

树木径向生长主要去趋势方法与误差分析

贾敏^{1,2} 朱万泽¹ 王文志¹

(1 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 树轮因其定年准确、分辨率高、连续性强、样本分布广泛等优势, 已被广泛应用于历史气候的重建、生长-气候响应关系和林线动态等研究。树轮形成不仅取决于自身的生长发育, 还受温度、降水、光照等环境因子的影响。不同去趋势方法影响树轮年表的质量和其中所含的不同频域气候信号, 选择适合的生长趋势拟合方法以及误差分析, 从而能从树轮资料中获取较多的气候信息并保证精度是树木年轮气候学研究的关键环节。文中综述了树木年轮气候研究中的主要生长趋势拟合方法, 分析了不同方法的优缺点与适用性, 并对年表的误差进行了分析, 指出未来树轮气候学研究中生长趋势拟合应注重多种方法和多种误差的结合分析。

关键词: 树木年轮, 去趋势法, 误差分析, 树轮气候学, 树木径向生长

中图分类号: S718.5, S758.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2017)00-0000-00

DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2017.0027.y

Detrending Methods and Biases Analysis in Tree Radial Growth

Jia Min^{1,2} Zhu Wanze^{1*} Wang Wenzhi¹

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, 610041, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: The tree-ring has been used widely in historical climate reconstruction, growth-climate and treeline dynamics due to its advantages of accurate for cross-dating, high-resolution and well continuity. Tree-ring width series contain information on tree-growth responses to different environment drivers (e.g. temperature, precipitation, light), meanwhile, they also contain information on age/size dependent trends caused by the ontogenetic development. Different detrending methods influence the quality of tree-ring chronology and the climate information. It is thus critical in analyzing long-term growth trends to use proper growth-trend detection methods and biases analysis in order to obtain more climate information and improve precision. Here, we reviewed the major widely used trend-detection methods and influence of biases on trend detection, recommended applying multiple methods and analyzing possible influence of biases when analyzing trends in the dendroclimatology.

Key words: Tree-rings; Detrending Methods; Biases Analysis; Dendroclimatology

年轮是树木形成层向内侧分化过程中由于受到季节的交替变化而形成的同心轮状结构^[1]。树木年轮因其定年准确、分辨率高、连续性强、样本分布广泛等优点, 能够准确、清楚地反应过去气候变化的信息, 已在历史气候的重建^[2]、生长-气候响应关系^[3]、林线动态^[4]等方面得到广泛应用。

树轮年表中既包含了各种环境因子的长期气候信号, 也包含了树木自身的生长发育以及内部干扰等非气候信号^[5]。此外, 采样过程中以及数据分析过程中存在的一些误差也会影响年表的质量和精度, 导致错误的趋势。如何去除树轮生长过程中的年龄和胸径趋势, 而突出其中的气候信号并保证年表的精度, 是树木年轮气候学研究中的关键环节^[6]。本文综述树轮生长趋势的拟合方法, 分析不同方法的优缺点与适用性, 同时总结误差的影响, 提出在未来树轮气候学研究中生长趋势拟合应注重的问题, 同时结合误差分析结果来归因分析, 以更准确地表达树木长期生长趋势及其机制。

收稿日期: 2016-12-22; 修回日期: 2017-01-17。

基金项目: 国家自然科学基金(41601206)。

作者简介: 贾敏(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为森林生态, E-mail: 274922127@qq.com。

通信作者: 朱万泽, 男, 研究员, E-mail: wzhu@imde.ac.cn。

1 主要去趋势方法

过去几十年来,国内外学者已经提出大量的生长趋势拟合方法,分析环境因素对生长的影响,以消除生长中的年龄或胸径的作用。归纳起来主要有保守去趋势法(CD)、区域曲线标准化法(RCS)、断面积修正法(BAC)、径级法(SCI)和参考年龄级法(RAC)5种广泛运用的方法。

1.1 保守去趋势法

保守去趋势法是用数学函数来拟合树轮的生长趋势,这类函数主要包括任意斜率直线、负指数函数^[7]、样条函数^[8]、幂函数^[9]、线性回归^[10]、双曲线函数和多项式函数^[11]等。该方法的前提是拟合函数可以去除随年龄增长树轮宽度变窄的趋势,而全面或部分地保留树轮长期生长趋势。

1.2 区域曲线标准化法

Erlandsson^[12]在其早期的树轮气候学研究中采用的标准化方法是区域曲线标准化方法的雏形,后来 Fritts^[13]也描述过该方法,最终由 Becker^[14]提出该方法。Briffa^[15]首次将其命名为 RCS 法(Regional Curve Standardization),Bontemps^[16]在 2011 年提出了基于生理年龄和半径的 2 种区域曲线标准化的步骤和公式。该方法是先建立区域曲线,将区域内所有个体的树轮宽度对齐到生理年龄或相同半径,然后对同一生理年龄或同一半径内所有树轮宽度求平均,再用数学平滑函数拟合树轮宽度的平均值,即得到区域曲线(RC)^[17],最后用区域内每个个体的轮宽序列除以平滑后的树轮宽度值就是标准化后的区域曲线。

由于保守的去趋势法和 RCS 法可能会包含部分气候信息,从而导致年表中气候信息的损失或扭曲,特别是接近或超过样芯长度的中低频信息。为了减少趋势扭曲问题,Melvin^[18]提出了“signal-free”方法,即通过反复迭代方法得到平稳的轮宽指数,然后再对平稳的轮宽指数序列求平均得到零信号年表。

1.3 断面积修正法

断面积修正法是将年轮宽度转化为断面积指数(BAI)来去除年龄或大小的趋势,断面积计算公式由 Phipps 和 Whiton^[19]于 1988 年提出。该方法的前提是树木成熟后 BAI 的增长趋于稳定,而树木达到成熟后年轮宽度通常会随着树木径级的增大而有变窄的趋势^[20]。

Biondi 和 Qeadan^[21]对 BAI 计算公式进行了变换,提出了 C 方法,该方法的前提假设为每年树轮的断面积增加量为常数 C,先用每棵树不同生理年龄下的断面积指数的中位数来表示这棵树的断面积常数,最后用该断面积常数 C 除以实测的断面积指数序列进行标准化。

1.4 径级法

径级法并不是通过曲线拟合或数据转换方法来去除树木生长中的年龄或大小趋势,而是直接分析个体生长发育阶段得到生长趋势,即对区域内所有个体在相同生理年龄或相同径级下进行分析^[22]。该方法首先将树轮的直径分为几个等级(一般 4 cm 为一个直径级),在相应直径级下的树轮定义为“中心轮”,对该中心轮左右 2 侧或前后 2 年的树轮一共 5 个年轮的 BAI 求平均值作为该直径级的生长趋势。对于缺失的树轮,则至少要求 4 个年轮 BAI 的均值。该方法的前提是树木在相同直径级下具有相似的生长速率,因此可以去除年龄和胸径的效应。

1.5 参考年龄级法

保守的去趋势方法和区域曲线标准化法均将树轮宽度标准化为无量纲的轮宽指数,标准化后的无量纲的轮宽指数与原始轮宽实测值不存在直接关系,那么不同区域、不同物种的年表在轮宽的绝对值上无法比较,同时也不能获得环境因子与绝对轮宽值之间的关系。例如,生长季温度每上升 1 °C,树轮宽度生长多少毫米?因此,Helama^[23]提出了 RAC(Reference Age Class)方法,该方法是一种基于标准化生理年龄的方法,在标准化中保留了轮宽单位,不需要进行生长趋势的曲线拟合得到无量纲的轮宽指数,而是将轮宽测量值转化成排序后的

数据，具体步骤如下：首先，对各条轮宽序列按生理年龄划分为若干个年龄段(5年、10年为一个年龄段)，选择其中一个年龄段作为参考年龄段(RAC)，并对参考年龄段内所有序列的轮宽值进行排序编号；然后，对剩下的其他年龄段内的各条序列轮宽值进行排序编号；最后，用参考年龄段(RAC)中 n 个序号对应的轮宽值替换其他年龄段内相同序号下的轮宽值。

2 不同去趋势法的优缺点与适用性

不同去趋势法在树木年轮气候研究中生长趋势拟合的一致性、敏感性、可靠性和精确性有所不同^[24]，适用性也有差异，具体如表 1。

表 1 不同去趋势法的优缺点与适用性

方法	优点	缺点	适用性
保守去趋势法 (CD)	更好地用于分析气候-生长响应关系。	1)敏感性和精确性低； 2)存在趋势的过度拟合	1)不适用于序列短的树种，更适用于序列长的树种； 2)样条函数更适用于湿润地区 ^[12] ； 3)负指数函数更适用于干旱、半干旱地区 ^[13]
区域曲线标准化法 (RCS)	1)高敏感性、精确性和可靠性； 2)避免了曲线拟合过程； 3)不受树轮序列长度的限制，可以恢复长于树轮序列长度的气候变化信息，保留更多的低频信号 ^[1]	1)把所有样本的第 1 年当作树木生长的第 1 年，这与树木真实的生理年龄不符，有可能低估树木早期的生长趋势 ^[25] ； 2)有一定的前提条件，存在拟合偏差	1)基于年龄的 RCS 法不适用于耐荫树种； 2)适用于含髓芯多、样本量大的数据
断面积修正法 (BAC)	敏感性高且精确性好	可靠性最低	适用于成熟林
径级法 (SCI)	1)可靠性高； 2)不受曲线拟合方法的影响	1)敏感性低； 2)直径级的划分具有主观性	不适用建立生长-气候响应关系
C 方法	减少曲线拟合过程中方法不同带来的误差，增加了数据的稳定性 ^[21]		1)对于小样本量来说，C 方法要优于 RCS 方法； 2)适合于开放式的、耐荫的树种
“Signal-free”方法	1)缓解年表中趋势扭曲 ^[18] ； 2)缓解年代或年代际小于拟合曲线周期的共同干扰对拟合曲线的影响 ^[1]	1)不能区别出轮宽序列的生长趋势和气候信号； 2)不能排除部分轮宽序列存在的干扰信号 ^[1]	适合于种间竞争较小的样本
RAC 方法	1)保留了原始轮宽的绝对值，可以进行不同地点、不同区域和不同物种间的比较 ^[23] ； 2)能评估树轮每年或年际以及年代际尺度上的生长特征 ^[23]	不能用于甄别是否不同年龄段的树木对气候因子响应的不同 ^[23]	适合于同龄林的气候因子响应分析

3 误差分析

随着树轮数据的广泛应用，最近越来越多的研究开始关注于树木年代学研究中各种不确

定性的来源^[26]。采样设计^[27]、趋势拟合方法的选择^[24]以及树轮宽度数据本身引起的生长趋势的误差是引起不确定性来源的重要原因。在树木年代学研究中,各种不确定性来源主要由以下4种误差引起的。

1) 幼树选择效应误差(Juvenile Selection Biase)。研究表明,在幼树期,温带森林^[28]和热带森林^[29]生长速率快的树种达到冠层的几率要大于生长速率慢的树种,即幼树选择效应(“Juvenile selection effect”)。幼树选择效应表明,现存成熟林其幼树阶段生长速率相对较快,幼树阶段生长速率慢的树种由于得到的光照少,死亡率高,从而被种群淘汰。因此,在当前采集的几百年前的树轮数据中缺失了生长速率慢的个体,从而导致整体呈现出生长衰退的趋势,掩盖了由于环境条件变化引起的生长加速。可用分位数回归来评估该误差是否存在^[30],即在胸径小于20 cm的树木中选择25%生长速率最快的个体和25%生长速率最慢的个体,对其树轮宽度指数进行分位数回归。其中上分位数的回归趋势可以反映树木生长条件的变化,下分位数用于误差评估,若下分位数的回归趋势为负,则表明过去慢速生长的个体被种群淘汰了。若上分位数的回归趋势与总体数据的趋势一致,则认为是环境条件的变化而不是误差导致的趋势,表明误差并不对结果产生影响。

2) 死亡前慢速生长误差(Predeath Slow-growth Biase)。树木生长在其死亡前几年甚至几十年会出现衰退现象^[31],这种衰退生长趋势会对趋势拟合造成误差,导致生长趋势衰退或掩盖生长的加速^[22]。温带森林树木在死亡前的6~12年出现生长衰退现象^[32]。为评估该误差是否对趋势拟合结果产生影响,通常将最后15年的生长数据移除,然后重新分析其生长趋势,如果总体数据中的负趋势消失了或变成正的趋势,则表明该误差对趋势拟合的结果产生了影响^[30]。

3) 胸径选择误差(Big-tree Selection Biase)。对固定面积内大于一定胸径(如 $DBH > 5$ cm)的树木进行树芯采样是树木年代学研究中一种广泛的采样方法,该方法导致慢速生长的个体由于没有达到采样的最低胸径而被排除在外,使得在近几十年的数据中缺失了慢速生长个体的数据^[33]。这种采样方法会高估最近几十年的树木生长趋势。以下方法可以减少或避免该误差存在,即在采样过程中对胸径小于5 cm的树木采集树轮圆盘进行分析,估计样地内树木长至胸径位置(距地面1.3 m)所需的平均生理年龄^[34]。Brienen等^[33]用随机模型模拟了热带树种西班牙雪松(*Cedrela odorata*)的生长轨迹,结果表明“Big-tree selection”误差导致了显著的生长加速趋势。

4) 生理年龄差异误差(Slow-grower Survivorship)。若树木在达到一定胸径(D_t)时就会死亡,则生长速率快的个体达到 D_t 时的生理年龄小于生长速率慢的个体。该误差是由生长速率快的树木与生长速率慢的树木在生理年龄长短上的差异引起的。如果生长速率快的个体生理年龄小,那么在几百年前的总体树轮数据中会缺失一部分生长速率快的个体,从而导致对过去生长速率的重建偏向于生长速率慢的个体,但最近几十年的生长趋势却显著上升^[33]。在温带^[35]和热带^[36]树种的研究中已经发现生长速率与树木生理年龄之间此消彼长的关系。比较同期死树和活树的生长速率差异,是评估该误差是否存在的有效方法^[37],但不适用于分解率或腐烂率较高的地区。此外,在采样过程中进行分层采样,即依据树种在群落中的作用(优势种、共生种和被压种)、径级(大、中和小胸径)、年龄级(幼龄林、中龄林和老龄林)进行分层采样可能会减少该误差。

4 总结

1) 树木生长受到多种复杂因素的影响,即使同一研究区采用不同去趋势方法拟合树木生长趋势获得的气候信息也会有所差异。因此,在去趋势方法的选择上需要综合考虑多种因素,根据研究目的选择合适的去趋势方法。所有的去趋势方法都不能完全去除年龄或大小趋势,因此,在未来树轮生长趋势拟合研究中要注重多种方法的结合分析。

2) 生长趋势的拟合需要综合考虑到年龄和胸径的效应。在树木生长过程中,随着年龄的

增长, 树高以及胸径都在同时变化, 但如何分离出年龄或者大小的效应是未来研究的难点。

3) 去生长趋势是树轮气候学研究中极其重要的一个环节, 因此从机理上了解影响树木生长的非气候因素至关重要, 尤其是在湿润地区。如何从生长趋势中提取出比如种内竞争、内部干扰等信号, 是未来树轮气候学研究关注的重点。

4) 在解释树木生长趋势时, 要注意树轮数据本身误差的存在, 不能忽略误差来解释得出的生长趋势, 需要结合误差分析结果来进行生长趋势的归因分析。同时, 对于树轮数据误差大小的定量研究也是需要关注的问题。

参 考 文 献

- [1]方克艳,刘昶智,勾晓华,等. 树轮学的一些基本研究方法和存在的问题[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 41-46.
- [2]ANCHUKAITIS K J, TAYLOR M J, LELAND C, et al. Tree-ring reconstructed dry season rainfall in Guatemala[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(5/6): 1537-1546.
- [3]BATTIPAGLIA G, ZALLONI E, CASTALDI S, et al. Long Tree-Ring Chronologies Provide Evidence of Recent Tree Growth Decrease in a Central African Tropical Forest[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0120962.
- [4]GOU X, ZHANG F, DENG Y, et al. Patterns and dynamics of tree-line response to climate change in the eastern Qilian Mountains, northwestern China[J]. *Dendrochronologia*, 2012, 30(2): 121-126.
- [5]COOK E R, BRIFFA K R. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 153-162.
- [6]FRITTS H C, DEAN J S. Dendrochronological modeling of the effects of climatic change on tree-ring width chronologies from the Chaco Canyon area, southwestern United States[J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1992, 52: 31-58.
- [7]BAREFOOT A C, WOODHOUS L B, HAFLEY W L, et al. Developing a dendrochronology for Winchester, England[J]. *Journal of the Institute of Wood Science*, 1974, 6(5): 34-40.
- [8]COOK E R, PETERS K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies[J]. *Tree-ring Bulletin*, 1981, 41:45-53.
- [9]KUUSELA K, KILKKI P. Multiple regression of increment percentage on other characteristics in scotch-pine stands[J]. *Acta Forestalia Fennica*, 1963, 75(4):1-40.
- [10]WANG G G, CHHIN S, BAUERLE W L. Effect of natural atmospheric CO₂ fertilization suggested by open-grown white spruce in a dry environment[J]. *Global Change Biology*, 2006, 11(3): 601-610.
- [11]吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 138-144.
- [12]JERLANDSSON S. *Dendro-chronological studies: Geochronology Institute report 23*[R]. University of Uppsala, 1936.
- [13]FRITTS H C. *Tree Rings and Climate*[M]. London: Academic Press, 1976: 1-54.
- [14]BECKER M. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges Mountains of northeastern France[J]. *Canadian journal of forest research*, 1989, 19(9): 1110-1117.
- [15]BRIFFA K R, JONES P D, BARTHOLIN T S, et al. Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales[J]. *Climate Dynamics*, 1992, 7(3): 111-119.
- [16]BONTEMPS J D, ESPER J. Statistical modelling and RCS detrending methods provide similar estimates of long-term trend in radial growth of common beech in north-eastern France[J]. *Dendrochronologia*, 2011,29(2): 99-107.
- [17]ESPER J, COOK E R, KRUSIC P J, et al. Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies[J]. *Tree-ring Research*, 2003, 59(2): 81-98.
- [18]MELVIN T M, BRIFFA K R. A "signal-free" approach to dendroclimatic standardization[J]. *Dendrochronologia*, 2008,26(2): 71-86.
- [19]PHIPPS R L, WHITON J C. Decline in long-term growth trends of white oak[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1988, 18(1): 24-32.
- [20]SILVA L C R, ANAND M. Probing for the influence of atmospheric CO₂ and climate change on forest ecosystems across biomes[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(1): 83-92.
- [21]BIONDI F, QEADAN F. A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment[J]. *Tree-Ring Research*, 2008, 64(2): 81-96.
- [22]VAN DER SLEEN P, GROENENDIJK P, VLAM M, et al. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO₂ fertilization but water-use efficiency increased[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(1): 24-28.
- [23]HELAMA S. Expressing tree-ring chronology as age-standardized growth measurements[J]. *Forest Science*, 2015, 61(5): 817-828.
- [24]PETERS R L, GROENENDIJK P, VLAM M, et al. Detecting long-term growth trends using tree rings: a critical evaluation of methods[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(5): 2040-2054.
- [25]徐岩,邵雪梅. 柴达木盆地东缘祁连圆柏轮宽序列标准化的方法研究[J].*地理学报*, 2006, 61(9): 919-928.
- [26]FRANKE J, FRANK D, RAIBLE C C, et al. Spectral biases in tree-ring climate proxies[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 360-364.
- [27]NEHRBASS-AHLES C, BABST F, KLESSE S, et al. The influence of sampling design on tree-ring-based quantification of forest

- growth[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2867-2885.
- [28]LANDIS R M, PEART D R. Early performance predicts canopy attainment across life histories in subalpine forest trees[J]. *Ecology*, 2005, 86(1): 63-72.
- [29]ROZENDAAL D, BRIENEN R J W, SOLIZ-GAMBOA C C, et al. Tropical tree rings reveal preferential survival of fast-growing juveniles and increased juvenile growth rates over time[J]. *New Phytologist*, 2010, 185(3): 759-769.
- [30]GROENENDIJK P, SLEEN P, VLAM M, et al. No evidence for consistent long-term growth stimulation of 13 tropical tree species: results from tree-ring analysis[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3762-3776.
- [31]BOWMAN D M J S, BRIENEN R J W, GLOOR E, et al. Detecting trends in tree growth: not so simple[J]. *Trends in plant science*, 2013, 18(1): 11-17.
- [32]WYCKOFF P H, CLARK J S. The relationship between growth and mortality for seven co-occurring tree species in the southern Appalachian Mountains[J]. *Journal of Ecology*, 2002, 90(4): 604-615.
- [33]BRIENEN R J W, GLOOR E, ZUIDEMA P A . Detecting evidence for CO₂ fertilization from tree ring studies: The potential role of sampling biases[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 26(1): GB1025.
- [34]LIANG E, WANG Y, ECKSTEIN D, et al. Little change in the fir tree-line position on the southeastern Tibetan Plateau after 200 years of warming[J]. *New Phytologist*, 2011, 190(3): 760-769.
- [35]BIGLER C & VEBLEN T T. Increased early growth rates decrease longevities of conifers in subalpine forests[J]. *Oikos*, 2009, 118(8): 1130-1138.
- [36]SCHÖNGART J, ORTHMANN B, HENNENBERG K J, et al. Climate-growth relationships of tropical tree species in West Africa and their potential for climate reconstruction[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(7): 1139-1150.
- [37]VOELKER S L, MUZIKA R M, GUYETTE R P, et al. Historical CO₂ growth enhancement declines with age in *Quercus* and *Pinus*[J]. *Ecological Monographs*, 2006, 76(4): 549-564.