EMD 方法对祁连山云杉宽度生长量的 订正及多尺度分析^{*}

田沁花 张永 深陈 成 荡 范泽鑫 ④

 (①中国气象局,国家气候中心,北京 100081;②中国科学院地理科学与资源研究所,中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;③清华大学地球系统科学研究中心,北京 100084;④中国科学院西双版纳热带植物园,勐腊 650223)

摘要 经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD)是一种遵循时间序列本身所包含的不同尺度信 号特征进行逐级分解,实现时间序列多分辨率分析的有效方法。本文基于 EMD 方法对采集于祁连山中部的青海 云杉树轮宽度序列进行生长量订正,并与传统采用的线性或负指数函数及样条函数拟合法进行多序列订正结果 的逐一对比,结合云杉年轮生长的生理特征,分析了 EMD 方法在云杉宽度生长量订正中的应用潜力。结果表明, 通过 EMD 分解得到的趋势项不仅可以较好地反映树木年轮与年龄相关的生长趋势,还可以克服线性拟合在树木 生长受到小生境干扰时因为斜率的适应性变化及方向单一导致的拟合失效及生长量被高估(或被低估)的现象, 常用的替代选择样条函数步长的选取又具有一定的经验性和主观性,EMD 方法作为一个新的补充,可为线性函 数和样条函数不能满足需求时,提供一个新的选择。进一步考察了 EMD 方法和传统方法获取的两个树轮标准化 年表(1845~2000年, EPS>0.85) 与气候因子在器测记录时段(1957~2000年) 的相关关系, 结果显示两者与气象 因子的相关结果极为一致,与肃南气象站前年8月至当年7月降水总量呈显著的正相关(r均通过了99%的信度 检验),表明通过 EMD 方法对祁连山青海云杉生长量订正后得到的树轮宽度年表与传统方法得到的树轮年表反 映了一致的气候信息,可用于历史气候变化分析。进一步利用 EMD 方法将树轮年表序列分解为不同频谱时段 (年际、年代际及多年代际尺度)的子序列,其中年际的高频子序列(<10年尺度)的主要波动发生在 20世纪 10~ 20年代,而10~30年尺度子序列的低值期(1925~1933年)与甘肃境内文献记录的大范围干旱事件极为吻合, 30~60年尺度的多年代际变化显示出3次主要的干湿位相交替变化。

主题词 祁连山 树木年轮 经验模态分解 宽度序列订正 中图分类号 P467, P534.63*2 文献标识码 A

1 引言

高分辨率的树轮气候代用资料以其对气候变化 响应敏感、精度高、连续性强、分布广泛及样本易 得等优势,在古气候研究中正被广泛采用^[1-8]。树 轮宽度的年际间变化不仅可以重建环境变化的历 史^[9],还可以反映气候变化对生态系统的影响。但 年轮宽度与气候因子之间有着复杂的关系,这种关 系受气候因子间的相互制衡和因物种而异的树木生 长节律的共同影响。在利用树木年轮开展历史时期 气候变化的研究中,剔除树木年轮与年龄相关的生 长趋势是准确获取气候信号的先决条件,又被称为 年轮宽度序列标准化^[10,11],其中以线性或负指数函 数和样条函数法应用最为广泛,当前我国的树轮气候学者多采用这些传统的方法^[12-25]。

然而,随着树轮气候学研究的需求和发展,已 有的方法不断受到质疑和挑战。譬如负指数和样条 函数的结合弥补了单一线性函数对生长趋势拟合的 偏离,但样条函数步长的选取较依赖于研究者的经 验,存在一定的随机性和主观性,同时会剔除较多 的低频气候信息。Melvin和Briffa^[26]建立了"signalfree"方法用于解决 10 年至百年尺度的异常变化对 传统的树木生长拟合曲线的影响,但也同样存在低 频变化的缺失以及使用不同拟合方法导致的不确定 性问题^[27];徐岩和邵雪梅^[28]提出总体生长趋势曲 线拟合法,运用树木径向生长模型及大样本量树木

第一作者简介:田沁花 女 35岁 副研究员 古气候重建与气候变化检测归因研究 E-mail:tianqh@ieecas.cn

通讯作者:张 永 E-mail: zhangyong@igsnrr.ac.cn

^{*} 国家自然科学基金面上项目(批准号:41471087 和 41175066)和科技部公益性行业(气象)科研专项项目(批准号:GYHY201406020)共同资助 2015-04-12 收稿, 2015-06-23 收修改稿

生长总体趋势的估计估算区域的总体生长曲线,仍 然要求能够在同一气候区域获得同一树种且足够多 的包含髓心的样本的情况下才可使用; Briffa 等^[29,30]和 Esper 等^[31]开展了关于树轮低频信息提 取方面的研究,提出了区域曲线标准化(Regional Curve Standardization, 简称 RCS) 方法, 较好的保留 了气候低频信息,在 Mann 等^[32]利用树轮重建的北 半球过去近千年来的温度距平序列的工作中得到了 应用和检验,保留了百年以上尺度的气温变化信 息,中世纪暖期的争议得到了解释。但 Yang 等[33~36]通过对都兰地区长达 2000 年的祁连圆柏树 轮数据的分析进一步指出了 RCS 方法应用中的缺 陷,认为即使同一地区的同一树种在同一生命周期 生长速率仍然有较大差异, 传统的 RCS 方法会高估 (或低估)与年龄相关的生长速率,源于对 RCS 方 法改进的思路提出了特征值分析,对选定的祁连圆 柏的特征向量进行归类,分析该树种与年龄相关的 生长速率的共性及差异,尝试建立一套可以区分年 龄相关的信号及气候相关的信号的方法;并在此研 究的基础上,结合 Signal-Free Regional Curve Standardization (SF-RCS)方法,去除生长趋势,重 建了青藏高原东北部过去 3500 年的降水变化[7]。

随着树种和环境的不同, 越来越多的研究者普 遍认为确定出每一棵树木的生理年龄及准确的生长 量订正非常困难, 靠一种方法或一种模式解决所有 树种、各种生态环境中树木生长量订正的问题不太 可能。经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD) 是 1998 年 Huang 等^[37] 提出的一种有效处 理时间序列信号的新方法,能够比较有效地对信号 进行多分辨率分析;从本质上讲是将一个信号进行 平稳化处理,按照自然变化把不同特征尺度(频率) 或层次的波动或趋势逐级从原信号中分解出来,得 到一系列具有不同特征尺度的本征模函数(Intrinsic Mode Function, 简称 IMF)分量, 研究者可根据序列 的自然特征,分析不同特征尺度序列表征的物理意 义。该方法被认为是近年来线性和稳态谱分析的一 个重大突破。目前 EMD 方法已成功应用于信号处 理、图像处理、湍流、地震及大气科学等非线性科学 领域^[38~41]。在树轮学研究中, Fang 等^[42]利用 EMD 对所有树轮序列进行分解,分析可靠的高频和低频 信号分别重建了高频和低频年表。本文进一步运用 EMD 方法对选用的祁连山青海云杉样芯宽度序列进 行逐一分解,分析所得各序列的趋势项对该树种年 龄相关的生长趋势的代表性,通过与传统去趋势方 法的比较,综合分析该方法在去趋势中的适用性和 可能存在的问题,尝试建立一套可参考的树轮宽度 资料生长量订正的方法,供读者多一个新的选择。

2 资料与方法

2.1 研究区概况及数据处理

祁连山位于我国西北干旱区、东部湿润区和青 藏高原区的过渡地带,受大陆性气候和高原气候的 综合影响,属温带半干旱区。作为重要的地理气候 分界线,在我国自然地理上占有非常重要的地位。 本研究所用青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)树轮资 料采自甘肃肃南县青龙乡孔岗木(Kgm)林场,位于 祁连山中部地区,标号为 Kgm03 和 Kgm04。采样 时多选择土壤贫瘠、岩石裸露,生长条件相对较差 的小生境。为保证复本量,一般要求一个点能采集 到15 株以上,树上取两根样芯,以便于更准确的进 行实验室交叉定年工作,表1为具体的采样信息 表。因 Kgm04 样点样芯株数低于15,又与 Kgm03 样点较为接近,故后期分析中将两个样点合并为一 个样点。

表 1 孔岗木样点基本信息 Table 1 Information of Kgm sampling site

样点	纬度 /N	经度 /E	海拔 /m	样本量 (芯/树)	序列长度 /年	树种
Kgm03	38°42′	99°42′	2770	39/19	1723 ~ 2000	云杉
Kgm04	38°40′	99°52′	2620	19/11	1812~2000	云杉

所有样本在实验室晾干、固定、打磨等预处理 之后,进行交叉定年。以 0.01mm 精度的轮宽测量 仪进行轮宽量测,之后用 COFECHA 程序进行检验 和校准,以保证所有样本定年和量测的准确无误。

2.2 青海云杉生长量订正

上述方法得到的逐年树木生长量受生物遗传特 性影响遵循一定的规律,已有研究表明^[43,44],单株 云杉林木初期生长缓慢,20年后生长迅速增加,径 向生长的峰值一般在50年左右,当到达树木生长 最旺盛的时期时,平均的年轮宽度常为整个生长期 内的极大值,后逐步减小并呈规律性下降趋势,最 后达到一个相对稳定的水平。但气候环境提供并限 制了树木生长的大背景及长尺度上的轮宽交替变 化;且随着立地微环境及郁闭度的变化,在同一生 命周期年龄相关的生长速率可能存在较大的分 异^[45],与年龄相关的生长趋势也会呈现多种变化 形式及微差异。

下文将采用经验模态分解(EMD)对每个云杉样 芯的宽度测量序列进行分解及趋势项分析。EMD 分 解过程如下:利用波动上、下包络的平均值去确定 "瞬时平衡位置",进而分解得到 IMF 分量,每次提 取都将高频信号分离,剩下较低频信号,最后得到趋 势分量或者定常值,最终把原序列分解成有限个 IMF 分量, 第一个 IMF 分量代表原序列中最高频的 成分。将原始序列减去第1个 IMF 分量依次进行上 述平稳化过程就可以得到第二个 IMF 分量, 直到不 能分解为止,最后一个分量代表原序列的均值或趋 势,不同层次的 IMF 分量都可能对应某一物理背景, 而原始序列就可以由这些 IMF 分量均值之和表示。

研究中首先利用 EMD 运算程序对祁连山孔岗 木(Kgm03 和 Kgm04)两个云杉样点 58 个样芯(见 表1)的宽度测量序列进行逐一分析。其中本研究 中最长的样芯 Kgm0317a(1723~2000年)和 Kgm0317c(1790~2000年)分解所得分量见下图 (图1和2),由图1和2可以看出,EMD分解将两 个样芯序列由高频至低频分别分解得到了6个本征 模态分量,每个 IMF 分量对应于一个窄波段信号, 各分量分别与树木生长的限制性因子(生物效应、 气候效应和微环境)相联系,反映了树轮序列记录 的不同时间尺度信号的自然波动。其中 IMF1 分量 总是代表序列最高频的变化成分(树龄为200年左 右的云杉径向生长的年际变化),与年际的气候变 化信号较为接近,可能主要反映了树木生长与气候 相关的年际变化特征,是树轮气候研究中最可靠的 信号; IMF 2 至 IMF5 依次显示了两个样芯年代际 尺度至多年代际尺度的周期性振荡及振幅随时间的 变化过程;每个 IMF 分量的变化规律符合自然信号 的非线性变化特点,波动具有相对稳定的准周期, 但各尺度信号对原始数据总体特征的影响程度有很 大差异,各分量振幅的平方可反映该分量在原始数 据中的信号强度和能量大小,与原序列的相关系数 反映各分量对原序列变化特征的影响程度;而 IMF6 为两个样芯的最低频趋势项(图 1f和图 2f蓝 线),表示的是信号中存在的线性项或缓慢变化的 周期大于信号资料长度的成分,与传统理论研究中 认为的年龄相关的生长速率变化曲线较为接近,是 否主要反映了树木生长的生物效应,下文将通过与 传统拟合趋势线进行对比,分析 EMD 趋势项在祁 连山青海云杉宽度序列生长量订正中的适用性:以 上各分量之和可还原为原始变量序列(图 1g, 1h 和 图 2g, 2h 黑线)。

由 IMF6(图 1f蓝线)可以看出,本研究中主要 分析的趋势项变化特征如下:1723~1760年生长速 率较低(一般云杉前 20 年生长缓慢), 1760~1800 年缓慢增加(原则上该阶段呈指数式增长,但基于 取样方向、郁闭度等微环境影响下呈现出的生长速 率变化表现了一定的独特性),1800~1890年逐渐 加快并达到生长的峰值,1900年后增长速率减缓, 1900~2000 年缓慢减速至平稳状态(慢-快-慢,渐 趋于平稳),该曲线基本与树木自幼龄期开始的生 长波动较为接近,在幼龄期的低生长大多认为可能 和周围大树遮挡有一定关系, 1800~1890年可能存 在一次采伐后的生长释放^[45],后期的生长则与树 木的生物学遗传效应较为吻合。一般的线性函数拟 合的生长趋势曲线(图 1g红线)在整个生长过程中 呈持续上升趋势,可能对树木幼龄期生长速率微小 变化信息的拟合有一定偏差,通常通过变换样条函 数进行补充以达到更好的效果;进一步对比了样条 函数的拟合曲线(图 1h绿线),步长选取序列长度 的 2/3,结果显示,样条函数的拟合曲线与 EMD 分 解的趋势项较为接近。但样条函数的步长常常依赖 于研究者的经验和对研究样芯的情况分析而定,具 有一定的主观性, 拟合结果随研究者选取步长的改 变得到的曲线差异较大,因此,结果有一定的不确 定性。

采自同一株树的两个样芯往往钻取方向不同, 获得的长度不同,其包含的年轮数量也不同,图2所 示的 Kgm0317c 样芯展示了与 Kgm0317a 不同的情 况。该序列起始年为1790年,而图1所示的 Kgm0317a 起始年为1723年,表明反方向获取的样本 远未达到髓心,即树木幼龄期的生长轮在采样中由 于采集困难而缺失,因此,该序列的趋势项不能完全 显示树木自幼龄期的生物趋势,参照图 1, Kgm0317a 的趋势项自1790年开始由缓慢生长转为生长增速, 1900年后生长速率减缓且渐趋于平稳。与图1不同 的是,获得的 Kgm0317c 样芯可能丢失了幼龄期的低 生长阶段年轮,其趋势项的变化过程基本分为3个 阶段, 第一阶段 1790~1900, 生长速率缓慢增加, 与 Kgm0317a 的同阶段生长速率变化特征较为一致; 第 二阶段 1900~1950 趋于平稳, 第三阶段 1950 年之后 趋于水平;同时对该样芯进行了线性函数和样条函 数拟合,所得到的线性拟合趋势线(图 2g红线)整个 时段接近于水平,与 EMD 得到的趋势线在第一阶段 (1790~1900年)呈现出一定差异;而样条函数拟合









趋势线(图 2h绿线)仍然选取 2/3 步长,得到的拟合 线在第一阶段与 EMD 趋势线大致接近,而在后两个 阶段与前两者均有不同,与 EMD 趋势线的主要差别 表现在第三阶段(1950~2000 年),样条曲线呈现为 上升趋势,与实际需要拟合的树木随年龄变化的生 长效应理论相悖,可能会产生虚假的过度拟合,导致 原本树轮资料记录的上升的气候信号丢失。结合与 Kgm0317a 得到的一些共性,综合分析 3 种拟合方法 得到的生长曲线,我们初步认为 EMD 的趋势项对 Kgm0317c 的年龄相关的生长趋势的表达可能更接近 于真实情况。

基于上文的结果,我们进一步利用 EMD 方法 对本研究中 Kgm03 和 Kgm04 样点的所有样芯(见 表1)宽度序列进行了逐一分析,得到了各序列的 时间变化分量和最低频趋势项,初步检验该方法对 青海云杉树轮宽度资料年龄相关的生长趋势提取的 代表性、适用性和可能限制因素。通过对所有样芯 的对比归类,可以发现两种方法对绝大部分样芯的 去趋势维持了相似的结果,但对个别样芯在一些时 段的差异也值得重视。我们挑选出传统拟合曲线和 EMD 趋势线及相应得到的树轮生长量订正后的指 数序列有较大差异的4种情况进行了较为详细的讨 论(图3),分析其可能的原因和两种方法的利弊, 主要如下:1)生长效应低估(髓心端放大效应):样 芯 Kgm0316b(图 3a黑线)序列接近髓心部分生长速 率较低(幼龄期可能受到环境抑制),这类样芯在生 长条件完全满足的阶段常出现突然的生长释放,这 种快速的转折在线性拟合时因为函数的斜率较大, 对髓心端的生长效应低估而导致指数序列在髓心端 异常放大,产生奇异值(图 3c红线); EMD 因为自 适应的特性,在这种情况有一定优势,得到的序列 在总体方差上更加平稳。2)生长效应高估(树皮端 过度拟合): Kgm0317a 为采到的最长样芯, 1723~ 2000年树木由幼龄期至成熟期经历了先加速至顶 峰,之后下降渐趋平稳,EMD 分解的趋势线基本反 映了上述变化(图 3b 蓝线); 而传统线性拟合得到 的趋势线(图 3b红线)表现为从拟合期开始向一个 方向持续变快或变慢的特点,对该序列的拟合在 1775~1810年、1850~1900年和1975~2000年3个 时段均与 EMD 趋势线呈现出一定差异。传统方法 得到的指数值(图 3d红线)在 1850~1900 年时段略 高于 EMD 方法得到的指数值(图 3d 蓝线),而 1775~1810 年和 1975~2000 年时段低于 EMD 得到 的指数值,初步分析认为第三时段 1975~2000 年 (树皮端)基本为树木年龄相关的生长速率进入衰 减阶段,较少可能仍呈现为持续上升的状态,因此 EMD 方法实现的生长量订正可能更可靠,更接近 于真实情况(图 3d 蓝线),线性拟合得到的指数序 列引起的树皮端的降低可能是生长效应被高估的一 个表现(图 3d红线)。早期和中期两个时段的差异 所反映的两种方法对生长量订正的优劣, 需要与更 多长序列样芯对比才能客观评价。3)线性或负指 数拟合失效:树木生长受到严重抑制时线性拟合可 能完全失效, 拟合函数系数出现负值, 被迫选用非 线性拟合(图 3e红线),非线性拟合至目前为止采 用较少;作为对传统线性拟合方法的补充,EMD 也 是一个新的选择(图 3e 蓝线)。两种方法得到的指 数值主要在 1910~1925 年时段有一定差异, 非线性 拟合的指数值此时段为整个序列的峰值区,高于 EMD 得到的指数值,其他时段基本一致。而 1910~1925年时段的峰值很难找到相对应的该时段 树木生长受气候影响快速生长的研究结论,因此, 分析认为可能因为非线性曲线对树龄决定的生长速 率的急剧变化偏离产生了虚假高值。4)线性拟合方 向单一:线性拟合由于从拟合期开始主要向一个方 向持续变快或变慢的特点,如对 Kgm0411a(图 3f黑 线)的拟合呈持续下降(图 3f红线), 受斜率影响导致 末端上翘,出现虚假极大值(图 3h红线); EMD 趋势 项末端趋于平缓(图3f蓝线),得到的树轮指数 (图 3h 蓝线)避免了最后 5~10 年的异常上升。

3 结果与讨论

3.1 祁连山云杉 EMD 年表的建立

将祁连山孔岗木 Kgm03 和 Kgm04 两样点树轮 资料合并(58 芯),从 58 芯中剔除部分较短样本, 选用质量较好的 44 根样芯宽度序列,参照常规的 树轮曲线标准化订正思路(原始曲线除以趋势项) 用 EMD 方法计算了树轮宽度年表(图 4a),最终年 表序列长度为 1723~2000 年,并与传统方法计算的 树轮宽度年表(图 4b)进行了对比和偏差分析 (图 4c)。图 4中竖直红线表示样本信号强度 EPS 大于 0.85 时对应的年份为 1845 年。年表在 EPS<0.85部分由于样本量较少,故仅用作参考,最 后确定可靠年表为 1845~2000 年。

由 EMD 方法(图 4a)和传统方法(图 4b)对比 结果可以看出,用不同方法得到的序列在低频和高 频变化上大部分时段表现出了较好的一致性。两条 序列一致的低值期主要有 1850~1880 年和 1925~ 1940 年;一致的高值期主要有 1825~1850 年、 1880~1925 年和 1940~1960 年。两种方法对幼龄 期树木生长趋势的拟合常有一定差别,因此得到的 年表在早期表现了一定的差异,1723~1750 年传统 方法得到的年表值略高于 EMD 方法得到的年表值, 但该时段仅有一芯,代表性较差;而 1750~1845 年 间传统年表值低于 EMD 年表值,传统年表在该时 段呈现出较大的方差,但因该时段 EPS<0.85,样 芯数仍较少,传统年表所指示的低值是否反映了真



Fig. 3 Comparison of fitting growth trends between EMD and traditional methods. The original ring-width measurement series (black of a, b, e, and f); the growth trends fitted by traditional (red of a, b, e, and f); the growth trends fitted by EMD(blue of a, b, e, and f). The de-trended ring-width index series based on the traditional method (red of c, d, g, and h) and the de-trended ring-width index series based on the EMD method (blue of c, d, g, and h)





(a) EMD 方法得到的序列(the series developed using EMD method);
(b) 传统方法得到的序列(the series developed using traditional method);
(c)两条序列之差(the difference between two series, a-b)
Fig. 4 Ring-width indices derived by two methods. The thin line represents annual values and the smooth line represents the 5-year running means

实的气候信息,而非生长趋势拟合效果引起的虚假 信息尚具有一定的不确定性,该差异所反映的两种 方法的优劣也有待进一步研究确定。 图 4c 更直观的显示了两条序列的绝对差值, 仅 1750~1840 年差异较大,1850~1960 年两者的差 值序列接近零值,说明该时段两种方法对树轮生长 量的订正极为相似;而在树皮端(1960~2000 年)两 者的差值略微升高,说明两者对树皮端的拟合略有 不同。综上所述,两种方法对生长量的订正差异主 要体现在前后两端,因此,应用中可重点分析拟合 线对前后两端生长效应的拟合效果而决定最后需用 的去趋势方法。

3.2 年表与气象资料的相关分析

为了进一步显示 EMD 方法建立年表的可靠性, 我们进一步分别计算了 EMD 方法建立年表和传统 方法建立年表与样点最近点甘肃肃南气象站 (38°50′N,99°37′E;海拔 2311m;1957~2000年) 器测记录的月平均气温、月降水量之间的相关系数 (r),结果见表 2 和表 3(表中黑体表示 r 通过了 99% 信度检验)。

表 2 和表 3 表明,两种方式建立的年表与最近 点气象站气温和降水的相关时段及相关系数极为一

表 2 EMD 年表及传统年表与肃南气象站月均温的相关结果对比

Table 2 Correlation comparison of monthly mean temperature of Sunan Meteorological Station with EMD index and traditional index

年表	7 月	8月	9月	10 月	11 月	12 月	1月	2 月	3 月	4 月	5 月	6月	7 月
EMD	-0.45	-0.417	-0.156	-0.021	-0.138	0.17	0.054	-0.09	-0.126	0.1	-0.066	-0.523	-0.242
传统	-0.46	-0.437	-0.225	-0.042	-0.184	0.067	0.028	-0.153	-0.09	0.1	-0.119	-0.543	-0.235

表 3 EMD 年表及传统年表与肃南气象站月降水的相关结果对比

Table 3 Correlation comparison of monthly precipitation of Sunan Meteorological Station with EMD index and traditional index

年表	8月	9月	10 月	11 月	12 月	1月	2 月	3 月	4 月	5 月	6月	7 月	PQ87
EMD	0.40	0.329	-0.314	-0.133	-0.032	0.44	0.008	-0.045	0.311	0.376	0.528	0.036	0.664
传统	0.409	0.324	-0.302	-0.112	-0.043	0.47	0.056	-0.031	0.339	0.43	0.502	-0.013	0.662

致,均与前年7月、8月和当年6月气温显著负相 关; 与前年 8~9 月降水量呈显著正相关, 随着气温 变化, 10~12月树木基本停止生长, 过量的降水将 不再与年轮序列呈明显正相关变化,相关系数由正 转负;当年1月的降水可能将以冰雪的形式存储于 地表及土壤层,4月初随着气温达到较为适宜的状 态,树木年轮快速增长,年轮指数与当年4~6月降 水量呈较为连续的正相关。与前年8月至当年7月 整年的降水量相关系数显著提高,通过了 99% 的信 度检验。两个指数序列与气候因子的相关结果完全 一致,说明两种方法得到的树轮指数在高频变化上 的高度一致性,这与实际情况比较吻合,表明 EMD 方法适用于树轮宽度序列的生长量订正,可以较好 的去除生长趋势,尤其是对于传统线性函数在特殊 样芯前后几十年拟合效果较差时, EMD 方法提供 了一个较好的补充。

综上两个年表与肃南气象站气温和降水的分析 结果表明,降水是该区云杉生长的主要气候限制性 因子,云杉宽度指数序列主要反映了区域降水量的 历史变化信息。下文进一步利用 EMD 对各样芯分解 所得的不同尺度的 IMF 原始分量的聚类集合序列分 析各分量所反映的对应尺度的区域降水变化特征。

3.3 祁连山云杉序列多尺度频谱分析

选用功率谱对 EMD 方法和传统去趋势方法建 立的两种指数年表的周期变化进行对比分析,结果 如下图 5 所示,两条序列的频谱分布特征较为一 致,其中高频 2~3 年的变化周期,可能主要受 QBO (准 2 年震荡)以及 QTO(准 3 年震荡)影响所致, 即受赤道地区平流层的 26~30 个月为周期的东向 风和西向风之间的不断转换形成的准 2 年及准 3 年 震荡^[46,47]; 5~8 年的周期可能主要与 ENSO 海气耦 合周期相联系^[48];另外还有 33 年左右的共同周期。不同之处是,EMD 方法获取的年表显示了通过信度检验的 16 年周期,该信号与太阳活动的 11 年准周期^[49]较为接近,可能主要反映了太阳活动对该区域年降水量的影响。



图 5 EMD 方法(黑线)和传统方法(灰色线)计算出的 树轮指数序列的功率谱对比

Fig. 5 The spectral analysis of EMD index (black line) and Traditional index(gray line)

将 EMD 方法对从两个样点中选出的质量较好的 44 根样芯分解所得的所有 IMF 分量分别进行功率谱分析,并按小于 10 年,10~30 年,30~60 年及大于 60 年尺度分别进行分类集合运算(即高频 IMF 分量平均,低频 IMF 分量平均),获取高频至低频不同尺度的原始测量序列的 IMF 分量的分频集合序列,考虑到可靠序列长度仅为 150 年左右,故大于 60 年尺度的集合序列未做讨论(周期重复较少),图 6a,6b 和 6c 分别展示了 44 根样芯前 3 个尺度范围上原始 IMF 分量的集成序列。

图 6a 为小于 10 年的年代际变化集合序列,这 是树轮气候研究中被认为最为可靠的信息,将去掉 了低频趋势的该序列与肃南气象站的降水进行了进 一步的相关分析,结果如表4(黑体表示相关系数 通过了99%信度检验)。提取的高频集合序列与降 水量的相关时段与上文两个指数年表与气候因子的 相关时段完全一致,但相关系数显著提高,尤其是 与前年8月至当年7月,相关系数提高到0.734。 而高频上两序列的相关更能客观的反映树轮序列与 气候因子相关意义的真实性,避免了因低频趋势相 关的假性相关。也为进一步深入研究树木年轮与气 候在不同尺度的相关关系提供了一个思路。



图 6 EMD 分解得到的各尺度分量集合序列 Fig. 6 The integrated components of ring-width series in different time-scales

集合序列 1 如图 6a, 较好的显示了 1845~2000 年间降水的高频变化特征:最大的波动主要发生在 20 世纪 10~20 年代(1907~1920 年),不仅振幅超过 5 个 θ(标准差 θ=0.161)且变率较快,是百年内一次 较大的气候波动; 1980~2000 年振幅显著减小。

EMD 指数年表的功率谱显示 16 年的周期通过 了信度检验,而传统方法建立的指数年表由于低频 信息保留较少,16 年的周期未达到信度检验水平 (见图 5)。集合序列 2 为所有样本 10~30 年的年 代际尺度变化分量(图 6b),该序列与 EMD 树轮宽 度年表 16 年左右通过信度检验的主周期较为接近。 1925~1933 年的树木低生长与甘肃境内较大范围的 干旱背景紧密相关,与文献记录的该时期的极端干 旱事件极为吻合^[3~5]。

30~60 年尺度的多年代际集合序列 3 如图 6c, 1845~1880 年期间振幅变化较小,随后振幅快速变 化,高低生长期交替出现:高值期有 1880~1924 年、1937~1957 年和 1974~1993 年;低值期有 1924~1937 年和 1957~1974 年及 20 世纪末。

4 结论

本文基于 EMD 方法对青海云杉树轮宽度生长 量的订正研究,分析了 EMD 方法在分离树木生长 趋势及多尺度气候信息提取中的可行性及相对优 势。初步分析表明,EMD 分解得到的趋势项可以 较好的反映祁连山青海云杉与年龄相关的生长趋 势,适用于云杉生长量的订正,可以获取能较好反 映研究区气候变化的可靠树轮年表。但该方法仍然 过分依赖数学计算,缺乏更多生物学的耦合分析, 且对不同树种及较长树龄的树轮样芯生长量订正的 效果仍有待探讨,相对于传统方法仍然得不到绝对 的优势和提高,有待进一步的研究。但是本研究旨 在提供一种可选择的新的去趋势思路,为读者在研 究中提供可靠的选择依据。初步得出以下结果:

(1)基于 EMD 方法的生长量订正与传统方法 的差异大致可归为4种情况:EMD 方法对于传统线 性或负指数函数可能引起的样芯髓心端放大效应在 一定程度上有所减缓;长树龄样芯树皮端生理效应 减弱,而线性函数由于斜率的持续性会导致末端生 长效应被高估(或被低估)年表值偏低(或偏高), EMD 方法在这方面有一定改善;传统线性及负指 数函数拟合失效时,本文介绍的 EMD 方法的生长 量订正可作为一个较为适用的补充选项;同时 EMD 方法还可以较好的避免传统函数因方向单一 导致的生长效应高估或低估出现奇异值。

(2)器测记录期内 EMD 方法和传统去趋势得到 的两个序列与气候因子的相关分析表明,两者对气 候因子的响应结果极为一致,表明 EMD 方法可以得 到能反映气候信息的可靠年表; EMD 分解得到的所 有原始序列年代际尺度的高频集合分量与气候因子 的相关系数显著提高,对分析树轮序列和气候因子

表 4 高频集合序列 1 和肃南气象站月降水及月气温的相关结果

Table 4 Correlation coefficients of the first integrated component with monthly precipitation

and monthly mean temperature of Sunan Meteorological Station

				2		1							
年表	8月	9月	10 月	11 月	12 月	1月	2 月	3 月	4 月	5 月	6月	7 月	PQ87
降水	0.417	0.294	-0.215	-0.12	-0.011	0.341	0.056	0.256	0.355	0.441	0.395	0.181	0.734
气温	-0.46	-0.118	-0.21	-0.215	0.176	-0.074	0.047	0.055	0.18	-0.078	-0.411	-0.169	-0.253

之间不同尺度的响应关系提供了一个新思路。

(3) EMD 年表的主周期对应的原始序列的 3 个 集合分量分别显示了 1845~2000 年间区域降水的 不同尺度变化特征。小于 10 年尺度的降水高频序 列波动期主要发生在 20 世纪 10~20 年代; 10~30 年尺度上 1925~1933 年的显著低值期与甘肃境内 较大范围的干旱紧密相关,与高频序列一致的显示 出 20 世纪末降水振幅趋于平稳的特征; 30~60 年 尺度的多年代际集合分量较好的显示了 1845~2000 年间对应的 3 次干湿交替变化特征。

参考文献 (References)

- Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M et al. Asian monsoon failure and mega-drought during the last millennium. Science, 2010, 328(5977): 486~489
- 2 Jones P D, Briffa K R, Osborn T J et al. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects. The Holocene, 2009, 19(1): 3~49
- 3 Liu Xiaohong, Qin Dahe, Shao Xuemei et al. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium. Science in China (Series D), 2005, 48 (4): 521~529
- 4 Zhang Y, Tian Q H, Gou X H et al. Annual precipitation reconstruction since A.D. 775 based on tree rings from the Qilian Mountains, Northwestern China. International Journal of Climatology, 2010, 31(3): 371~381
- 5 Tian Q H, Gou X H, Zhang Y et al. May-June Temperature reconstruction over the past 300 years based on tree rings on the Qilian Mountains of northeastern Tibetan. *IAWA Journal*, 2009, **30** (4): 421~434
- 6 Tian Qinhua, Zhou Xiuji, Gou Xiaohua et al. Analysis of reconstructed annual precipitation from tree-rings for the past 500 years in the middle Qilian Mountain. Science China: Earth Sciences, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4375-6
- 7 Yang B, Qin C, Wang J L et al. A3, 500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(8): 2903~2908
- 8 Yang B, Qin C, Huang K et al. Spatial and temporal patterns of variations in tree growth over the northeastern Tibetan Plateau during the period AD 1450 ~ 2001. The Holocene, 2010, 20 (8): 1235~1245
- 9 Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976. 246~311
- 10 Cook E R, Briffa K R, Shiyatov S et al. Tree-ring standardization and growth-trend estimation. In: Cook E R, Kairiukstis L A eds. Methods of Dendrochronology. Dordrecht/Boston /London: Kluwer Academic Publishers, 1990. 104~123
- 11 Cook E R. A time series analysis approach to tree-ring standardization. Tucson: The Dissertation for the Doctoral Degree of University of Arizona, 1985. 1~171
- 12 Liu Y, Linderholm H W, Song Huiming et al. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree tings from the southern and

northern slopes of the central Qinling Mountains, Central China. Boreas, 2008, doi: 10.1111/j.1502-3885.2008.00065.x

- 13 刘 禹, 蔡秋芳, 宋慧明. 关于青藏高原 2485 年温度的季节和 空间代表性问题. 第四纪研究, 2013, 33(1): 108~114 Liu Yu, Cai Qiufang, Song Huiming. Seasonal and spatial representativeness in the northern Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(1): 108~114
- Shao X M, Xu Y, Yin Z Y et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Quaternary Science Reviews, 2010, 29 (17~18): 2111~2122
- 15 邵雪梅,王树芝,徐 岩等.柴达木盆地东北部 3500 年树轮定 年年表的初步建立.第四纪研究,2007,27(4):477~485 Shao Xuemei, Wang Shuzhi, Xu Yan et al. A 3500-year master tree-ring dating chronology from the northeastern part of the Qaidam Basin. Quaternary Sciences, 2007, 27(4):477~485
- 16 Gou Xiaohua, Deng Yang, Chen Fahu et al. Tree ring based streamflow reconstruction for the upper Yellow River over the past 1234 years. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(36): 4179~4186
- Fan Zexin, Bräuning Achim, Tian Qinhua et al. Tree ring recorded May-August temperature variations since A.D. 1585 in the Gaoligong Mountains, southeastern Tibetan Plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 296(1~2): 94~102
- 18 刘昶智,勾晓华,方克艳等.甘肃南部公元 1824 年以来降水重 建. 第四纪研究, 2013, 33(3): 518~525 Liu Changzhi Gou Xiaohua, Fang Keyan *et al.* Precipitation reconstruction in southern Gansu Province since A. D. 1824. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(3): 518~525
- 19 蔡秋芳,刘 禹.山西五鹿山油松树轮宽度年表的建立及过去 百余年 5~6 月平均气温变化.第四纪研究,2013,33(3): 511~517

Cai Qiufang, Liu Yu. The development of a tree-ring width chronology and the May~June mean temperature variability in Wulu Mountain, Shanxi Province of north-Central China. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(3): 511~517

20 李宗善,刘国华,傅伯杰等.利用树木年轮宽度资料重建川西 米亚罗地区过去 200 年夏季温度的变化.第四纪研究, 2011, 31(3): 522~534

Li Zongshan, Liu Guohua, Fu Bojie *et al.* Tree-ring based summer temperature reconstruction over the past 200 years in Miyaluo of western Sichuan, China. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(3): 522~534

21 陈 峰,袁玉江,魏文寿等. 福建沙县马尾松树轮宽度与夏季 亚洲-太平洋涛动指数的关系. 第四纪研究, 2011, 31(1): 96~103
Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou *et al.* Correlations

between the summer Asia Pacific Oscillation Index and the tree-ring width of *Pinus massiniana* from Sha County, Fujian Province. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(1): 96~103

- 22 Liang E Y, Liu X, Yuan Y et al. The 1920s drought recorded by tree rings and historical documents in the semi-arid and arid areas of Northern China. Climatic Change, 2006, doi: 10.1007/s10584-006-9082-x
- 23 Zhang Q B, Guo D C, Tan D Y et al. A 2, 326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Geophysical Research Letters, 2003, 30(14): 1739~1742
- 24 时兴合,秦宁生,刘洪滨等.青海治多公元1374年以来树轮记

录的青藏高原地面加热场强度变化. 第四纪研究, 2013, 33 (1): 115~125

Shi Xinhe, Qin Ningsheng, Liu Hongbin *et al.* Surface heating field intensity change over Tibetan Plateau recorded Qinghai Zhiduo tree rings since 1374A.D. *Quaternary Sciences*, 2013, **33** (1): 115~125

25 任军莉,刘 禹,宋慧明等.甘肃临夏地区过去195年最高温度历史重建——基于紫果云杉树轮宽度资料.第四纪研究, 2014,34(6):1270~1279

Ren Junli, Liu Yu, Song Huiming *et al.* The historical reconstruction of the maximum temperature over the past 195 years, Linxia region, Gansu Province—Based on the data from *Picea purpurea* Mast. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1270~1279

- 26 Melvin T M, Briffa K R. A "Signal-Free" approach to Dendroclimatic Standardisation. Dendrochronologia. 2008, 26: 71~ 86, doi: 10.1016/j. dendro. 2007. 12.001
- 27 Fang K, Wilmking M, Davi N et al. An ensemble weighting approach for dendroclimatology: Drought reconstructions for the northeastern Tibetan Plateau PloS One, 2014, 9(1): e86689, doi: 10.1371/journal. pone. 0086689
- 28 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.地理学报,2006,61(9):919~928 Xu Yan, Shao Xuemei. Standardization of Qilian Juniper ring-width series in the eastern margin of the Qaidam Basin. Acta Geographica Sinica, 2006,61(9):919~928
- 29 Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H. Tree-ring density reconstructions of summer temperature patterns across western North America since 1600. Journal of Climate, 1992, 5(7): 735~754
- 30 Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H et al. Tree-ring Variables as Proxy-climate Indicators: Problems with Low Frequency Signals. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 9~41
- 31 Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 2002, 295(5563): 2250~2253
- 32 Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. North hemisphere temperature during the last millennium: Inferences, uncertainties and limitations. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26 (6): 759~762
- 33 Yang B, Sonechkin D M, Datsenko N M et al. Eigen analysis of tree-ring records: Part 1, A limited representativeness of regional curve. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 106 (3 ~ 4): 489~497
- 34 Yang B, Sonechkin D M, Datsenko N M et al. Eigen analysis of tree-ring records: Part 3, Taking heteroscedasticity and sampling effects into consideration. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 107(3~4): 519~530
- 35 Yang B, Sonechkin D M, Datsenko N M et al. Eigen analysis of tree-ring records: Part 2, Posing the eigen problem. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 107(1~2): 131~141
- 36 刘晶晶,杨 保. 西藏浪卡子地区树轮宽度特征值年表的建立. 第四纪研究, 2014, 34(6): 1280~1287 Liu Jingjing, Yang Bao. Development of a tree-ring-width chronology using the Eigen analysis method in Langkazi regions of Tibet. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1280~1287
- 37 Huang N E, Shen Z, Long R S et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-

stationary series analysis. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 1998, 454 (1971): 903~995, doi: 10.1098/rspa. 1998.0193

- 38 杨 周,林振山,俞鸣同.东亚冬季风演变和亚洲内陆干旱化 信号的多尺度分析.第四纪研究,2011,31(1):73~80 Yang Zhou, Lin Zhenshan, Yu Mingtong. Multi-scale analysis of East Asian winter monsoon evolution and Asian inland drying force. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(1):73~80
- 39 郭志永, 翟秋敏. 北大西洋 IODP U1313 站深海沉积中环境敏感 粒度组分研究. 第四纪研究, 2012, 32(6): 1107~1120 Guo Zhiyong, Zhai Qiumin. A study of environmentally sensitive grain-size groups of deep-sea sediment at IODP site U1313, North Atlantic. Quaternary Sciences, 2012, 32(6): 1107~1120
- 40 冯 雯,李可军,翟 倩等.中国北方地区(33~41°N,108~115°E)过去500年夏季降水量的周期成分分析.第四纪研究,2013,33(1):126~135
 Feng Wen, Li Kejun, Zhai Qian *et al.* Multi-scale analysis of the

precipitation index in north-Central China $(33 \sim 41^{\circ} \text{ N}, 108 \sim 115^{\circ} \text{ E})$ over the past 500 years. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(1): 126~135

- 41 林振山,汪曙光.近四百年北半球气温变化的分析:EMD方法的应用.热带气象学报,2004,20(2):90~96 Lin Zhenshan, Wang Suguang. EMD analysis of northern hemisphere temperature variability during last 4 centuries. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(2):90~96
- 42 Fang Keyan, Frank David, Gou Xiaohua et al. Precipitation variations over the past four centuries in the Dieshan Mountain area as inferred from tree rings: An introduction to an HHT-based method. Global and Planetary Change, 2013, 107: 109 ~ 118, doi: 10.1016/j. gloplacha. 2013. 04.010
- 43 《青海森林》编委会.青海森林.北京:中国林业出版社, 1993.233~238

Editorial Committee of "Forest in Qinghai". Forest in Qinghai. Beijing: China Forestry Press, 1993. 233~238

- 44 刘兴聪.东祁连山西段云杉生长规律的调查研究.甘肃农大学报,1983,1(3):60~69
 Liu Xingcong. On investigation and studies on the growth laws of *Picea crassifolia* in the western of the east Qilianshan. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1983,1(3):60~69
 45 何志斌,赵文智,张立杰等.祁连山青海云杉林采伐干扰与恢
- 45 问志風, 赵文省, 张立杰寺. 祁连田肖海公杉林未找十九与候 复过程. 林业科学, 2009, 45(2): 12~16 He Zhibin, Zhao Wenzhi, Zhang Lijie et al. Logging disturbance and the restoration process of Picea crassifolia forest in Qilian Mountain. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(2): 12~16
- 46 Gordon A H, Byron-Scott R A, Bye J A. A note on QBO-SO interaction, the quasi-triennial oscillation and the sunspot cycle. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1982, **39**(9): 2083~2087
- 47 Naujokat B. An update of the observed Quasi-Biennial Oscillation of stratospheric winds over the tropics. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1986, 43(17): 1873~1877
- 48 Allan R. ENSO and climatic variability in the past 150 years. In: Diaz H, Markgraf V eds. El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 3~35
- 49 Prabhakaran Nayar S R, Radhika V N, Revathy K et al. Wavelet analysis of solar wind and geomagnetic parameters. Solar Physics, 2002, 208(2): 359~373

STANDARDIZATION OF THE SPRUCE RING-WIDTH SERIES IN THE QILIAN MOUNTAINS AND MULTI-SCALE ANALYSES BASED ON EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION (EMD)

Tian Qinhua[®] Zhang Yong[®] Chen Xin[®] Fan Zexin[®]

(①National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081; ②Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; ③ Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084; ④Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 650223)

Abstract

The relationship between climate factors and tree growth are very complex. Traditional standardization methods still face challenges in retaining the climate signal while removing age-related growth trends and non-climatic disturbances. In this paper, we introduce an Empirical Mode Decomposition (EMD) based standardization method to develop the ring-width chronology, which has the advantages of excluding non-climatic disturbances in individual tree-ring series. First, tree-ring measurements were decomposed by the EMD to produce a number of Intrinsic Mode Functions (IMFs) with different physically-meaningful frequency band. Second, the lowest frequency IMF band, mainly representing age-dependent growth trend, was used to calculate tree-ring index divided by the original tree-ring width records. Based on this method, a new tree-ring chronology was developed from 44 Spruce trees (*Picea crassifolia* Kom.) at Kong-gang-mu (Kgm) Forest of Sunan County of Qinghai Province in the Qilian Mountains, and the elevations ranged from 2620m to 2770m, which covered the period 1723A.D. to 2000A.D. However, the chronology was more reliable before 1845A.D. when the EPS was greater than 0.85.

Compared two ring-width chronologies from EMD method and traditional method, we can found that the EMD method has the significant advantages in extracting the age-dependent growth trend, especially for improving fitting on the early "slow-growth" and the late "flat-growth" periods. It is noted that two chronologies exhibited the coincident significant correlation with meteorological factors of Sunan Meteorological Station ($38^{\circ}50'N$, $99^{\circ}37'E$; 2311m a.s.l.) in observation period ($1957 \sim 2000$), showed the highest correlation coefficient (r = 0.664, p < 0.01) with the total precipitation of the year from the previous August to current July, which indicated that the EMD method successfully preserved climatic signals. Although the EMD method appears to offer both practical and conceptual advantages, we emphasize that it is premature at this stage to conclude that the EMD-based method is better than the traditional methods. However, EMD method provides an additional option to mitigate bias in low-frequency variations longer than mean segment lengths of tree rings, which is inevitable with traditional methods.

The spectral analysis showed three main wavebands of this chronology: less than 10-yrs period, $10 \sim 30$ yrs, $30 \sim 60$ yrs, which would be integrated to three components of IMFs of all original ring width series derived from EMD method. The 10-yrs scale of IMF component was relatively stable in the time-frequency domain, representing a major portion of the high-frequency precipitation variations, with the maximum amplitude around the 1910s ~ 1920s. The $10 \sim 30$ yrs scale of IMF component displayed the obvious lowest amplitude during the $1925 \sim 1933$, corresponding to an anomalously dry period at that time of Gansu Province. And the $30 \sim 60$ yrs scale of IMF component showed that three dry-wet fluctuation. The integration components of the tree-ring width series with different main periods revealed the temporal distribution and detailed fluctuations of the major periods by their corresponding amplitudes in the time-frequency domain, which provide more information of frequency-domains of reconstructed climate series at multiple time-scales.

Key words Qilian Mountains, tree-ring index, standardized method, Empirical Mode Decomposition (EMD)