

根据树木年轮长记录推测古气候

V. C. 小拉马奇 (Lamarche) *

研究气候变化不能光依靠气象要素的观测记录, 因为气象记录年代很短, 并且不能充分地描述自然气候状况的变化范围。本文试图利用千年树轮宽度变化的古气候信息, 例如用美国西部的刺毛果松树 (bristlecone pine) 的资料, 来推测古气候的状况。

由于刺毛果松树个别树木的树龄很高, 而且还有一些死亡树木至今仍然存在, 所以通过交叉定年代 (cross dating), 就可以得到很长的树轮宽度年表。所谓交叉定年代是指各树轮序列间宽年轮和窄年轮的相互配合。年轮顺序的配合是由于同一地区的树木对特殊年份的限制气候具有共同的响应。对刺毛果松树树轮的研究, 开始于本世纪 50 年代初, 在加利福尼亚东部的怀特山, 根据树木年轮样本, 揭示出代表干燥的下森林边缘附近的树木“早敏的” (“droughtsensitive”) 气候响应。结果得到了一个 8,200 年的年表。一般认为, 由于树木年轮资料

的不均一性、处理方法、以及取样量太少等问题, 树木生长中的较长时期的波动不是气候变化的可信指数, 因此用高通数字滤波除去。然而, 最近根据同一地区活树的大样本, 取得了一个未经过滤的树轮指数的 1,100 年记录, 并用于本文中。

最近, 在怀特山南部, 现代树线以上 150 米处, 发现大量的死树、圆木和残木片。这些重要的样本, 与附近活树样本的髓心部份年轮序列相衔接, 建立了一个以公元前 3,435 年为起点的 5,405 年的年轮宽度记录。由于下森林边缘和上树线树木的生长对气候变化的响应不同, 因此, 比较二者的轮宽记录, 就可以得到仅仅根据其中之一的记录不能得到的对古气候的认识。

用两个年轮记录交叉定年代之所以可能, 是因

* 作者是美国亚利桑那大学树木年轮研究实验室的树木年代学副教授

为在二者的环境中，较窄的年轮经常产生于同一年份。当然，“窄”并非是指其绝对值小，只是与其相邻的年轮比较而言。这两个记录之间的相关性主要取决于所考虑的频率。互谱分析指出，相感 (coherency) 的平方 (为两个时间序列之间频率依从关系的度量) 对于以每年 0.5 到 0.1 的频率变化来说是高的，但低频部分却迅速地下降到零值附近。就是说，两个序列的高频变化肯定是相关的，但低频变化关系不一致。当较低频部分用高通数字滤波消去时，互相关就提高了。例如，两个经过滤以后的序列，以 100 年为一段，53 段逐段地作互相关分析，其互相关系数很高，平均大约为 0.6。反之，全部频率都考虑，相关系数就只有 0.4。对于这种频率依从关系的解释，看来在于二者环境中气候影响树木生长的途径不同。

树木年轮宽度序列的特性与树木的生长环境密切相关。并且，对气候异常响应最大的是那些气候分布极限附近的树木。Fritts 等发现，在离开森林边缘向森林中心移动时，树轮宽度序列内部以及树与树之间的相关减小，序列的标准偏差和平均敏感度 (为一个年际轮宽差别的度量) 也减小。刺毛果松树的分布，有上、下两个极限，由图 1 看出，在高度较低的区域，各树轮宽度序列间的相关、序列的标准偏差和平均敏感度的高值出现在下森林边缘附近，但在上树线附近其值也大。这表明在两处边界上树木对气候的敏感度都增大，不过气候对两处边界上树轮生长的影响方式有重大差别。

拔海低的刺毛果松树，其树轮宽度与水份有很大关系。降水多，特别是上一年夏、秋季及当年春季的降水多，就能促使树木在短短的夏季生长季节中长成个宽的树轮。而在同一时期中，高温将导致土壤水份的耗尽，使树木遭受干旱的威胁，对树

木的二氧化碳净同化作用起相反的影响，为以后的树轮生长留下的养份就较少。最重要的单变量看来是春季土壤水份的亏缺。

在怀特山，上树线位于森林下限以上大约 800 米处，在这范围内，平均年降水量约从 250 毫米增加到 400 毫米，7 月的日最高温度从 21°C 下降到 14°C。树木生长对气候的响应也随之而变化。

在上树线，土壤水份消耗对生长过程的限制常常比高度较低的地方轻，在大多数月份中，对生长不利的主要是低温。气体交换实验的结果指出，在海拔高的地方，低温可以有几种方式限制净吸收和二氧化碳的同化作用。首先，白天温度随高度升高而降低，结果造成海拔高的地方每天的净光合作用降低，因为光合作用的速率随温度而变化 (在保证适当的水份条件下)，冷夏的光合作用就比暖夏低。其次，温度太低将招致刺毛果松树的休眠。因此，一个长的暖季对于净光合作用是有利的。在冬季，刺毛果松树的光合作用大量减弱，所以长冬将导致贮存的养份大量损失，为下一个夏季生长留下的可利用的养份就较少。这些过程为特殊年份温度状态与当年或下一年轮宽生长的关系提供了依据。

此外，刺毛果松树的针叶至少可保留 10 年、30 年，甚至更久。针叶的长度有显著的年际变化，这与针叶伸长时的夏季温度密切相关 (图 2)，短针叶形成于冷夏。异常冷和异常暖的夏季的更迭，可能是上树线附近树木总光合作用变化较大的原因，并显著地影响树木净同化作用的能力。这种现象可能以两种方式影响树轮宽度，首先，由于长针叶的保存，树木生长对夏季温度降低的响应将滞后数年；其次，异常的冷夏对生长的影响将被缩小，但将延续若干年。这种平滑效应似乎可以说明为什么上树线轮宽序列的一阶自相关系数非常高 (0.6 到 0.8)，而下森林边缘的一阶自相关系数仅为 0.2 到 0.3。几个世纪或更长时期的树轮宽度变化对暖季温度变化的依赖性，似乎比只与几十年局地气候资料相比较所表明的更为密切。图 3 所示的年轮宽度变化曲线与年平均温度变化曲线趋势很一致。从 18 世纪中叶以来，生长速度显著地加快，和气象记录反映的全球温度升高是一致的。

在计算某一点树轮宽度序列之前，树轮宽度通常换算为无量纲指数，这是为了剔除轮宽序列中生物学的年龄趋势和减少树与树之间平均生长速度差异的影响。这种换算用于减少活树群树轮宽度资料的误差是合理的，因为活树群的全部序列几乎都

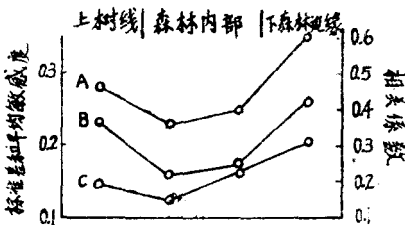


图 1 沿高度梯度 4 个生境的刺毛果松树树轮的统计。各生境上不同树的轮宽序列之间的平均相关 (A)、标准偏差 (B) 和平均敏感度 (C) 都表明在上、下分布极限处的环境威胁增加。

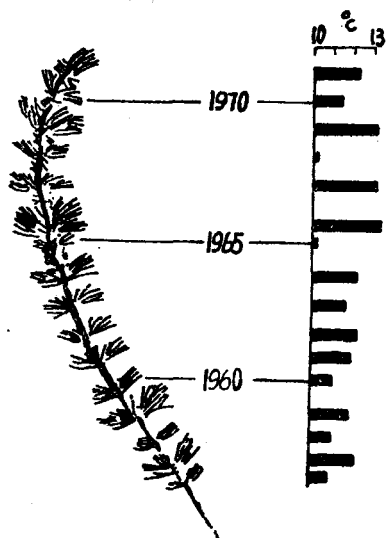


图2 上树线刺毛果松针叶长度变化与夏季温度（针叶在夏季伸长）的关系。一颗树的总光合作用的大波动可能是由异常冷和异常暖的夏季更迭引起的。温度资料是1958—1971年的7—8月平均最高温度

是同一时期的。但是当树轮宽度长记录是由很多短序列重迭构成时，这种换算必须小心。比序列更长时期的趋势将被缓和或消除。在估计年平均轮宽时，为了保留长波动的信息，即使有较大误差，也不把上树线轮宽资料变换为指数，而只表示为简单的平均轮宽。但要注意去掉某些树的髓心附近的年

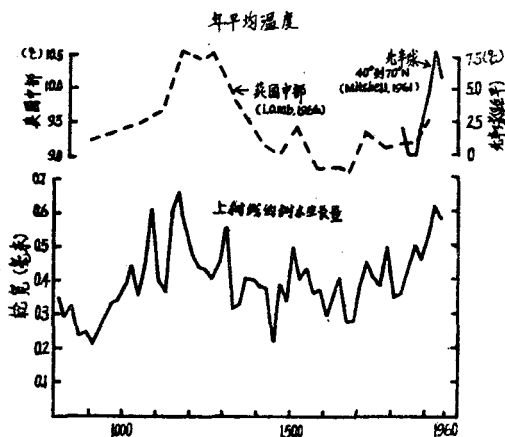


图3 怀特山上树线刺毛果松平均树轮宽度（每20年平均）与公元800—1960年区域的、全球的估计年平均温度的比较。北半球温度资料是对1880—1884年平均的距平。树木生长的低频波动反映出温度的变化。

轮，因为树心部分生长快是反映树木的青春活力，而不是反映气候的变化。

图4表明，在公元前3,500—1,300年之间，大部分时期树轮的生长率高，表示是相对温暖期，这时期当地的树线很高——大约在近几世纪树线以上150米处。在公元前1,300—200年，出现冷夏，怀特山树线变低，这期间整个北美的山岳冰川推进。在公元前200年到公元300年间，盛行暖夏。以后，由树轮记录和内华达山脉、落基山脉冰川的推进反映出又重新开始变冷了。在公元1,200年前后，出现过一短暂而显著的暖期。接着又是冷期，这时当地树线再度急剧降低。在最近的一个世纪中，树木生长率很高，表示是温暖时期。以上说明，即使只根据一个对气候敏感树轮长记录，都可以增进对过去气候变化情况的认识。

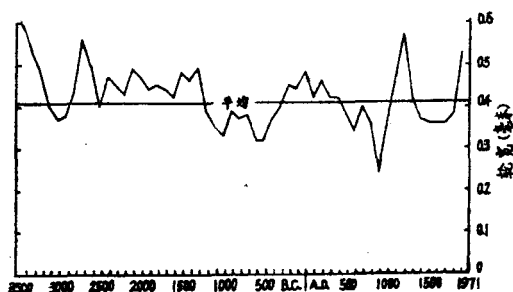


图4 公元前3551年到公元1950年上树线的平均轮宽（100年平均）变化。正距平表示暖季（4—10月）温度在多年平均以上。负距平表示为冷的状态。总的温度变化范围，根据其他证据，大约为2℃。

但是，不同生境中树木生长对气候响应的差异，能更好地描写过去的气候异常。土壤水分的不足能限制上树线和下森林边缘树木的生长。降水多，则两处的平均生长率都高。然而，温度对树木生长影响不同，因此，异常的高温和异常的低温将导致两处边界上树木生长的不同距平。若上树线和下森林边缘都形成宽轮，表示至少在温暖季节为暖湿气候条件；若上树线为宽轮，而下森林边缘为窄轮，则可以认为盛行暖干气候条件；反之，若上树线为窄轮，在较低处为宽轮，可能是反映冷湿的气候条件；若两处边界上的树都为窄轮，则表示冷干的气候条件。

由图5可见，在若干世纪或更长的时期中，怀特山各生境上的树轮有持续偏离正常生长水平的倾向，这可以指示温度和降水异常的组合格况。这种作法的意义在于有可能把推测的温度——降水异常

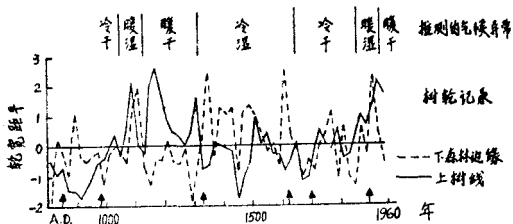


图5 在怀特山生态学的对照位置上树木生长的距平（相对于标准化的20年平均的偏差）和推测的气候异常。箭头指示的是内华达山脉附近冰川堆积的日期，在这期间，除最近的一次外，根据树轮证据都判定是比较冷。1300年代初和1600年代初的冰川推进也与不寻常的湿期一致。

同大气环流的特征联系起来。

根据怀特山的气候资料，研究了温度、降水异常与环流特征之间的关系。在近几年中，最常见的异常是冷湿和暖干气候，这在春季和秋季出现最多。冷干和暖湿异常也有出现，特别是在夏季。这种异常气候与特殊的环流型有关。从700毫巴月平均高度图上看，不寻常的冷湿春季、夏季和秋季，其环流特点是在太平洋沿岸上空有一高空槽（图6A）。来自北太平洋的移动性低压进入大陆的路径偏南，给怀特山带来大量的降水。冷干的气候条件与东北向的槽有关，这个槽的存在使得冷干的下沉空气沿着强大的高空高压的东部进入这个区域（图6B）。当同一位置为一高空脊时，则引起低压路径向北移动和暖干的气候条件盛行（图6C）。不多见的暖湿异常，有时在夏季出现，看来与百慕大高压超过其正常位置（图6F）向西和向北扩大（图6D）有关。然而，在某些月份，由于有了一个扩大的高压，在高压区西部的闭合环流妨碍湿空气流入这个区域，以致产生暖干的气候条件。

对过去持久性气候异常，可以用与这些异常相联系的环流型的平均频率变化来解释，而这些区域环流型又可进一步联系到全球环流的一般特征。与前几个世纪比较起来，1850—1940年间的特征是环流增强。在相应的纬向型环流上，高空西风带通常有一些半永久性波，北美西部上空有一广阔的平均高压脊。高空槽的平均位置在离岸相当远的太平洋上空（图6E）。低

指数情形被设想为已盛行过的许多“小冰期”（大约在1430—1850年间）。相应的经向型环流由较多的高空深槽和脊组成。在此期间，怀特山冷湿或冷干气候条件的盛行是与经向环流型一致的，因为夏季在太平洋沿岸经常有一个深高空槽发展（图6A、B）。

树木年轮宽度的变化已大量地用于古气候的推测，并取得了成功。此外，根据年轮的物理和化学性质来指示古气候的新方法现正在开展。例如利用x射线微显象密度测量木头密度的变化。初步的研究表明，木头密度对生长季节环境条件高度敏感，并发现与8月的温度和4—5月的总降水量的相关很好。又如测定木头中稳定的同位素比例，也是一种有希望的途径，氘—氢的比例可能指示降水。

树木年轮资料还能与其他反映古气候的资料，如花粉频率、冰川中同位素比例资料等结合在一起，为多变量统计分析提供大量的数据，对照气象记录时期的气候参数，可以更客观地探索过去的气候。

〔舒仑祖摘译自《科学》(Science),
Vol. 183, NO. 4129, 1974.〕

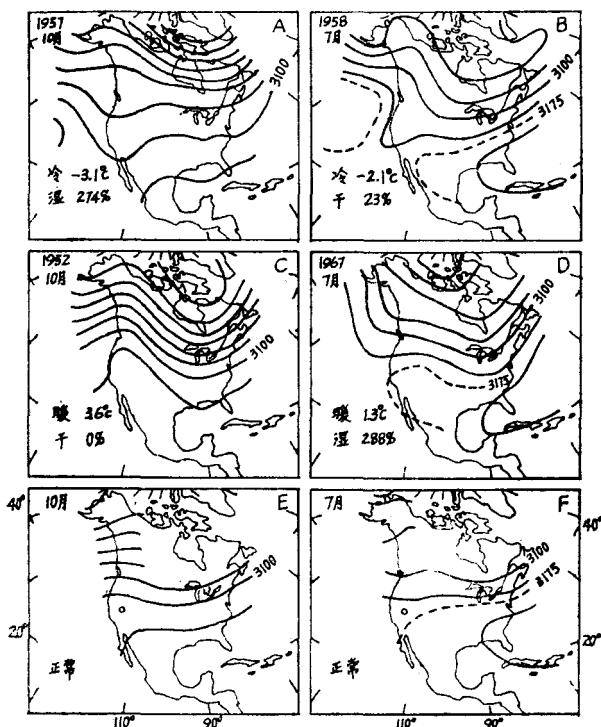


图6 北美上空环流型与怀特山的降水——温度组合异常相配合的例子。图中展示了某些月份的700毫巴平均高度（等高线间隔为50米）与1946—1955年的多年平均高度的比较。每月的温度由对于1952—1972年平均的偏差来表示；降水以距平（同上时期）百分率来表示。图上小圆圈表示怀特山的位置。