

使用 WinDENDRO 测量树轮宽度及交叉定年方法*

何 海^{1 2}

(1. 重庆师范大学 生命科学学院, 重庆 400047 ; 2. 中国科学院 成都生物研究所生态中心, 成都 610041)

摘 要 根据使用 WinDENDRO 测量 800 余个钻芯样品年轮宽度和交叉定年的经验, 介绍了从样品处理、图像扫描、测量路径创建、年轮的判别和年轮边界控制, 到年轮宽度数据文件的存取和转换等关键步骤的操作技巧; 概述了使用 WinDENDRO 时如何结合 COFECHA 控制质量, 检查和修改可能出现的测量和定年错误; 并有针对性地指出操作过程中可能出现的问题及解决办法, 以提高仪器的使用效率。

关键词 树木年轮宽度; 图像分析; 交叉定年; WinDENDRO; COFECHA

中图分类号: TP319 .Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-6693(2005)04-0039-06

Measurement of Tree-Ring Width with WinDENDRO and Crossdating Methods

HE Hai^{1 2}

(1. College of Life Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract Dendrochronology is the science that uses dated tree-ring data for dating environmental events. Measurements of annual tree-ring width and crossdating are fundamental items for dendrochronology, in that the precision of measurements and accuracy of dating will directly affect the reliability of subsequent analyses. WinDENDRO is a semi-automatic image analysis system specially designed for annual tree-ring measurements. Its flexibility for according to the user's control and high precision in measurement made it increase in use over a number of years. Based on my experiences when measuring and crossdating were more than 800 cores of subalpine conifers collected from northwestern Sichuan province, I presented operation skills with WinDENDRO step by step, including preparing samples, scanning images, creating paths, validating rings and modifying ring boundaries, and saving correct ring width data and converting them to other format. I also summarized, when using COFECHA for quality control of the measured tree-ring width data, to see how the user interpreted the COFECHA diagnostics to check and correct potential measurement and dating errors directly under WinDENDRO interface. Moreover, to improve the equipment efficiency, special attentions were paid to the possible operative problems and their avoidances or solutions.

Key words tree-ring width; image analysis; crossdating; WinDENDRO; COFECHA

树木年轮学(Dendrochronology)是研究树木年轮特征及其形成的环境要素之间相互关系的理论和应用科学^[1]。它确定木质部年生长层形成的准确年代,建立年表,并利用年表资料探讨与年轮形成相关的历史和环境事件的时期及过程^[2,3]。该学科经历了 400 余年的孕育期,于 20 世纪初期由美国天文学家 Andrew E. Douglass 创立,经过近 100 年的发展,已经成为一门公认的科学^[4]。从 20 世纪 60 年代开

始,该学科发展迅速,发表论文逐年增加,涉及考古学、植物学、气候学、生态学、林学和地貌学等诸多方面,特别是 1990 年以后,每年发表的相关文献多超过 300 篇^[5]。到目前为止,已经形成了许多与树木年轮学相关的交叉和应用学科或分支研究领域^[2,6,7],如年轮考古学(Dendroarcheology)、年轮气候学(Dendroclimatology)、年轮生态学(Dendroecology)、年轮地貌学(Dendrogeomorphology)、年轮地震

* 收稿日期 2005-03-03 修回日期 2005-08-29

资助项目:国家重点基础研究发展规划项目(G2000046802-05);中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-07-02);“十五”国家科学技术攻关项目(2001BA606A-05-01)

作者简介:何海(1967-)男,重庆合川人,副教授,博士研究生,研究方向为植物分类学和植物生态学。

学(Dendroseismology)等。其中特别是年轮气候学和年轮生态学两个领域的研究最为突出,前者重点在建立不同区域长时期的树轮年表,并用以重建过去数百年乃至数千年的气候特征^[3,8],近年来也利用年轮资料探讨如大气CO₂浓度增加等全球气候变化问题^[9];后者则重点揭示森林的自然或人为干扰历史及其对森林群落的结构和动态的影响^[2,10]。为促进树木年轮学研究方法和技术的规范化和标准化,国际树木年轮学者已于1974年开始建立国际树木年轮数据库(ITRDB;International Tree-Ring Data Bank),库中永久性保存各国科学家提供的树木年轮资料(如年轮宽度、年表、重建序列等),同时提供相关研究工作者交流的平台(论坛)和年轮分析计算机程序库^[11]。世界树木年轮学研究者们的不懈努力,已经使得年轮资料逐步成为研究全球变化的独特工具和途径,它将不断为人类了解当前的环境和社会问题做出重大贡献^[12]。

年轮宽度是树木年轮学的主要研究对象^[8],也是交叉定年及测定年轮其他特征指标的基础。年轮宽度测量的精度和准确性,将影响交叉定年的质量^[13]。交叉定年是树木年轮学最基本的理论和方法,只有通过交叉定年确定了其准确形成年代的年轮资料,才能用于建立年表和保证后续分析的可靠性。同时,年轮宽度测量和交叉定年又是树木年轮学分析过程中最为烦琐和复杂的工作,熟练掌握适当的测量仪器将大大缩短测量时间,提高工作效率。

尽管WinDENDRO分析系统价格相对昂贵,国内已有单位开始使用^[14],但许多同行(特别是初学者)对于它的操作技巧还十分陌生。为此,作者根据使用WinDENDRO™(Density 2002b)测量采自四川西部亚高山针叶林的800余个钻芯样品年轮宽度过程中积累的经验,对其测定年轮宽度、交叉定年和用COFECHA控制质量的过程和技巧作有针对性的介绍,以便国内同行参考。

1 WinDENDRO的组成及特点

WinDENDRO包括硬件和软件系统,硬件主要是用于获取年轮图像,软件则用于分析图像和获取数据。WinDENDRO一般使高分辨率扫描仪采集图像,并与多种扫描仪的通讯协议兼容,扫描仪质量的高低直接关系到年轮宽度测量的精度和准确性,使用者可以根据需要更换扫描仪。软件系统包括一个应用程序“WinDENDRO.exe”和一个扫描仪校对文

件“Scanner.cal”,此外,还配送有一个数据转换程序“Convert.exe”和一组示例图像文件。扫描仪校对程序用于校对图像和实物的尺寸比例,数据转换程序则用于将WinDENDRO测定的年轮宽度等数据转换为可以被其他树木年轮学分析软件识别的“Decadal”格式。“WinDENDRO.exe”本身是一个不断升级和更新的程序,目前最新版本是2004c,后出版本不断克服旧版本的缺陷,使得年轮分析更为方便快捷。WinDENDRO在目前使用的Windows操作系统上均可以运行,但计算机内存越大,分析速度可能越快,因为WinDENDRO只能保存“tiff”格式的图像文件,在分析时需要占用大量的内存。

安装WinDENDRO十分方便,将“WinDENDRO.exe”和“Scanner.cal”拷贝到硬盘同一个文件夹中即可,其他相关的文件(或文件夹)可以拷贝在该文件夹中,以便查找。“WinDENDRO.exe”是受密码保护的,必须有解密卡(接打印机端口的“beige”卡或USB卡)才能打开图像和分析。如果计算机系统不能识别解密卡,则需要安装相应的驱动程序。WinDENDRO具有一栏主菜单、一个主窗口“WinDENDRO”和显示年轮宽度的“Rings Width”图表窗口。主菜单中包含有所有与年轮分析有关的命令和选项,其中“Data”、“Image”、“Path”、“Ring”和“Cross-dating”等在年轮宽度测量时要经常使用;主窗口是WinDENDRO图像分析的主要界面,包括信息区、命令区、图像区,以及可以根据需要隐藏的图像分析水平(和垂直)图解区等;“Rings Width”用于检查测定误差及交叉定年,可用“Windows”菜单与主窗口相互切换。鼠标停留在任何一项命令或选项时,WinDENDRO会显示与该操作有关的信息或功能。WinDENDRO能自动保存使用者对其默认设置所作的更改,并生成“WinDENDRO.cfg”文件,删除该文件可以恢复默认设置。除特别说明外,本文按其默认设置介绍。

WinDENDRO测量树轮宽度(及其他相关指标)均是基于样品的计算机图像分析完成,使用COFECHA或其他交叉定年辅助程序检验后,也需要回到图像分析上才能对可能的测量或定年错误作更改。用WinDENDRO测量树轮宽度及交叉定年大致需要6个主要的步骤(见图1),有的步骤需要重复数次才能得到满意的结果。后文根据软件的特点说明测量过程中的方法和技巧。

2 使用 WinDENDRO 测定年轮宽度的过程和技巧

2.1 样品的准备和扫描

WinDENDRO 可以分析树木圆盘和用生长锥钻取钻芯,其中取钻芯研究是目前对生活树木研究的唯一方法。野外采集的钻芯样品风干以后,要先固定在有槽沟的木条上,然后用从粗(如 180 或 220 号)到细(500 或 600 号)砂纸打磨抛光,直到年轮清晰。根据钻芯的直径制作固定木条,木条中央槽沟的宽度与钻芯直径相当,深度则不超过钻芯直径的一半,槽沟两边的边缘可以尽量窄,这样既可以保证多个钻芯并排扫描,又可以使扫描生成的图像少占内存空间。固定时可以在钻芯两端留 2 cm 左右的空木条,这样可以保证分析时选择路径终点(或起点)不会太靠近图像边缘,必要时也可以在其一端贴样品标识。

准备好的钻芯 8 个左右并排平放在扫描仪水平方向的中央,左边可以与扫描仪的实际扫描边缘对齐,并测量样品所占的大致长度和宽度值。扫描仪处于工作状态时,打开“WinDENDRO.exe”会首先出现“Select source”窗口,选择了扫描仪(“Scanner”)WinDENDRO 才能获取扫描图像,并在命令区域有扫描仪图标。扫描之前,使用菜单命令“Image/Acquisition parameters”选择获取图像参数,特别注意“Horizontal offset”的值,因为 2004 年以前的 WinDENDRO 版本的配置文件不会改变其默认值(9.6 cm),该值是扫描仪横向边缘与样品横向边缘间的垂直距离,改变该值后直到关闭 WinDENDRO 之前有效。其他参数可以根据需要设定,但一般建议选择扫描灰度图像,因其形成的文件大小仅彩色图像的 1/4。在命令区域点击扫描仪图标即可扫描,这时需要输入扫描样品的长度和宽度值。扫描完成图像显示在图像区域,点击左下角的“z”(或“Z”)按钮,根据需要缩小(或放大),以检查图像扫描是否完整。扫描完整的图像即可分析,或用“Image/Save image”保存待以后分析。

2.2 测量路径的创建和年轮判别

WinDENDRO 分析测量需要人工在图像上创建路径(Path)。图像从扫描仪获取或从硬盘上读取,从硬盘上读取图像用“Image/Origin”选择磁盘,点击随后在命令区域出现的磁盘图标打开图像文件。如果分析钻芯,最好先用“Path/Creation parameters”命

令选择“Multi-segments paths”,这样创建路径允许多个“Segments”,使操作者能更灵活控制。点击命令区域的“Path creation”按钮,WinDENDRO 即处于路径创建状态。路径创建的起点是从髓心开始,终点到树皮方向,起点和终点均不能太靠近图像的边缘,否则 WinDENDRO 有可能自动关闭。从起点开始,鼠标停留到样品的某一点,即为第 1 个“Segment”,这时弹出“Identification”窗口,需要填写相关的信息,其中“Tree identification”和“Year of last ring”必须填写,前者是数据转换为“Decadal”格式后一个测量序列的唯一标识,应在 8 个字符以内(字母或数字);后者与定年有关,需要根据样品采集年代和季节判断,比如在 2004 年生长季节采集的样品,当年的晚材尚未形成,则不测量最外 1 轮,应输入 2003。在以后分析中,可以用“Path/Edit active path identification”对此次输入的内容做更改。接着,可以继续图像上创建路径的“Segments”,用“PgUp”和“PgDn”键上下移动图像(2004 年的版本可以用鼠标中央滚轮移动),直到双击鼠标终止,经过一段时间自动识别年轮后,程序进入编辑状态。WinDENDRO 只有在编辑状态才能进行年轮的确认和修改,也可以点击命令区域的“Path edition”按钮来完成路径进入编辑状态;如果创建的路径只有一个“segment”,必须点击该按钮才能进入编辑状态。若路径终端多建了“Segment”,可用“Path/Delete last segment”删除,或者创建的路径不理想,则用“Path/Delete active path”删除活动路径后再重建。

路径中自动识别的年轮,需要人工判别确认。同一图像中可以创建数个路径,但只有一个是活动的,活动路径有实线的边界,年轮间的界限(年轮晚材轮廓的外切线)显示为绿色短线,该处路径边框左边显示年轮形成年代,右边显示从髓心向外数的轮数。只有活动的路径才能进行年轮的修改,可以通过“Tab”键顺序激活路径。人工判别和确认年轮之前,往往需要根据样品调整自动识别的敏感度。调节的办法是按住“Ctrl”键,在显示图解区中,用鼠标左右(垂直图解区)或上下(水平图解区)调节“Sensitive selector”线到适合的位置。避免在人工判别以后调节识别敏感度,否则所有的修改都会消失。人工判别是对图像和路径作仔细观察,使每个年轮标志短线代表一个真正的年轮界限,并至少需要注意以下几个方面操作。

(1) 伪轮处理。鼠标指向伪轮边界短线,使其

亮度增强并呈黄色,单击它删除该年轮短线,即使伪轮分开的两半合并为一个年轮;若一个年轮中自动识别出多个伪轮,可重复此操作。或在路径线外面伪轮出现的区域选定图像,用 Backspace 键一次删除(将多个伪轮合并为一个年轮)。

(2)未识别年轮处理。鼠标指向路径内应该存在年轮界限的位置,单击一次即增加一条年轮边界短线,亦可采用选定路径图像区域,采用“Ring/Add rings”命令一次加入多条年轮边界短线。

(3)年轮边界短线位置调整。按住“Shift”键,用鼠标点击边界线中央,拖动到适合的位置。

(4)年轮边界短线方向调整(使年轮边界短线正好是每个年轮轮廓的外切线)。按住“Shift”键,鼠标点击边界短线的一端,调整到适合的方向。

(5)年轮中空隙或断裂隙的消除。在空隙处路径边界外,用鼠标选定该区域,先用“Path/Define gap area”命令,然后用鼠标在路径内空隙两侧边缘(沿与路径垂直方向)划两条短线,WinDENDRO 将会用白线显示一个空隙段,测量时自动减除该空隙段的宽度。

一个图像所有分析完成后保存,则可以同时保存对图像所做的分析;操作者应保持分析完成一个图像后保存的习惯。也可以选择“Image/Ask to save image after analysis”命令,WinDENDRO 在完成分析获取下一个图像会自动弹出保存文件窗口并有一个文件名,此时要特别注意核实与当前分析的文件名是否一致,避免保存当前文件时删除了其他图像文件;文件在保存以后才出现打开文件窗口(如果从硬盘上打开图像文件),亦要注意文件名的混淆。

2.3 数据的保存和转换

年轮宽度及与之相关的测量数据在路径创建完成以后,WinDENDRO 就已经产生。在创建路径的第1个“Segment”时,会弹出数据文件保存窗口,对数据文件可以有3种处置方式:存入一个已有的文件,选择“Open one”;创建一个新数据文件,选择“Create one”;暂不保存数据,选择“Save nothing”。2003年以前的版本,分析时必须打开或创建数据文件,否则,在对路径内年轮识别做任何修改时,程序都会弹出数据文件保存窗口,影响分析的进度。打开已经保存有分析的图像文件时,如果没有数据文件打开,同样出现数据文件保存窗口,此时如果选择“Save nothing”,而在对路径中分析作修改时选择“Create one”,则数据文件只保存修改后的数据;在

这两个操作环节中如果选择“Open one”,则数据文件同时保存原来的分析和修改后的分析。可存入一个数据文件的图像分析完成后,若仍要分析其他图像时,用“Data/Close file”保存数据,这样再打开(或从扫描仪获取)其他图像文件时,重复数据文件保存窗口的选择;关闭 WinDENDRO 则自动保存数据文件。WinDENDRO 默认只保存年轮宽度数据。

WinDENDRO 保存的数据格式是呈行排列的,每组数据前面12列是与样品相关的信息,从第13列开始才是分析测量的数据。在做其他分析或转换前,数据需要用“Convertv.exe”转换为“Decadal”格式。打开“Convertv.exe”,点击“Browse”找到目标文件,点击“Convert”完成数据格式转换。转换后的数据文件,保存在原来数据文件所在的文件夹中的“Tucson/RINGWIDT”次级文件夹内,文件名与转换前的一致。

3 交叉定年的方法和技巧

3.1 使用 WinDENDRO 交叉定年

WinDENDRO 交叉定年可以在图像分析过程中进行,即对相关的年轮宽度曲线进行对比,结合图像的年轮判别以更正测量和定年错误。其方法是切换到“Rings Width”窗口,利用自动生成的年轮宽度曲线进行直观的交叉定年及测量错误检查。所有在图像分析主窗口创建的路径,在“Rings Width”中都已经生成了年轮宽度序列曲线(年代为横坐标,年轮宽度为纵坐标),各曲线的颜色与其代表的图像窗口中路径的颜色一致,其中(仅一条)活动路径的曲线为实线,其他曲线为虚线,用“Tab”亦可以顺序激活宽度曲线。同一样树或同一地区相同树种样本的年轮宽度曲线一般应该表现出相似的特征,如果某一宽度序列曲线与其他曲线差异甚大,则可能存在测量或定年错误。交叉定年时可使用“Cross-Dating”菜单命令创建、保存(“Save reference data”)或读取参考数据(曲线),参考数据可以是以前保存的年轮宽度(用“Load reference data”命令),或者从正在分析的图像中一个(或多个路径平均)的年轮宽度数据创建(“Create reference with current path [s]”),参考数据要求是用仔细分析且定年无误的年轮宽度数据。参考数据曲线呈黑色实线,WinDENDRO 将会根据“Gleichläufigkeit sign test”计算其与活动路径的宽度曲线间的相关系数^[15]。相关系数显示在图表窗口的左上角,可以是0(毫不相关)

到 100(逐年之间年轮宽度生长趋势完全吻合)。如果一个图像的路径太多,点击图表窗口右上角的“ All ”按钮,选择“ Active ”则只显示参考曲线和活动路径年轮宽度曲线,这样可以清晰的检查活动路径的年轮宽度与参考曲线的相似性。使用图表窗口右边的一组按钮可以将活动路径曲线左右移动(年代提前或推后);或者对其中某些定年有问题的年代分开而向左或右移动。每改变一次,WinDENDRO 会重新计算相关系数并显示出来,若所做的改变相关系数有实质性的提高,回到图像分析路径中检查核实和更改。分析同类样品时,也可用“ Cross-dating/Keep previous sample as reference data ”命令,使前一测定路径的数据作为下一路径宽度曲线的参考线,以便数据间的及时相互比较。当发现有定年或测量错误时,用鼠标点击活动曲线的相应年代,图像窗口中自动将包含该年代的图像位置显示在视频区域,这样可以很方便的找到需要仔细核查的路径区段,找到可能的年轮判别错误并更改之。

3.2 使用 COFECHA 检验和质量控制

用 WinDENDRO 交叉定年能很好解决活动路径的测量数据与参考数据的两两比较,而多组数据的比较必须使用 COFECHA。COFECHA 是专门为树木年轮交叉定年及检验测量误差的年轮分析程序^[16],目前在树木年轮学研究领域中广为使用,初用者可参考对其操作过程及结果解释的详细介绍^[17]。COFECHA 程序可以 ITRDB 的程序库中免费获得,如果是压缩文件,需要解压缩,将“ COFECHA.EXE ”复制到需要分析的数据文件同一个文件夹中,否则,在 COFECHA 运行时要严格输入数据文件保存的路径。打开“ COFECHA.EXE ”后,所有的操作都在 DOS 提示符下完成,尤其注意的是输入需要检验的文件名时,一定要输入其扩展名“.txt”,其他操作都可以先按默认直接回车。COFECHA 程序一般可以输出 7、8 个结果,但一般用“ Part 5 ”和“ Part 6 ”两部分就可以检验交叉定年的效果和判断可能的测量误差。“ Part 5 ”中某个片段带有“ A ”或“ B ”标记,则说明该时间段的定年或测量存在问题。其中,“ A ”表示检测片段与主序列(Master dating series)之间的相关系数低于 99% 置信区的值,但保持这个片段当前的时间序列则其与主序列的相关系数最高,“ B ”则表示检测的片段时间序列需要前后移动 1 ~ 10 年的某个位置,其与主序列的相关系数最高,在回到样品检查时要高度重视。“ Part 6 ”则对“ Part 5 ”中有

标记的片段进行逐一提示,找出时间序列前后移动 10 年之间与主序列的相关系数(“ +1 ~ 10 ”年或“ -1 ~ 10 ”年),并标记出相关系数最高的时间位置。同时,“ Part 6 ”还显示对检测片段与主序列间相关系数影响(降低或升高)最大的年代、年与年间变化与平均数变化很不同的年代、测量值比当年平均数高于 3.0 SD 或低于 4.5SD 的异常值(Outliers)年代等,可以帮助准确的定位到可能的定年或测量错误。

根据 COFECHA 对一组数据的检验结果,回到 WinDENDRO 图像分析,对每一个序列(对应图像的一个路径)的提示,结合相应的路径逐一检查。如果“ Part 6 ”中提示一个序列有系统错误,比如所有片段都提示“ + 2 ”或“ - 2 ”,则在图像中使相应的路径处于活动状态,用“ Path/Edit active path identification ”将“ Year of last ring ”中已有的年代向后加 2 年或向前减 2 年。如果一个序列中有很不规则提示的片段,尤其是序列中间的片段有标记(前后年代同主序列都吻合),则需要根据提示仔细检查相应的片段,而且可能十分复杂。在检查复杂的定年错误时,始终记住 COFECHA 提示的是“ + ”年代的片段,则应在当前定的年代基础上向后推,“ - ”年代则向前推。运用到 WinDENDRO 图像路径中,“ + ”年代表示在树皮端该片段最后年代附近可能有伪轮,需要删除伪轮的边界短线,即使伪轮分开部分合并成一个年轮,“ - ”年代表示在树皮端该片段最后年代附近可能有缺失轮或没有识别的年轮,需要插入年轮。在图像路径树皮端所做的更改,则会影响髓心端的年代,同时影响从髓心向外的轮数,如果有问题的片段比较多,可用“ Ring/Add comment ”的办法,对有问题或已做了修改的年轮做标记,以便对照 COFECHA 结果继续检查。检查完成以后,将修改的数据保存,重复数据转换、COFECHA 检验和回到样品检查,直到得到满意的结果为止。如果经过反复检查仍有少量序列有标记片段,则可以在建立年表或后续分析中将它们作为异常序列去除。

4 与年轮宽度相关的数据获取与转换

在年轮宽度测量的同时,与宽度相关的早材宽度、晚材宽度、早材所占百分比、晚材所占百分比、年轮线的角度等数据都同时测量出来。要获取这些数据,最好在交叉定年和质量检查完成以后进行。打开保存了分析的图像文件,创建或打开数据文件之前,用“ Data/Ring base data format ”选择需要的数据

项 就可以保存相关的数据。如果 WinDENDRO 自动识别的早材和晚材分界线与实际界线有差异,则需要手动调整。用“ Display/Display in image area”,选择“ Earlywood boundary”,则在图像路径中每个年轮的早材和晚材之间显示一条比年轮线短的兰色短线,用“ Ctrl + Shift”配合鼠标可以移动该界限到相应的位置,WinDENDRO 重新测量该年轮的早材和晚材的宽度等数据。尽管 WinDENDRO 能在数据文件中输出所有与宽度相关的数据,但用“ Convert.exe”转换为“ Decadal”格式时,只能转换年轮宽度、早材宽度和晚材宽度,因此,需要转换的数据文件只能选择早材宽度和晚材宽度两项,否则转换可能会出问题。转换后的文件位置同年轮宽度的相似,只是在“ Tucson”文件夹中增加了“ EARLYWID”和“ LATEWIDT”分别存放转换后的早材和晚材宽度。

总之,使用 WinDENDRO 测量树木年轮宽度是十分灵活和快捷,熟悉操作使用后可以大大提高年轮分析研究的工作效率。但是,WinDENDRO 的测量对扫描仪的分辨率和样品的打磨质量要求很高,对于定年有困难的样品,一定要在实体显微镜下观察核对,否则无法准确定年。而对于缺失轮(或伪轮)较多、年轮宽度十分狭窄、或变色较多的样品,则应当使用配有实体显微镜的测量工具分析。

致谢 承蒙中国科学院植物研究所张齐兵研究员指导 COFECHA 软件的使用,中国科学院成都生物研究所中心实验室工作人员对 WinDENDRO 的使用提供方便,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 吴祥定. 树木年轮分析在环境变化研究中的应用[J]. 第四纪研究, 1990, 19(2): 186-196.
- [2] GRISSINO-MAYER H D. Dendrochronology [A]. In : McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology [C]. 9th edition. New York : McGraw-Hill Professional Publishing Group, 2002. 352-356.
- [3] 邵雪梅. 树木年代学的若干进展[J]. 第四纪研究, 1997, 16(3) 265-271.
- [4] CHERUBINI P . Tree-Ring Research Beyond the Climate Change : " Quo vadis ? " [J]. Dendrochronologia, 2000, 18 : 91-93.
- [5] DOBBERTIN M K ,GRISSINO-MAYER H D . The Online Bibliography of Dendrochronology [J]. Dendrochronologia, 2004, 21 : 85-90.
- [6] BEKKER M F. Spatial Variation in the Response of Tree Rings to Normal Faulting During the Hebgen Lake Earthquake, Southwestern Montana, USA [J]. Dendrochronologia, 2004, 22 : 53-59.
- [7] CARTER R ,LEROY S ,NELSON T ,et al. Dendroglaciological Investigations at Hilda Creek Rock Glacier, Banff National Park, Canadian Rocky Mountains [J]. Géographie Physique et Quaternaire, 1999, 53 : 365-371.
- [8] 王葶,于丹,李江风,等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展[J]. 植物生态学报, 2003, 27 : 23-33.
- [9] MARTINELLI N. Climate from Dendrochronology : Latest Developments and Results [J]. Global and Planetary Changes, 2004, 40 : 129-139.
- [10] SANTORO A E ,LOMBARDERO M J ,AYRES M P ,et al. Interactions Between Fire and Bark Beetles in An Old Growth Pine Forest [J]. Forest Ecology and Management, 2001, 144 : 245-254.
- [11] GRISSINO-MAYER H D ,FRITTS H C. The International Tree-Ring Data Bank : An Enhanced Global Database Serving the Global Scientific Community [J]. The Holocene, 1997, 7 : 235-238.
- [12] SOLOMINA O ,CHERUBINI P. " Tree Rings and People ", an International Conference on the Future of Dendrochronology : an Overview [J]. Dendrochronologia, 2002, 20 : 13-19.
- [13] GRISSINO-MAYER H D. Computer-assisted, Independent Observer Verification of Tree-Ring Measurements [J]. Tree-Ring Bulletin, 1997, 54 : 29-41.
- [14] 侯爱敏,周国逸,彭少麟. 鼎湖山马尾松径向生长动态与气候因子的关系[J]. 应用生态学报, 2003, 14 : 637-639.
- [15] SCHWEINGRUBER F H. Tree Rings, Basic Applications and Dendrochronology [M]. Dordrecht, The Netherlands : D. Reidel Publishing Company, 1988. 83.
- [16] HOLMES R L. Computer-assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement [J]. Tree-Ring Bulletin, 1983, 44 : 69-75.
- [17] GRISSINO-MAYER H D. Evaluation Crossdating Accuracy : A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA [J]. Tree-Ring Research, 2001, 57 : 205-221.