

树木年轮分析在环境变化研究中的应用

吴 祥 定

(中国科学院地理研究所)

内容提要 鉴于环境变化与树木生长关系密切,可以通过对树木年轮变异状况的分析,获取环境变化的信息。本文概述了树木年轮分析的基本原理、研究途径以及已经取得的进展与应用前景。

主题词 树木年轮学 环境变化

树木年轮学 Dendrochronology 是一门以植物生理学为基础,以树木年轮生长特性为依据,用来研究环境对年轮生长影响的学科,旨在获取代用资料,重建环境因子的变化史实。

鉴于树木年轮资料具有定年精确、连续性强和分辨力高等特点,长期来受到高度重视。尤其自本世纪 70 年代以来,随着气候变化和环境变迁研究的迫切需要,计算技术和分析手段的不断加强,在地学范围内进行树木年轮变异研究更是日益广泛。它不仅是制作年轮年表,用来作为断定年代的方法,更多的是依据树木年轮状况可以作为环境变动的“记录器”,着重探讨过去数千至数百年内各种环境因子的变化,包括气候要素、水文要素、污染、地震、火山、……,因而也就派生出许多交叉的分支学科,其中最为活跃的是年轮气候学,其它还有年轮水文学、年轮污染学和年轮地质学等等。

本文将就树木年轮学的基本原理和研究途径进行概略的论述,并介绍国内外已经取得的部分研究成果与应用前景。

一、基本 原 理

树木生长的主要特征之一是树木年轮的形成与变异。它除了受树木本身的遗传因子控制外,亦受环境因子的制约。美国树木年轮学家 Fritts 就曾详细地论及温带地区和高寒地带若干针叶树生长受气候要素变化影响的生理过程^[1]。这里仅列出温带半干旱地区的针叶树在干旱、高温年份树木生长必然出现窄年轮的生理机制示意图(图 1)。图的左边部分说明缺水对于树木顶端生长和叶片生长的影响,导致形成层活动的减弱,中间部分说明对光合作用、营养物质的影响,使细胞分化减缓,右边部分说明高温直接对树木的不利影响。综合这些影响,必然导致形成窄年轮。

尽管环境变化对树木生长生理过程的实际影响可能比该图示意的过程要复杂得多,

作者简介:吴祥定 男 48 岁 副研究员 气候学专业

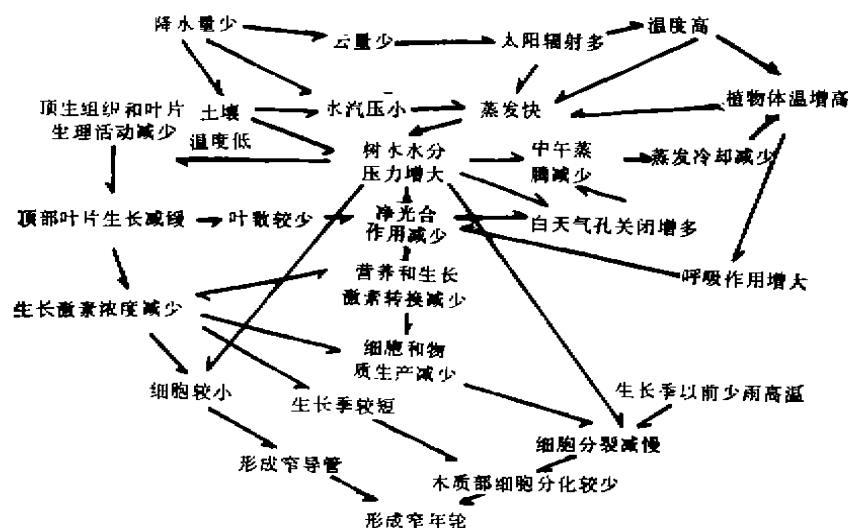


图1 温带半干旱地区的针叶树在生长季内少雨和高温气候条件下形成窄年轮的生理机制

甚至某些机制还不很清楚,但可以借助合适的取样和分析,揭示树木年轮变异与环境变化之间的因果关系却是肯定无疑的。

为确保树木年轮资料的可靠性,从中能获取较多的环境变化信息,树木年轮学研究除了要遵循生物学和地球科学的基本原理外,它本身还有若干基本原理^[2-4]。它们是:

1. 均一性原理

认为现代树木生长与环境因子的关系,以及有关的物理、生物学过程,同样适用于过去。例如,年轮状况与气候型的某种确定性联系,被看成限制树木生长的气候条件,它本身虽会有频率、强度的变化,但限制的方式却是一致的。也就是说,能够用现代的这种关系,依据往昔的年轮状况去推断以往的气候。

2. 限制因子原理

树木生长的生物过程速度,往往受一个或一组外部因子的限制。例如,在干旱地区的树木,年轮生长主要受降水量多少限制;在高寒山区森林上限的树木,温度状况是其限制因子。此外,较窄的年轮所提供的环境变化信息,往往比宽轮所提供的要多些、可靠些。

3. 生态环境选择原理

根据不同目的,应采集不同生态环境中的树样。如果欲分析温度变化,宜在森林上限或高纬度树种北界取样。若要研究干旱地区降水变化,显然在森林边缘取样较森林内部为好。类似地,若是研究地震、滑坡、泥石流之类的灾害,必须在相应的多灾区选择样本。

4. 敏感性原理

树木年轮样本对外界环境因子变化的响应是否敏感,通常可用相邻年轮宽度差来表示。这种平均差值较大,说明敏感性较大,样本中的信息量也较大。实际计算中,多用平均敏感度和标准差等统计变量来表达。

5. 交叉定年原理

为确保每一个年轮所表征年代的可靠性,检查出样本中所包含的奇异状况,如伪年轮、遗失年轮等等,必须对同一地点样本,乃至与更大范围内的年表进行比较、对照,达到交叉定年的目的^[9]。

6. 复本原理

为消除个别样本的偶然误差,树木年轮分析要求同一地点、同一树种应有较多的年轮样本。样本量的多少,取决于样本敏感度的大小和对总方差的贡献。在年轮气候学研究中,一般多取 10 株树以上,每株树 2 个钻芯。

只要严格按照上述基本原理行事,就一定能够得到较为理想的样本,推断出环境因子逐年变化的史实。

二、研究途径

利用树木年轮资料做环境变化研究时,一般都应按以下几个步骤进行:

1. 野外取样

样本质量的高低,直接关系到最终成果的可靠性。因此,在采集样本时必须谨慎行事。首先,应明确研究目的,再选择特定环境的树样。由于目的不同,对取样环境的要求也不一样。拿研究气候变化和大气污染来说,前者可在同一气候类型内一个或多个地点取样,后者则要求在不同方位、多个地点取样,用以对不同程度污染进行比较。即使是研究气候变化,对气温和降水而言,取样环境亦根本不同。在青藏高原和横断山区的年轮气候学研究中,曾就这类取样做过系统的论述^[6,7]。

其次,树种的选择亦很重要,既要求该树种对环境因子变化较为敏感又希望年轮纹印清晰、树龄较长。据不完全统计,全世界已有 200 多个树种,包括北美的西黄松 (*Pinus ponderosa*)、刺果松 (*Pinus longaeva*)、西欧的栎树 (*Quercus* sp.) 等等都是适合年轮分析的树木。在我国,现有二十多个树种用作气候变化研究^[9],其中包括生长在高海拔的柏 (*Sabina*) 属的一些树种、新疆天山云杉 (*Picea tianshanica*)、川西云杉 (*Picea balfourian*) 等。

此外,对树木四周的环境(包括海拔、地形和植被等),对取样的方式、部位、数量等,都要有详细的记录和统一的编码。以便在实验室分析时对许多问题能做出准确的判断。

2. 最终年表的建立

建立树木年轮年表的整个过程,大体可用一个框图表示出来(图 2)。

从样本选择到最终年表的建立有好几个步骤,其中十分关键的是确定年代。尽管树木生长是每年一轮,但由于环境的异常变化或其它干扰,可能会出现非正常年轮。这不仅造成年代上的差错,而且会产生对异常环境变化事件判断失误。因此,交叉定年始终是树木年轮学的重要研究内容之一。目前国内外进行交叉定年的途径较多,且各有优缺点。在总结这类工作的基础上,不久前我们明确提出“三步定年法”^[10],并以西藏中部四个地点的样本为实例进行了分析。该法是将交叉定年分三步进行:选样目测定年、示意图式定年

1) 吴祥定,1990,树木年轮与气候变化。

和精确计算定年。这样就将传统的定年方法与客观的使用计算机程序方法结合起来, 从而保证定年的精确性。

另一个重要步骤是“标准化”过程。为消除由遗传因素决定的、随树龄增加而产生的树木自身生长趋势, 并将不同宽度序列整理成可比较的形式, 必须对各个序列做生长量订正。通常, 采用带尾的指数或其它函数进行拟合处理。近年来, 更为复杂的生长函数被采用, 甚至包括随机性极强的样条函数^[9]。

至于年轮宽度量测, 除了要求精度高、速度快以外, 还要求数据储存符合国际树木年轮数据库 (ITRDB) 所规定的格式^[10], 以便进一步供程序计算之用。

最后, 通过必要的检验, 就可以建立起一个地点的树木年轮年表。

除了用活树建立年表以外, 还可以采集同地区、同树种的古木, 与现代年轮年表衔接起来, 变成有更长年代的年表。古木的来源可以是古建筑物中的梁柱、旗杆, 古墓中的棺木, 也可以是埋藏的古森林, 水体中的古代飘浮木或船体, 甚至古木雕、家具等也能用来延伸年表。在欧洲一些国家, 多有长达五六千年的年表, 其中联邦德国北部的一个已达 7 272 年之久^[11]。更有甚者, 美国西部怀特山的刺果松年表, 已超过 8 200 年, 为世界上最长的绝对年表^[12]。

3. 环境要素变化的重建

利用年轮年表重建环境要素过去的变化, 实际上是寻求现代环境要素与年轮变化之间一种合理的“生物-统计学”模式, 即某种函数表达式, 再经过必要的校准与验证, 就可以用年轮资料去推断环境要素在缺少现代观测资料年代时的变化。这个重建过程大体可归纳为二类函数的分析: 响应函数与转换函数。

响应函数是用来确切估价树木生长对外界环境要素变化的响应程度。目前在年轮气候学研究中被广泛应用的响应函数形式, 是根据年轮宽度变化与邻近气象台站的气温和降水记录之间的关系, 计算出生长季和生长前期逐月的响应值, 判断年轮年表所包含的气候信息量和可被重建的气候因子^[13]。虽然这类响应函数计算方法不尽相同, 但其原理大体相同。这里列出一个位于西藏林周县森林上限附近的年表林周-1 的响应函数 (图 3)。图中横坐标是上一年 10 月至当年 9 月的气温、降水及落后 1—3 年的前期生长; 纵坐标为响应程度的标准化指数值。显然, 对气温的响应基本为正值, 显著因子达 8 个月之多, 而对降水的响应远不如气温。从树木生长的生理机制、气候所占方差量 (60%) 等来看, 这是一个较典型、对气温响应敏感的年轮年表^[14]。

转换函数则是进一步确定树木年轮生长与外界环境要素变化之间可转换的定量关系式。象林周-1 所引用的转换函数, 是一个适当考虑树木前期生长滞后效应、经过变量

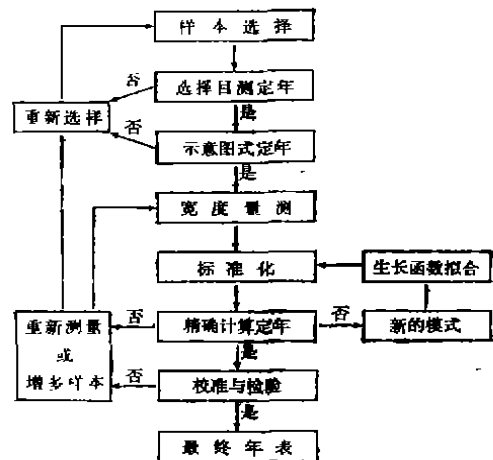


图 2 建立树木年轮年表的基本步骤框图

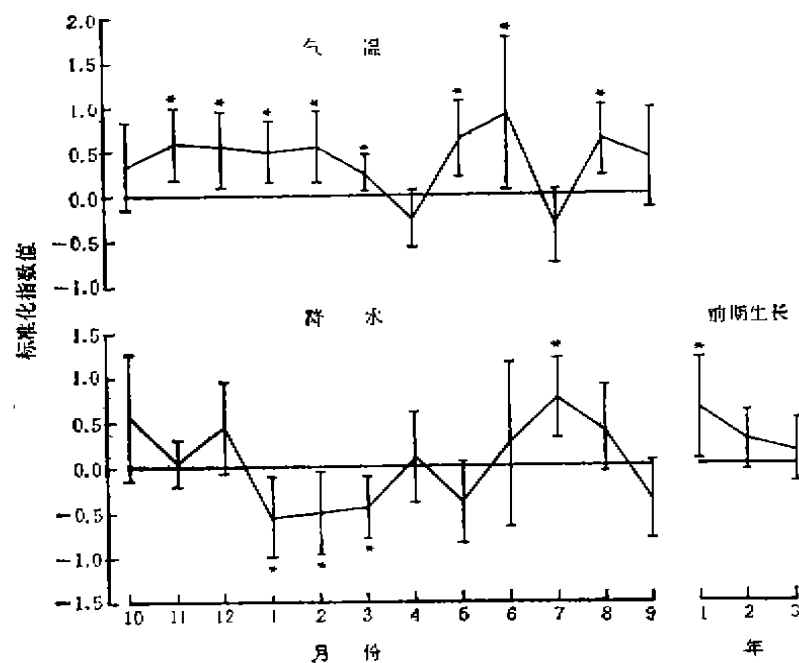


图3 林周-1 的响应函数

* 为在 0.95 置信范围内呈显著响应的因子

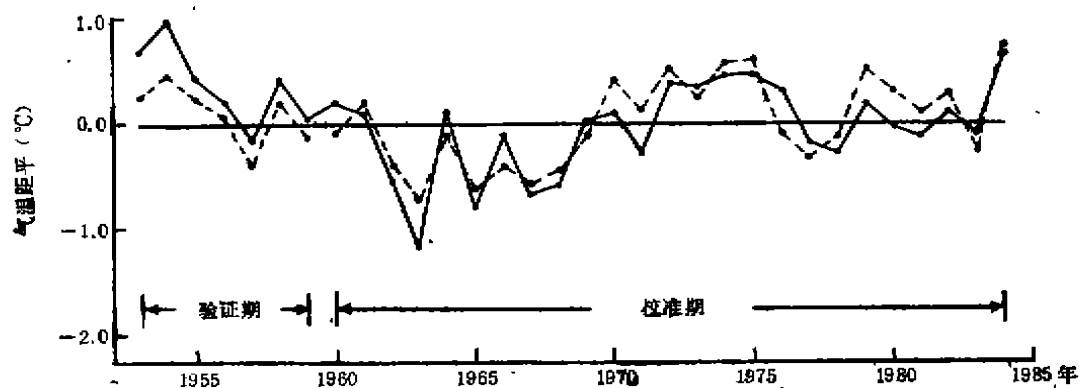


图4 林周-1 重建气温距平与实况值对比

实线为实况值 虚线为重建值

正交化处理的回归方程^[14]。由该转换函数所重建的年平均距平值与实况值十分接近(图4),平均误差仅 0.22℃。这样,就可以由林周-1 推断出 600 年来该地年平均气温的逐年变化。

除重建单因子变化外,利用多个地点的年轮年表还可重建要素场的变化,例如气温场^[15]、降水场^[16]和环流型^[17]等等。

三、进展与前景

树木年轮学研究,无论是在分析技术上,还是在更多领域的应用方面,目前都发展十分迅速,展现出广阔的应用前景。在此,仅择其若干问题予以扼要介绍。

1. 古气候重建

自本世纪 30 年代以来,利用树木年轮资料重建过去气候变化史实,无论在理论上还是在应用上,都已经取得相当可观的研究成果。尤其最近十多年来,年轮气候学研究在除了南极以外的各个大陆都已广泛开展,技术水平大为提高,成为世界上研究历史时期,特别是数百年来气候变化最为广泛的途径之一。1980 年在英国召开的学术讨论会,曾全面总结了年轮气候分析各个方面取得的进展,特别强调了如何保证这类代用资料可靠的有效途径与巨大潜力^[18]。定于 1990 年即将出版一部由许多科学家撰写的专著《公元 1500 年以来的气候》,其中第二部分,计 11 章,均为年轮气候证据,将系统论述利用年轮资料重建包括中国在内的世界各地古气候的研究成果。

2. 年轮密度分析

与年轮宽度相比,年轮密度通常包括最大密度、最小密度和平均密度等多项指标,提供更为深入分析的可能性。甚至对一些宽度变化不大的样本,也可以尝试做密度分析。

测定年轮密度的方法很多,但在树木年轮学研究中广泛采用的是 X-射线法。目前,瑞士联邦森林研究所设计的年轮密度量测系统,以及众多的研究成果,在国际上颇有影响。该所年轮实验室 Schweingruber 等人对年轮密度与环境变化关系做过较系统的分析,不仅利用密度分析重建了阿尔卑斯许多地点的气候变化,而且还用来判别无气象记录地区是否属于同一气候区,并与冰川活动和孢粉分析结果进行了比较^[19]。在其它地区重建过去气候变化的工作,正逐渐引进年轮密度分析。此外,在北美、欧洲许多地方开展的大气污染研究和森林生态调查,也开始采用年轮密度分析,并取得成效^[20]。

3. 同位素和其它元素含量分析

树木年轮的木质部分主要由碳、氢、氧等元素组成,且含有可测定的稳定同位素。测定稳定同位素比值,通常可表征温度、降水等要素的变化。在北美、西欧和新西兰等地,该项研究已进行多年^[21,22],确定出一些可供比较的“温度系数”与“湿度系数”,以解决气候重建中如何将同位素比值转换成温度和降水的问题。

测定年轮中若干重金属元素含量的变化,可以了解树木生长环境中这些元素的迁移、变化规律,从而对环境质量做出动态评价。

目前,许多国家都正在从事这些方面的研究,其中不少工作集中于揭示树木生长过程中,各种同位素和金属元素在年轮中积累、演变的基本规律。也就是说,要从理论上解决它们与环境要素变化的内在联系形式。一旦理论上有所突破,年轮同位素和其它元素含量分析就会有飞跃的进展。

4. 暖湿地区的年轮分析

按照经典理论,重建过去气候的树样,应取自典型的寒冷或干旱环境。近年来,在一些较为暖湿的非典型环境中的年轮分析表明,尽管年轮宽度变异所反映的“信噪比”偏低,

但还是可以设法获取一定的信息量^[23,24]。通常需要改进取样和生长量订正方法,引进灵敏度高的响应函数和转换函数,甚至采用年轮密度和同位素含量分析技术。有关研究已在美国东南部、澳大利亚、墨西哥和印度进行。在我国的黄河流域,亦正开展较温暖湿润地区的年轮气候学研究工作¹⁾。

5. 不同类型资料的合并使用

为提高重建的可靠性,设法采用不同类型代用资料做比较分析,近来格外受到重视。已有相当数量的工作,努力寻求用其它资料对年轮资料进行验证或补充,包括历史文献记录、孢粉、沉积物同位素含量等。值得提及的是,采用北美西部年轮年表和我国东部旱涝史料记载这二类不同代用资料,共同重建了自 1600 年以来北太平洋夏季海平面气压场,重建效果比单独使用其中一种代用资料要好^[25]。这一尝试证实了使用不同类型代用资料共同分析的可能性与潜力。

6. 地质事件的年轮分析

年轮分析除了用来重建许多要素,例如气温、降水、流量、水位等的连续性变化以外,往往还能研究一些偶发性事件在历史上出现过的状况,包括若干地质事件发生的频次和影响范围。在阿尔卑斯山和近北极圈地区的树木年轮分析表明,利用年轮资料可以推断冰川的前进和后退活动^[26]。树木的霜轮和某些窄轮,可用来估价火山喷发的频率及可能影响^[27,28]。此外对北美最大的冰川堰塞湖形成过程的研究^[29],加拿大魁北克出现滑坡的定年^[30],美国加利福尼亚历史上的地震事件^[31],美国亚利桑那一个流域盆地全新世晚期沉积物的产生和转移^[32],……都多少采用了树木年轮学方法,取得较好的结果。因此,年轮地质学近年来也逐渐活跃起来。

总之,树木年轮学研究已经取得了很大进展,被证实是获取可靠代用资料,推断许多环境因子变化史的有效途径之一。目前,世界上许多国家都在积极开展这类工作,一些国际组织在制订全球性气候和环境变化研究计划时,都充分肯定了年轮分析的作用,努力促进更广泛的协作^[33,34]。

我国地域辽阔,森林分布广,树龄长的老树与古木资源丰富,同时多年来的研究工作也奠定了基础,积累了经验。这些都充分说明,在我国开展树木年轮分析的巨大潜力^[35]。不难预料,我国的树木年轮分析必将更加广泛和深入,并在环境变化研究中发挥更大的作用。

参 考 文 献

- [1] Fritts, H. C., 1974, Relationships of Ring Width in Arid-Site Conifers to Variations in Monthly Temperature and Precipitation. *Ecological Monographs*, 44(4), 411—440.
- [2] Ferguson, C. W., 1970, Concepts and Techniques of Dendrochronology. *Scientific Methods in Medieval Archaeology*, University of California Press, 183—200.
- [3] Fritts, H. C., 1976, *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 1—54.
- [4] Schweingruber, F. H., 1983, *Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Verlag Paul Haupt, Bern, 1—40.
- [5] Stokes, M. A. and Smiley, T. L., 1968, *An Introduction to Tree Ring Dating*. University of Chicago Press,

1) 吴祥定、湛绪志, 1989, 黄河流域两类取样环境的树木年轮分析。

- Chicago, 1—127.
- [6] Wu Xiangding and Lin Zhenyao. 1987. Sampling in Tibet. in: Kairiukstis, L. *et al.* (eds.), *Methods of Dendrochronology*, WOS1, Warsaw, 23—33.
 - [7] Wu Xiangding, Lin Zhenyao and Sun Li, 1988, A Preliminary Study on the Climatic Change of the Heogduan Mountains Area since 1600 A. D. *Adv. Atmos. Sci.*, 5(4), 437—443.
 - [8] 吴祥定、孙力、程志刚, 1988, 若干西藏高原上树木年轮年表的建立. 科学通报, 第 8 期, 616—619 页.
 - [9] Cook, E. R. and Peters, K., 1981, The Smoothing Spline: A New Approach to Standardizing Forest Interior Tree Ring Width Series for Dendroclimatic Studies. *Tree-Ring Bull.*, 42, 45—53.
 - [10] Fritts, H. C., 1985, ITRDB to Open on Trial Basis. *International Tree-Ring Data Bank Newsletter*, 4(1), 1—24.
 - [11] Pilcher, J. R., Baillie, M. L. G., Schmidt, B. and Becker, B., 1984, A 7272-Year Tree-Ring Chronology for Western Europe. *Nature*, 312(5990), 150—152.
 - [12] Ferguson, C. W. and Graybill, D. A., 1983, Dendrochronology of Bristlecone Pine: A Progress Report. *Radiocarbon*, 25, 287—288.
 - [13] Fritts, H. C. and Wu Xiaogding, 1986, A Comparison between Response Function Analysis and Other Regression Techniques. *Tree-Ring Bull.*, 46, 31—46.
 - [14] 吴祥定、孙力、湛绪志, 1989, 利用树木年轮资料重建西藏中部过去气候的初步尝试. 地理学报, 第 44 卷, 第 3 期, 334—342 页.
 - [15] Fritts, H. C. and Lough, J. M., 1985, An Estimate of Average Annual Temperature Variation for North America, 1602 to 1961. *Climatic Change*, 7, 203—224.
 - [16] Fritts, H. C., Lofgren, G. F. and Gordon, G. A., 1979, Variations in Climate since 1602 as Reconstructed from Tree Rings. *Quaternary Research*, 12(1), 18—46.
 - [17] Fritts, H. C., Lofgren, G. F. and Gordon, G. A., 1980, Past Climate Reconstructed from Tree Rings. *Journal of Interdisciplinary History*, 10(4), 773—793.
 - [18] Hughes, M. K., Kelly, P. M., Pilcher, J. R. and LaMarche, V. C., 1982, *Climate from Tree Rings*. Cambridge University Press, Cambridge, 1—197.
 - [19] Schweingruber, F. H., 1985, Dendrochronological Zones in the Coniferous Forests of Europe. *Dendrochronologie*, 3, 67—75.
 - [20] Fritts, H. C. and Swetnam, T. W., 1986, Dendroecology. Lab. of Tree Ring Research, Univ. of Ariz., Tucson, 1—48.
 - [21] Long, A., 1982, Stable Isotopes in Tree Rings. in: Hughes, M. K. *et al.* (eds.), *Climate from Tree Rings*. Cambridge University Press, 13—18.
 - [22] Freyer, H. D., 1986, Interpretation of the Northern Hemispheric Records of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Trends of Atmospheric CO_2 in Tree Rings. *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis*, Springer-Verlag, New York, 123—131.
 - [23] Villalba, R., Boninsegua, J. A. and Holmes, R. L., 1985, Two New Tropical Species Useful in Dendrochronology. *Tree-Ring Bull.*, 45, 25—35.
 - [24] Cook, E. R., 1987, The Decomposition of Tree-Ring Series for Environment Studies, *ibid.*, 47, 37—60.
 - [25] Wu Xiangding and Lough, J. M., 1987, Estimating North Pacific Summer Sea-Level Pressure Back to 1600 Using Proxy Climate Records from China and North America. *Adv. Atmos. Sci.*, 4(1), 74—84.
 - [26] Schweingruber, F. H., 1988, *Tree Rings*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 95—142.
 - [27] LaMarche Jr, V. C. and Hirschboeck, K. K., 1984, Frost Rings in Trees as Records of Major Volcanic Eruptions. *Nature*, 307(5946), 121—126.
 - [28] Lough, J. M. and Fritts, H. C., 1987, An Assessment of the Possible Effects of Volcanic Eruption on North American Climate Using Tree-Ring Data, 1602—1900. *Climatic Change*, 10, 219—239.
 - [29] Stockton, C. W. and Fritts, H. C., 1973, Long-term Reconstruction of Water Level Changes for Lake Athabasca by Analysis of Tree-Rings. *Water Resources Bull.*, 9, 1006—1027.
 - [30] Begin, C. and Fillion, L., 1987, Dating Landslides in Hudson Bay Area, Quebec. *Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree Ring Analysis*, New York, 290—291.
 - [31] Sheppard, P. R. and Jacoby, G. C., 1987, Dating Earthquakes along the San Andreas Fault System in California. *ibid.*, New York, 281—289.
 - [32] Alexander, V. and McCord, S., 1987, Late Holocene Sediment Yield and Transport in a Northern Arizona Drainage Basin Reconstructed by Tree Ring Analysis. *ibid.*, New York, 213—223.
 - [33] IPID, 1986, International Working Group on Global Dendroclimatology. Univ. of Ariz., Tucson, 1—28.
 - [34] ICSU, 1986, The International Geosphere-Biosphere Programme: A Study of Global Change. IGBP Re-

port No. 1, Berne, Switzerland, 15—31.

- [35] Wu Xiangding, Cheng Zhigang and Sun Li, 1987. Status of Dendrochronological Work in China. *Dendrochronologia*, 5, 127—134.

APPLICATION OF TREE RING ANALYSIS TO THE STUDY ON ENVIRONMENT VARIATION

Wu Xiangding

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Greater advances in dendrochronological study have been made since 1970's because of increased emphasis on research into environment variation and the obvious improvement of the computational techniques.

According to a certain relationship between tree ring growth and environmental factor, the proxy data for reconstructing past environmental variation can be obtained by the tree ring series.

As a branch of science, dendrochronology contains some basic principles and concepts, such as the uniformitarian principle, the principle of limiting factors, the concept of ecological site selection, the concept of sensitivity, the concept of crossdating and the concept of repetition.

The essential strategy to study on environmental variation using tree ring analysis could be divided into three parts: sampling in field, establishing final tree ring chronology and reconstructing the history of environmental factor. Of course, there are some techniques in each part. As an effective approach to crossdating, the "three-step dating" method has been emphasized. The three steps are: visual dating on the cores, skeleton plotting and computer dating check. Meanwhile, the response function and transfer function have been demonstrated with an example. The functions would provide an estimate of past change of local climate factors.

Recently, a few branches of dendrochronology have been appeared with broad application prospects. Some issues in dendrochronology were mentioned in this paper. They are: reconstruction of past climate, densitometry analysis, stable isotopes or heavy metal elements in tree rings, tree ring analysis in warm-humidity areas, combining different proxy data and dendrogeological analysis.

In brief, the dendrochronological work has been undergoing a widespread and profound development in the whole world. At the same time, dendrochronological analysis in China is likely to have a broad potential and will play a more important role in the study on environmental variation.