 %与 66.3 %；在贡嘎山地区则增加量为 5.3 %与 13.9 %~14.9 %与 41.6 %。

(3) 由于气温升高造成长白山地区树木生长量的增加会高于纬度偏南的贡嘎山地区达 4%~25 %，如果再考虑随纬度偏北，在同期内气温升高的值会更大些，则我国东北地区树木生长量的增加会比西南地区更多些。

参 考 文 献

- 1 北京林学院主编. 植物生理学. 北京: 中国林业出版社, 1981.
- 2 Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976.
- 3 吉林省环境保护研究所. 长白山地区自然资源开发与生态环境保护. 长春: 吉林科学出版社, 1988.
- 4 刘照光主编. 贡嘎山植被. 成都: 四川科学出版社, 1985.
- 5 Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- 6 吴祥定等. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- 7 Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69~75.
- 8 Cook E R. A time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization. Ph. D. Dissertation. The University of Arizona, Tucson, 1985.
- 9 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立. *地理学报*, 1994, 49: 174~181.
- 10 Fritts H C. Relationships of ring widths in arid-site conifers to variations in monthly temperature and precipitation. *Ecological Monographs*, 1974, 44: 411~440.
- 11 Blasing T J, Stahle D W, Duvick D N. Response function revisited. *Tree-ring Bull.*, 1984, 44: 1~15.
- 12 Kienast F et al. Tree-ring studies on conifers along ecological gradients and the potential of single-year analyses. *Can. J. For. Res.*, 1987, 17: 683~696.
- 13 Freeland R O. Apparent photosynthesis in some conifers during the winter. *Plant Physiol.*, 1944, 19: 179~185.
- 14 Houghton T J, Callendar B A, Varney S K. *Climate Change-Supplement: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- 15 Houghton T J, Jenkins G J, Ephraums J J. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

A PRELIMINARY STUDY ON IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON TREE GROWTH USING TREE RING-WIDTH DATA

Wu Xiangding

Shao Xuemei

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(Xi'an Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Science, Xi'an 710054)

Key Words ring-width index, climatic change, grow amount of trees

Abstract

This article describes the preliminary analysis of the possible impact of air temperature increase on tree growth using dendroclimatic methods. Residual tree ring-width chronologies of Changbai larch from the north slope of Changbai Mountain, Jilin province and of sargent spruce from the east slope of Gongga Mountain, Sichuan province are involved in this study. The relationships between tree growth represented by ring-width index and climate elements including monthly mean air temperatures and monthly total precipitation were studied by response function and correlation function of dendroclimatology. The results indicate that both species are sensitive to temperature. Based upon the regression equation developed between ring-width index and selected monthly mean temperatures, the percentages of increase in radial growth of tree were estimated with air temperature going up 1 °C, 2 °C, 3 °C, respectively. This estimation is upon the assumption that air temperature will go up due to CO₂-induced climatic change. Using experiential equation of the two studied species, the increase percentages in volume of tree were also estimated from changes in diameter of tree. The results show that when air temperature goes up 1 °C, 2 °C, and 3 °C, respectively, Changbai larch will increase by 9.2%, 15.7% and 22.3% in diameter and 24.4%, 44.7% and 66.3% in volume. For sargent spruce, the percentages for diameter increase are 5.3%, 10.1% and 14.9% and 13.9%, 27.3%, 41.6% for volume increase. Obviously, with the same scenario Changbai larch grows more rapid than sargent spruce in the study area.

作者简介

吴祥定，男，1941年生。毕业于南京大学气象系，1996年5月在美国纽约不幸殉职。生前为中国科学院地理研究所研究员、气候研究室主任。主要从事树木年轮气候学研究。