

DOI: 10.5846/stxb201403300597

赵守栋, 江源, 焦亮, 王明昌, 张凌楠, 李文卿. ARSTAN 程序和 R 语言 dplR 扩展包进行树轮年表分析的比较研究. 生态学报, 2015, 35(22): - .
Zhao S D, Jiang Y, Jiao L, Wang M C, Zhang L N, Li W Q. A Comparative Analysis of ARSTAN and the dplR Package of R Language in Analyses of Tree-ring Chronologies. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): - .

ARSTAN 程序和 R 语言 dplR 扩展包进行树轮年表分析的比较研究

赵守栋, 江源*, 焦亮, 王明昌, 张凌楠, 李文卿

北京师范大学资源学院, 北京 100875

摘要:在树轮年代学领域, ARSTAN 是去趋势处理和建立年表方面应用最为广泛的程序, 而新兴的 R 语言 dplR 扩展包实现了 ARSTAN 的主要功能, 且具有源代码公开、扩展性强等优点, 是传统程序的良好补充。本文使用贺兰山青海云杉 (*Picea Crassifolia*) 树轮宽度数据, 分析了 ARSTAN 和 dplR 进行树轮年代学分析所得结果的差异。结果显示, 两种程序计算平均敏感度和一阶自相关系数的平均误差为 0.005—0.008, 但具有确定的转换关系; 两种程序如果使用同种方法去趋势, 拟合曲线的参数相近, 建立标准年表的平均误差为 0.002; 拟合自回归模型时差异较大, 其中时域上表现为差值年表起始 30 年内差异显著, 在频域上表现为 dplR 的差值年表保留的低频信息较少; 年表统计量计算和公共区间分析中, 不同程序计算样本总体代表性和信噪比的差异较大。分析表明, 两程序在拟合生长趋势和自回归模型时存在算法上的较大差异, 同时年表统计量和公共区间各指标的算法也不尽一致, 但存在较为确定的转换关系。本文对开展不同来源数据的整合分析提出了建议, 应明确不同研究中树轮数据的处理过程, 在条件允许时使用同一程序或算法重新处理数据, 确保结果的可比性。

关键词: R 语言; dplR; 去趋势; 公共区间分析; 树轮年代学

A Comparative Analysis of ARSTAN and the dplR Package of R Language in Analyses of Tree-ring Chronologies

ZHAO Shoudong, JIANG Yuan*, JIAO Liang, WANG Mingchang, ZHANG Lingnan, LI Wenqing

College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Dendrochronology plays an important role in estimating past climatic conditions and predicting future climate change. Detrending and chronology development are the fundamental steps of the study of dendrochronology. ARSTAN is the most popular program used to accomplish this step, and it has played an important role in the development of dendrochronology. However, ARSTAN uses the Fortran programming language, so users find it difficult to understand and revise the algorithm of the source program to meet their needs. An emerging package of the R language named dplR provides similar functions to ARSTAN. R and dplR's source code is fully open to the public; thus, it has numerous users. When scholars from different domains communicate and share the methods and results of dendrochronology, it can help them improve those chronologies. In addition, R and dplR have become a good supplement to traditional analysis software. This paper compares the different dendrochronological analysis algorithms and results provided by ARSTAN and dplR with tree ring width data from *Picea crassifolia* on Helan Mountain, Ningxia Hui Autonomous Region, China. The results show that the two programs calculated exactly the same means and standard deviations. The mean error of the mean sensitivities (MS) and first-order autocorrelations (AC) were 0.005 and 0.008, respectively, but they had a clear conversion relationship. When using the same method for detrending with both types of software, the parameters of fitting curves were generally

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171067)

收稿日期: 2014-03-30; 网络出版日期: 2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangy@bnu.edu.cn

equal, and the corresponding standard chronologies developed by the two programs had a mean error of only 0.002. However, the residual chronologies were very different. In the time domain, a significant difference was observed in the residual chronologies in the first 20—30 years. In the frequency domain, the residual chronologies created using ARSTAN showed more low frequency information than that created using dplR. For example, the former showed periods of 32 years with higher power than those of dplR. In the common interval analysis, ARSTAN gave a higher expressed population signal (EPS) and signal-to-noise ratio (SNR) of chronologies than dplR. EPS error was 0.4% and SNR error was 30—40%. By comparing the algorithms of the two programs, we found that ARSTAN and dplR have different initial value setting rules and nonlinear fitting methods to choose the best fitting model during detrending. When fitting an autoregression model, ARSTAN used a pooled algorithm to find the integral growing pattern and used the same fitting order for different sequences. However, dplR directly used different optimal fitting models for different sequences. In addition, the two programs used different, but similar, formulas for calculating MS, AC, EPS, and SNR. Although the absolute value of the results was different, calculation results of the same program using different data were comparable. In conclusion, this paper offers two suggestions for the meta-analysis of tree ring data from different sources. First, if the source data are available, researchers should choose a single program for statistical calculation, detrending, and common interval analysis based on their needs. Second, if the source data are not available, information related to the chronologies is sufficient; researchers should use only a single program to calculate EPS and SNR chronological statistics to ensure that the results will be comparable.

Key Words: R language; dplR; detrending; common interval analysis; dendrochronology

树轮年代学研究树木年轮的宽度、密度等性质构成的时间序列及其与环境因子的响应关系^[1],在反演过去和预测未来气候变化中扮演着重要作用^[2-5]。树轮年代学中,去除树木自身的生长趋势并建立树轮年表是开展研究的基础步骤之一。在去趋势处理和建立年表方面,Cook 等编写的 ARSTAN 程序是目前最权威的分析工具,在树轮年代学的发展过程中发挥了巨大作用。然而 ARSTAN 基于 Fortran 语言编写,同时缺乏系统而详细的说明文档,使用者不容易理清其内部的算法,实现新的分析方法也比较困难,这在一定程度上限制了研究的深入和学科间的交流。

R 语言是当前发展较快的统计分析工具之一,在众多研究领域得到了越来越广泛的应用。Bunn 等使用 R 语言编写了 dplR 扩展包,实现了树轮数据读取、转换、分析、绘图等功能^[6]。相比于经典工具而言,R 语言和 dplR 等相关扩展包的源代码完全公开,且容易理解,研究者可以根据自身需要修改或编写程序;同时使用者众多,网络社区发达,有利于不同领域的相互交流。因此,R 语言及 dplR 扩展包是 ARSTAN 等传统程序的良好补充,对于树轮年代学的进一步发展具有重要意义。

目前在国外研究中,dplR 被广泛应用于去趋势处理和建立年表^[7-9],在交叉定年^[10]、小波分析^[3]等方面也发挥了作用;在其基础上又发展出交互式去趋势^[11]、响应函数分析^[12]、扰动事件重建^[13]等相关扩展包,逐渐形成了一套较为完整的树轮数据分析软件体系。而在国内树轮年代学领域,使用 dplR 开展的研究还较少,使用的功能也相对单一^[14]。作为一个新兴的树轮年表分析工具,dplR 处理结果与传统程序一致与否,将直接影响到不同来源研究数据的可比性,因此有必要对 ARSTAN 和 dplR 在算法和结果上进行比较分析。

本文使用贺兰山青海云杉树轮宽度数据,分别借助 ARSTAN 和 dplR 进行原始序列统计量计算、去趋势处理、年表建立、公共区间分析等操作,通过相关分析、小波分析等手段比较了两者所得结果的差异,并从算法的角度探讨了差异的来源,为开展树轮年代学数据的整合分析提出了需要注意的问题及相应建议。

1 数据与方法

1.1 树轮宽度资料与气候资料

本文中使用的树轮资料为贺兰山青海云杉(*Picea Crassifolia*)树轮宽度数据^[15],采样点位于贺兰山东坡林线附近,共包含来自 25 棵样树 50 根样芯的树轮宽度测量结果,数据精度为 0.01 mm。使用 COFECHA 程序检验交叉定年质量,结果显示序列平均长度为 83.9 a,平均敏感度为 0.393,序列间相关系数为 0.83。

1.2 ARSTAN 处理

ARSTAN 程序目前分为 Windows XP 版和 OS X 版,早期的 DOS 版已不再更新。本文主要使用 Windows XP 版 ARSTAN 进行去趋势处理并建立年表,程序下载自美国哥伦比亚大学树木年轮实验室 (www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory),版本号为 44。选择的去趋势方法为修正的负指数函数,即:

$$f(i) = a \times \exp(-b \times i) + d \quad (1)$$

其中 $f(i)$ 为生长趋势估计值, i 为年份的序号。设定约束条件为 $d > 0$,拟合失败则拟合斜率非正的线性函数。公共区间设定为所有树芯均含有的共同时间段,即 1966—2009 年。ARSTAN 最终建立标准年表 (standard chronology, STD)、差值年表 (residual chronology, RES) 和自回归年表 (autoregressive standard chronology, ARS),并给出年表的基本统计量和公共区间分析结果。

1.3 dplR 处理

R 语言主程序和 dplR 扩展包均下载自综合 R 档案网络 (cran.r-project.org),其中 R 语言版本号为 3.1.1,dplR 版本号为 1.6.1。使用“`rwl.stats`”函数计算原始树轮宽度序列和树轮宽度指数年表的基本统计量。使用“`detrend.series`”函数对原始树轮宽度序列逐一进行去趋势操作,确保各样芯使用的去趋势方法与 ARSTAN 中相同,使得结果具有可比性。使用“`rwi.stats`”函数对树轮宽度指数序列进行公共区间分析,时间段同样设定为 1966—2009 年,这也是程序默认的公共区间。使用“`chron`”函数采用双权重平均法建立年表,最终得到 STD 和 RES 年表。

1.4 ARSTAN 与 dplR 结果对比

比较 ARSTAN 和 dplR 所得原始轮宽序列统计量的差异,使用 Spearman 相关系数考察误差与序列长度的关系。对比 ARSTAN 和 dplR 拟合生长趋势所得曲线的参数及拟合结果,使用 Spearman 相关系数考察两程序所得 STD、RES 年表的相关性,以 ARSTAN 所得结果为准,计算 dplR 所得年表的标准误;针对差异相对较大的 RES 年表,使用 Morlet 小波变换分析两程序所得 RES 年表在频域上的差异。最后比较不同程序在年表统计量和公共区间分析结果上的差异。相关分析中,显著性水平设置为 0.05。

2 结果

2.1 原始轮宽序列统计量

针对 50 个原始轮宽序列,ARSTAN 和 dplR 计算所得均值和标准差完全相等;而 dplR 所得平均敏感度 (mean sensitivity, MS) 和一阶自相关系数 (first-order autocorrelation, AC) 均略小于 ARSTAN 所得结果,其中 MS 的平均误差为 0.005,标准误为 0.0002,AC 的平均误差为 0.008,标准误为 0.0003,两者的误差与序列长度存在显著负相关关系 ($P < 0.05$)。进一步计算发现,ARSTAN 和 dplR 所得 MS 和 AC 满足:

$$MS_r = MS_a \times \frac{n-2}{n-1} \quad (2)$$

$$AC_r = AC_a \times \frac{n-1}{n} \quad (2)$$

其中 MS_r 为 dplR 所得 MS, MS_a 为 ARSTAN 所得 MS, AC_r 为 dplR 所得 AC, AC_a 为 ARSTAN 所得 AC, n 为序列长度。随着序列长度的增加,ARSTAN 与 dplR 所得结果的差异将逐渐减小,当序列长度在 100 年以上时,相对误差可以降至 1% 以下。

2.2 建立树轮宽度指数年表

ARSTAN 和 dplR 拟合所得负指数函数的参数 a 、 b 完全相同,参数 d 的误差在 0.0003 以内,而线性函数参数完全相同。去趋势所得各样芯的两个标准化序列间存在差异的年份不超过 10 年,且误差均在 0.003 以内。在此基础上,两程序建立的 STD 年表相关系数为 0.999 ($P < 0.05$),对应年份宽度指数误差在 0.05 以内,平均误差为 0.005,标准误为 0.0010,相位变化情况基本相同 (图 1)。

在建立差值年表时,ARSTAN 对各标准化序列均拟合为一阶自回归模型,所得差值序列与原序列长度相等;而 dplR 则拟合成分数各异的自回归模型,包括 29 个一阶模型和 17 个二阶或更高阶模型,序列初始损失

的年份数与模型阶数相等,另有 4 个样芯未拟合成功自回归模型。各样芯的两个差值序列间的平均误差为 0.034,标准误为 0.0011。两程序建立的 RES 年表间相关系数为 0.987 ($P < 0.05$),在 1914 年前(即序列前 30 年),两者平均误差为 0.048,标准误为 0.0096;而 1914 年后,两者平均误差为 0.028,标准误为 0.0021。两个 RES 年表仅在起始的 10 年内存在相位不一致的情况,例如 1887—1889 年(图 1)。

对两个 RES 年表分别进行 Morlet 小波变换(图 2)。结果显示,两个 RES 年表含有的高频信息基本相同,

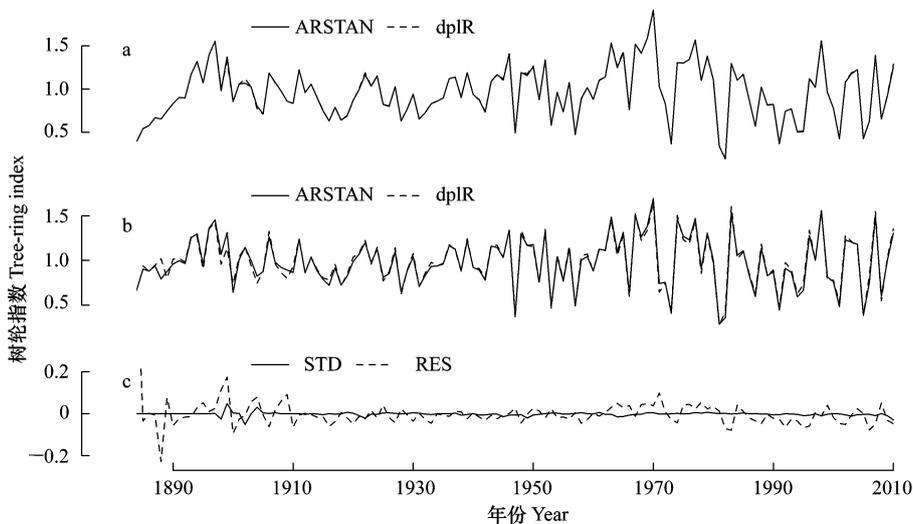


图 1 ARSTAN 和 dpLR 所得树轮宽度指数年表

Fig. 1 Tree-ring chronologies produced by ARSTAN and dpLR

(a) 为标准年表; (b) 为差值年表; (c) 为不同程序建立的年表之差

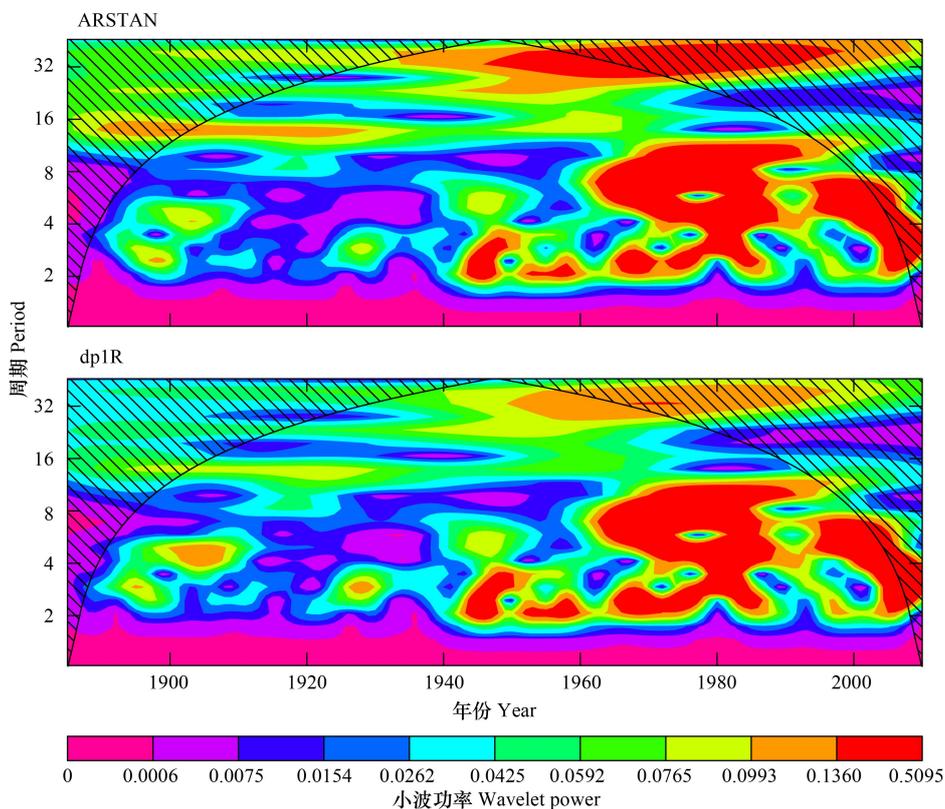


图 2 差值年表小波功率谱

Fig. 2 Wavelet power spectrum of the residual chronologies

均表现出 1940 年前 2—11 年尺度的震荡能量较小,周期变化不明显,在 1940 年后 2—11 年尺度的能量增强,周期变化显著;而在低频信息方面,ARSTAN 建立的 RES 年表在 1940 年后稳定存在着 32 年左右的周期,而 dplR 建立的 RES 年表 32 年左右的周期震荡能量始终较小。

2.3 年表统计量和公共区间分析结果

年表统计量及公共区间分析结果见表 1。在年表统计量方面,ARSTAN 的 STD、RES 年表和 dplR 的 STD 年表的序列起止年相同,而 dplR 的 RES 年表与这三个年表相比少一年(1884 年)。两个 STD 年表的均值、标准差均相差 0.001;MS 相差 0.003,相对误差约为 1%;AC 相差 0.005,相对误差约为 1.5%。而两个 RES 年各项统计量的误差均大于 STD 年表,其中 dplR 的 RES 年表 MS 比 ARSTAN 低 4%,而 AC 的绝对值低 36%。

在公共区间分析方面,两个 STD 年表的所有样芯平均相关系数(all-series Rbar, Rtot)、树内平均相关系数(within-trees Rbar, Rwt)、树间平均相关系数(among-trees Rbar, Rbt)和年表有效信号(effective chronology signal, Reff)均完全相等,而 ARSTAN 的 RES 年表在这些指标上普遍略高于 dplR 的 RES 年表。dplR 的 STD 和 RES 年表的样本总体代表性(expressed population signal, EPS)比 ARSTAN 计算结果低 0.004,相对误差约为 0.4%,而信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)结果低 30 左右,相对误差高达 30%—40%。

表 1 年表统计量及公共区间分析结果

Table 1 Chronologies statistics and common interval analysis

程序 Program		ARSTAN		dplR	
年表类型 Chronology		STD	RES	STD	RES
年表统计量 Chronologies statistics	序列长度 Time span	1884—2010	1884—2010	1884—2010	1885—2010
	Mean	0.966	0.986	0.967	0.993
	SD	0.308	0.283	0.309	0.280
	MS	0.298	0.348	0.295	0.333
	AC	0.312	-0.137	0.317	-0.087
公共区间分析 Common interval analysis	公共区间 Common interval	1966—2009	1966—2009	1966—2009	1966—2009
	样树/样芯 Trees/Cores	25/50	25/50	25/50	25/50
	Rtot	0.674	0.728	0.674	0.725
	Rwt	0.808	0.850	0.808	0.843
	Rbt	0.671	0.725	0.671	0.722
	Reff	0.743	0.784	0.743	0.784
	EPS	0.990	0.993	0.986	0.989
	SNR	103.477	133.745	72.125	90.525

注:Mean 为平均指数(mean indices);SD 为标准差(standard deviation);MS 为平均敏感度(mean sensitivity);AC 为一阶自相关系数(first-order autocorrelation);Rtot 为所有样芯平均相关系数(all-series Rbar);Rwt 为树内平均相关系数(within-trees Rbar);Rbt 为树间平均相关系数(among-trees Rbar);Reff 为年表有效信号(effective chronology signal);EPS 为样本总体代表性(expressed population signal);SNR 为信噪比(signal-to-noise ratio)。

3 讨论

3.1 ARSTAN 与 dplR 计算序列统计量的算法差异

根据原始轮宽序列统计量比较结果,ARSTAN 与 dplR 在 MS 和 AC 的计算上存在着较为确定的换算关系,这很可能是由于两者使用了不同的计算公式。dplR 计算 MS 的公式为^[16]:

$$MS = \frac{2}{n-1} \sum_{i=2}^n \frac{|w_i - w_{i-1}|}{w_i + w_{i-1}} \quad (4)$$

其中 n 为序列长度, w_i 为第 i 年的树轮宽度。根据结果推测,ARSTAN 在计算 MS 时,将公式中的 $n-1$ 换成了 $n-2$ 。

dplR 调用 R 中的“acf”函数计算 AC,其计算公式可表达为^[1,17]:

$$AC = \frac{\sum_{i=2}^n (w_i - \bar{w})}{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2} = \frac{\sum_{i=2}^n (w_i - \bar{w})}{(n-1)S^2} \quad (5)$$

其中 s 为序列的标准差。ARSTAN 在计算 AC 时,可能将 s 处理成了总体标准差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{n}} \quad (6)$$

尽管计算方法不同,由于两指标相对 n 的取值具有单调性,因此同一个程序的计算结果具有可比性,而不同程序的计算结果需要经过换算后才可相互比较。

3.2 ARSTAN 与 dplR 建立年表的算法差异

ARSTAN 和 dplR 均具有多种去趋势方法,两者的对应关系如表 2 所示,其中在拟合负指数函数的程序实现方面,两者具有较大差异。在算法上,ARSTAN 使用 Fritts 等专为负指数函数拟合问题设计的算法^[18],该方法充分考虑到负指数函数的曲线特征,首先估计曲线的切线斜率 b ,通过调节 b 的值进行迭代。而 dplR 首先估计 y 轴截距 a 和渐近线 d 的初始值, b 的初始值则根据经验直接设为 0.01,再调用 R 内置的“nls”函数进行曲线参数估计。如果不设定约束条件,当树轮宽度序列的趋势较符合负指数函数曲线时,两种算法均能得到精确的拟合结果;而当树轮宽度序列的趋势近似于直线时, d 为负值,这时 dplR 的初始值设定严重偏离最优解,导致迭代过程报错,转而使用线性函数进行拟合。如果设定约束条件 $d > 0$,ARSTAN 首先在整个定义域范围内寻找各参数的最佳估计值,然后将参数带入约束条件中进行判断,如果不符合条件则拒绝拟合负指数函数,转而拟合线性函数;而 dplR 则是在“nls”函数中缩小参数的取值范围,最终拟合得到参数的局部最优解。当拟合方法出现分歧时,去趋势所得序列将出现较大差异,而本文在操作中参考 ARSTAN 的运行结果,使用 dplR 对每根样芯单独去趋势,确保两者使用的去趋势方法相同。

尽管拟合生长趋势的方法相同,ARSTAN 和 dplR 建立的标准年表仍存在一定差异,这与缺失值的处理方式有关。为防止运算中可能出现的错误,dplR 将序列中的缺失值(一般赋值为 0)均替换成 0.001,因此 dplR 所得标准化序列不存在树轮宽度指数为 0 的情况;而 ARSTAN 并未对缺失值进行特殊处理,因此标准化序列中仍存在 0 值。

表 2 ARSTAN 和 dplR 去趋势方法的对应关系

Table 2 Corresponding relationships between detrending methods of ARSTAN and dplR

去趋势方法 Detrending methods	ARSTAN 选项 Detrending options	dplR 中函数与参数设置 Functions and parameters in dplR
均值水平线 Horizontal line (arithmetic mean)	6	detrend(method = "Mean", ...)
修正的负指数函数 Modified negative exponential curve		
无约束条件 Unconstrained	3	detrend(method = "ModNegExp", ...)
有约束条件,拟合失败则采用斜率非正的直线 Constrained, or a line with a negative or zero slope	2	detrend(method = "ModNegExp", constrain.modnegexp = "always", ...)
有约束条件,拟合失败则采用任意斜率的直线 Constrained, or a line with any slope	1	detrend(method = "ModNegExp", constrain.modnegexp = "always", pos.slope = TRUE, ...)
区域曲线标准化 Regional Curve Standardization	-2	rcs(...)
步长为序列长度 $n\%$ 的样条 Spline ($n\%$ of the series length)	$-n$	detrend(method = "Spline", nyrs = n, ...)

建立差值年表,需要去除树轮宽度指数标准化序列中的自回归成分。ARSTAN 首先用所有标准化序列拟合出一个 p 阶合并自回归模型,将拟合值作为树木群体所共有的持续性生长量。再对各标准化序列分别拟合限定为 p 阶的自回归模型,将拟合值作为整体生长模式下个体的持续性生长量,而将残差作为差值序列,并使用双权重平均法建立 RES 年表。如果将群体的持续性生长量加回到 RES 年表上,则得到 ARS 年表^[19]。dplR 未考虑整体的生长模式,而是直接对各标准化序列分别拟合自回归模型,不同序列的模型可以具有不同的阶数,再将残差作为差值序列,建立 RES 年表。针对本文所用数据,dplR 的计算过程对个体特有的持续性生长量剔除得更彻底,低频信息保留得更少,这种差异在频域上更为明显(图 2)。

拟合 p 阶自回归模型会造成序列前 p 年树轮宽度指数的损失。针对这一情况,ARSTAN 使用序列均值将标准化序列向前延长 p 年^[19],从而使自回归模型计算出的拟合值序列与原序列等长,避免了序列长度上的损失。而 dplR 未对初始年份的损失进行特殊处理,因此两个 RES 年表存在的差异相对 STD 年表更大,尤其是样本量较小的最初若干年。根据本文结果,起始值处理方式造成的差异会在约 30 年后消失,同时考虑到参与“树轮-气候”关系分析的年表区间通常远小于年表总长度,如果起始年份不参与后续的分析,则起始年份的不同处理方式对最终结果的影响较小^[19-20]。

3.3 ARSTAN 与 dplR 进行公共区间分析的算法差异

公共区间分析是指选择包含特定时间范围的树轮宽度序列,通过计算年表信号,评价最终所得年表对森林总体生长的代表性,其中年表信号是衡量序列中包含的共同变化的统计量^[21]。DOS 版 ARSTAN 在导入测量数据时会提供一个推荐的公共区间范围,其选择标准是公共区间内包含尽可能多的测量值,即满足区间内完整样芯数与区间长度乘积取得最大值;而 Windows XP 版 ARSTAN 不再提供这一结果。dplR 中对数据集进行去趋势使用“detrend”函数,其默认公共区间是所有样芯共有的公共区间,该区间长度一般小于 DOS 版 ARSTAN 提供的公共区间长度。dplR 中的“common.interval”函数可以给出各种标准对应的时间范围。

在进行公共区间分析时,最初使用方差分析对年表信号进行估计^[1],后来的研究发现使用相关矩阵也可以估计年表信号的大小^[22]。以序列间的平均相关系数(mean series intercorrelation, Rbar)作为年表信号的衡量指标,可以通过计算 EPS 和 SNR 来评价年表的质量^[17]:

$$EPS = \frac{t \times Rbar}{t \times Rbar + (1 - Rbar)} \quad (7)$$

$$SNR = \frac{t \times Rbar}{(1 - Rbar)} \quad (8)$$

其中 t 为样树数量。对于某树轮年表,如果每棵样树均取一根样芯,则 Rbar 的取值为 Rbt;如果每棵样树取多根样芯,则 Rbar 的取值应当为 Rbt 与 Rwt 加权平均结果,即 Reff,如果仍以 Rbt 作为年表信号则会低估样本中的公共信息^[21]。

根据运算结果推测,ARSTAN 可能使用样芯数量 m 和 Rtot 计算 EPS 和 SNR。这种算法将所有样芯等同看待,没有剔除同一样树的不同样芯包含着的重复信息,因此可能高估了年表质量。EPS 除了用于评价年表整体质量外,还用于计算子样本信号强度(subsample signal strength, SSS)^[21],而 EPS 和 SSS 均是衡量年表可靠长度的重要指标。由于 ARSTAN 计算得出的 EPS 偏高,可能会令 EPS 或 SSS 高于阈值(一般设为 0.8 或 0.85)的最小样本量偏低,造成对年表可靠长度的高估。

目前的树轮年代学研究中,一棵样树往往取两个甚至多个样芯,因此 dplR 采用 Reff 计算 EPS 和 SNR,计算结果更符合现有理论。使用基于 Reff 的公式重新评估本文中 ARSTAN 建立的年表,则 STD 年表 EPS 为 0.986,SNR 为 72.276,而 RES 年表 EPS 为 0.989,SNR 为 90.741,这些结果均与 dplR 所得结果接近。

3.4 对比不同来源结果时应当注意的问题

随着树木年轮基础数据日渐丰富,对前期样点尺度的研究成果进行整合,开展区域、大陆甚至全球尺度上森林对于全球气候变化的响应分析已成为研究热点之一^[23-24]。根据本文所得结果,在树木年轮研究中如果使用不同程序处理原始数据,所得年表及其质量评估需要考虑算法差异可能造成的影响。在标准年表建立方

面,即使 ARSTAN 与 dplR 拟合生长趋势的参数设定相同,拟合结果可能差异很大。而对于差值年表,在频域上,ARSTAN 建立的 RES 年表比 dplR 具有更多的低频信息;在时域上,起始年份处理方式的不同,造成年表在最初的 20—30 年内存在较明显的差异。不同程序在 MS、AC 等指标上可能存在计算方法差异;ARSTAN 使用 Rtot 计算 EPS 和 SNR 等指标,相对于文献中基于 R_{eff} 的算法而言,可能高估了年表中包含的共同信息^[25-26]。

综合以上讨论,对开展不同来源树轮数据的整合分析提出如下建议:

(1) 如果能够在国际树轮数据库等共享平台上获取原始数据,建议使用同一程序完成年表建立和公共区间分析等处理步骤,并注意检查各样芯去趋势方法的具体参数。

(2) 如果仅能获得文献资料,建议记录其处理过程的详细信息,包括软件的版本信息、去趋势的具体方法等;当信息足够时,建议根据同一标准设定公共区间,并重新计算 MS、EPS 等指标,确保结果的可比性。

4 结论

在树轮年代学研究中,新兴的 R 语言 dplR 扩展包是对 ARSTAN 等传统程序的良好补充,其平台开放性可以促进研究者对程序算法的认识和跨学科的相互交流。本文对比了 ARSTAN 程序和 dplR 扩展包,分别使用两种程序对贺兰山青海云杉树轮宽度数据进行原始序列统计量估计,完成了去趋势处理并建立了标准年表和差值年表,通过公共区间分析评价了年表的质量。分析表明,ARSTAN 与 dplR 在拟合生长趋势和自回归模型时存在算法上的较大差异,同时平均敏感度、一阶自相关系数、样本总体代表性和信噪比等指标的算法也不一致,但存在较为确定的转换关系。整合分析不同来源的树轮资料时,应明确其数据处理过程,在条件允许的情况下使用同一程序或算法进行去趋势处理和公共区间分析。

参考文献 (References):

- [1] Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976.
- [2] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 刘普幸, 张永, 方克艳. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉 (*Picea crassifolia*) 树轮生长特性及其对气候的响应. 生态学报, 2007, 27(8): 3268-3276.
- [3] Pederson G T, Gray S T, Woodhouse C A, Betancourt J L, Fagre D B, Littell J S, Watson E, Luckman B H, Graumlich L J. The unusual nature of recent snowpack declines in the North American Cordillera. *Science*, 2011, 333(6040): 332-335.
- [4] Liu H Y, Park Williams A, Allen C D, Guo D L, Wu X C, Anenkhonov O A, Liang E Y, Sandanov D V, Yin Y, Qi Z H, Badmaeva N K. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500-2510.
- [5] 芦晓明, 梁梁源. 灌木年轮学研究进展. 生态学报, 2013, 33(5): 1367-1374.
- [6] Bunn A G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 115-124.
- [7] Bader M K F, Leuzinger S, Keel S G, Siegwolf R T W, Hagedorn F, Schleppl P, Körner C. Central European hardwood trees in a high-CO2 future: synthesis of an 8-year forest canopy CO2 enrichment project. *Journal of Ecology*, 2013, 101(6): 1509-1519.
- [8] Boden S, Kahle H P, Wilpert K V, Spiecker H. Resilience of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growth to changing climatic conditions in Southwest Germany. *Forest Ecology and Management*, 2014, 315: 12-21.
- [9] Rodríguez-González P M, Campelo F, Albuquerque A, Rivaes R, Ferreira T, Pereira J S. Sensitivity of black alder (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn.) growth to hydrological changes in wetland forests at the rear edge of the species distribution. *Plant Ecology*, 2014, 215(2): 233-245.
- [10] Martin A R, Caspersen J P, Fuller M M, Jones T A, Thomas S C. Temporal dynamics and causes of postharvest mortality in a selection-managed tolerant hardwood forest. *Forest Ecology and Management*, 2014, 314: 183-192.
- [11] Campelo F, García-González I, Nabais C. detrendeR - A Graphical User Interface to process and visualize tree-ring data using R. *Dendrochronologia*, 2012, 30(1): 57-60.
- [12] Zang C, Biondi F. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, 2013, 31(1): 68-74.
- [13] Altman J, Fibich P, Dolezal J, Aakala T. TRADER: A package for tree ring analysis of disturbance events in R. *Dendrochronologia*, 2014, 32(2): 107-112.
- [14] 王蔚蔚, 张军辉, 戴冠华, 王秀秀, 韩士杰, 张寒松, 王云. 利用树木年轮宽度资料重建长白山地区过去 240 年秋季气温的变化. 生态学杂志, 2012, 31(4): 787-793.

- [15] 赵守栋, 何新, 张冰琦, 刘琦, 王辉, 江源. 贺兰山东坡高山林线青海云杉(*Picea crassifolia*) 径向生长对气候因子的响应. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(5): 501-505.
- [16] Biondi F, Qeadan F. Inequality in paleorecords. *Ecology*, 2008, 89(4): 1056-1067.
- [17] Cook E R, Pederson N. Uncertainty, emergence, and statistics in dendrochronology // *Dendroclimatology: Progress and Prospects*. Netherlands: Springer, 2011: 77-112.
- [18] Fritts H C, Mosimann J E, Bortorff C P. A revised computer program for standardizing tree-ring series. *Tree-Ring Bulletin*, 1969, 29(1-2): 15-20.
- [19] Cook E R. *A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization [D]*. Tucson, Arizona, USA: University of Arizona, 1985.
- [20] Cook E R, Shiyatov S, Mazepa V. Estimation of the mean chronology // Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 123-132.
- [21] Briffa K R, Jones P D. Basic chronology statistics and assessment // Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 137-152.
- [22] Wigley T M, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [23] 郑景云, 邵雪梅, 郝志新, 葛全胜. 过去 2000 年中国气候变化研究. *地理研究*, 2010, 29(9): 1561-1570.
- [24] PAGES 2k Consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia: Supplementary Information. *Nature Geoscience*, 2013, 6(5): 339-346.
- [25] Yang B, He M H, Melvin T M, Zhao Y, Briffa K R. Climate control on tree growth at the upper and lower Treelines: A case study in the Qilian Mountains, Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 2013, 8(7): e69065.
- [26] Ahmed M, Palmer J, Khan N, Wahab M, Fenwick P, Esper J, Cook E. The dendroclimatic potential of conifers from northern Pakistan. *Dendrochronologia*, 2011, 29(2): 77-88