

DOI: 10.5846/stxb201808231800

彭正兵, 李新建, 张瑞波, 秦莉, 张合理, 陈友平, 刘蕊. 不同去趋势方法的新疆东天山高低海拔雪岭云杉树轮宽度年表对气候的响应. 生态学报, 2019, 39(5): - .

Peng Z B, Li X J, Zhang R B, Qin L, Zhang H L, Chen Y P, Liu R. The response of tree-ring chronologies of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.) to climate change at high- and low- elevations of the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, using different detrending methods. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

不同去趋势方法的新疆东天山高低海拔雪岭云杉树轮宽度年表对气候的响应

彭正兵^{1,2}, 李新建^{2,3}, 张瑞波^{2,*}, 秦莉², 张合理², 陈友平^{1,2}, 刘蕊^{1,2}

1 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054

2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局树轮年轮理化研究重点实验室/新疆树木年轮生态实验室, 乌鲁木齐 830002

3 新疆农业气象台, 乌鲁木齐 830002

摘要: 利用新疆东天山高低海拔雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.) 年轮样本, 采用样条函数法、负指数函数法和区域曲线法 3 种去趋势方法研制树轮宽度标准化年表, 通过分析不同去趋势方法的新疆东天山高低海拔云杉树轮宽度标准化年表特征、年表与气候响应的关系和年表间在不同频域互相关, 及其与其它资料对比发现: (1) 3 种去趋势法对东天山年表质量影响较小, 低海拔树轮年表含有更多可靠的气候变化信息。(2) 高海拔的雪岭云杉树木径向生长与 6—9 月平均气温均呈显著正相关, 其中标准化树轮年表与 7 月平均气温相关系数达 0.553 ($P < 0.01$, $n = 58$), 夏季温度可能是东天山高海拔雪岭云杉径向生长的主要限制因子; 低海拔雪岭云杉树木径向生长与春季降水显著正相关, 同时与春季平均气温显著负相关, 春季高温和缺水共同作用的春旱可能是影响低海拔雪岭云杉径向生长的主导因子, 且负指数函数年表对气候响应更敏感。(3) 区域曲线法能够保留树轮标准化年表中更多低频信息, 但优势不明显。高低海拔标准化年表在低频域相关系数较大, 并和历史干旱事件有很好的对应。在东天山高低海拔雪岭云杉的去趋势方法研究中, 负指数函数法比样条函数法和区域曲线法更适合。

关键词: 雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.); 东天山; 树木年轮; 气候响应; 去趋势方法

The response of tree-ring chronologies of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.) to climate change at high- and low- elevations of the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, using different detrending methods

PENG Zhengbing^{1,2}, LI Xinjian^{2,3}, ZHANG Rui^{2,*}, QIN Li², ZHANG Heli², CHEN Youping^{1,2}, LIU Rui^{1,2}

1 College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration; Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration; Key Laboratory of Tree-ring Ecology of Xinjiang Uigur Autonomous Region, Urumqi 830002, China

3 Xinjiang Agricultural Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China

Abstract: Tree-ring samples from Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.) were collected from high- and low- elevations of the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang. Three detrending methods (smoothing spline, negative exponential function, and regional curve) were used to develop tree-ring width chronologies. The characteristics of these chronologies and the relationship between radial growth and climate change at different elevations were compared. The results showed that

基金项目: 中亚大气科学研究基金 (CAAS201814), 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20100306); 国家自然科学基金 (41675152, 41805130); 中央公益性科研院所基本科研业务费 (IDM2016006) 和新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题 (2016D03005)

收稿日期: 2018-08-23; 网络出版日期: 2018-12-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: river0511@163.com

(1) detrending method had little effect on the reliability of the chronologies, and the chronologies from low elevations contained more reliable climate change information. (2) The radial growth at high elevations positively correlated with the mean temperature from June to September; the correlation coefficient for the standardized tree-ring chronology and temperature in July was 0.553 ($P < 0.01$, $n = 58$). The temperature in the summer may be the main limiting factor for the radial growth of these trees at high elevation. Meanwhile, the radial growth of trees at low elevation was positively correlated with precipitation in spring, and negatively correlated with mean temperature in the spring. Higher temperatures and lower precipitation in the spring combined to cause a drought in the early growing season. Furthermore, the drought in the spring limited the radial growth of trees. (3) The regional curve method retained more low-frequency information in the tree-ring standardized chronology, but the advantage was not obvious. There were higher correlation coefficients in the low-frequency of the chronologies between high elevation and low elevations. In summary, the negative exponential function method may be more suitable than the smoothing spline and regional curve methods for dendroclimatology studies on the eastern Tianshan Mountains.

Key Words: Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.); eastern Tianshan Mountains; tree-ring; climate response; detrending method

树木年代学以其定年精确、时间序列长、连续性强、空间分布广、分辨率高和对气候变化信息敏感等特点,已经成为研究过去气候变化和对其精确重建的首选代用资料之一^[1]。新疆天山山区海拔 1200—3500 m 的中山带分布有大量雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.),以往研究发现干旱与半干旱山区的雪岭云杉对气候变化响应敏感,含有较多过去气候信息,适用于气候重建工作^[2]。对中亚干旱区重要组成部分的新疆天山地区雪岭云杉开展气候研究,有助于人们了解亚洲中部干旱演变历史与机理^[3],并对中亚干旱区防灾减灾具有十分重要的现实意义。自 20 世纪 70 年代以来,已有大量的基于雪岭云杉树轮重建过去气候变化的研究^[2-12]。相比较而言,东天山地区气候较之西天山和中天山更为干旱,是生态脆弱和气候敏感之地,这里的树木径向生长可能对气候响应更敏感^[4]。从 20 世纪 90 年代初,袁玉江等^[5]重建了巴里坤未来 300 年干湿变化序列,到近年来 Chen 等^[9]重建了东天山自公元 1725 年以来的干湿变化,以及 Jiao 等^[10]等发现东天山云杉径向生长主要受生长季干旱限制。这些关于东天山树轮气候研究多集中于气候重建和少量响应分析,针对此地雪岭云杉树轮去趋势方法的研究却未有,而去趋势方法是树木年轮气候学研究的基础。在我国其它区域已经有一些不同去趋势方法对比研究,在川西卧龙地区以不同去趋势方法对冷杉树轮年表研究发现不同去趋势方法对年表特征值有影响^[13],而在西天山伊犁、博州三大山体北坡展开的不同去趋势方法对上树线云杉的研究表明,不同去趋势方法还可以影响年表与气候响应的关系^[14]。另一方面,树木径向生长有两个基本因子:一是自身遗传特性决定,二是受制外部环境支配^[15]。朱海峰等^[16]在西天山雪岭云杉研究时发现上下限树木均对气温响应敏感。张晴等^[12]对东天山不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析中发现,高海拔落叶松的径向生长主要受温度的限制,而中低海拔受降水与温度的共同影响。本文将采自东天山高低海拔雪岭云杉作为研究对象,以不同去趋势方法分析高低海拔树轮宽度年表特征值、雪岭云杉径向生长对气候的响应规律和年表间频域相关性的影响,以及与其他资料对比,从而探究此地雪岭云杉生长与气候的关系,以期为重建东天山过去气候变化提供基础资料,亦为当地森林资源保护和干旱区与半干旱区气候演替研究提供科学数据参考。

1 研究区域与方法

1.1 树轮采样区概况

采样点分布于呈现东西走向的新疆东天山(图 1),垂直地带性明显,冰雪带—高山草甸带—高山灌木带—山地针叶林带—温带草原—荒漠等自然景观组合完整分布于此。此地气候表现为温带大陆性干旱气候

特点,日照时长,昼夜温差大,主要受西风带作用^[11]。气象数据选取距离采样点最近的巴里坤国家基本气象站(93°00'E,43°36'N,1650.9 m,1957—2015 年)器测得到的月平均气温、月平均降水、平均月最高气温、平均月最低气温和月平均相对湿度。图 2 所示:巴里坤地区年平均降水为 222.1 mm,年平均温度为 2.08 ℃,且雨热同期,月平均降水和月平均气温极高值出现在 5—9 月,峰值出现在 7 月,降水最高为 46.8 mm,气温最高 18.13 ℃。巴里坤地区自 1957 年来,年平均气温以 0.594 ℃/(10a)的速率上升,超过 0.01 的显著性水平,降水与气温均处于上升期,呈现暖湿趋势(图 2)。

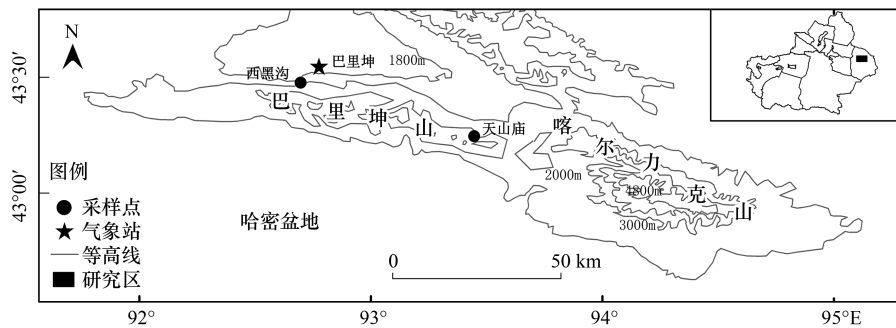


图 1 东天山树轮采样点与气象站

Fig.1 The map of tree-ring sampling sites and meteorological station on the eastern Tianshan Mountains

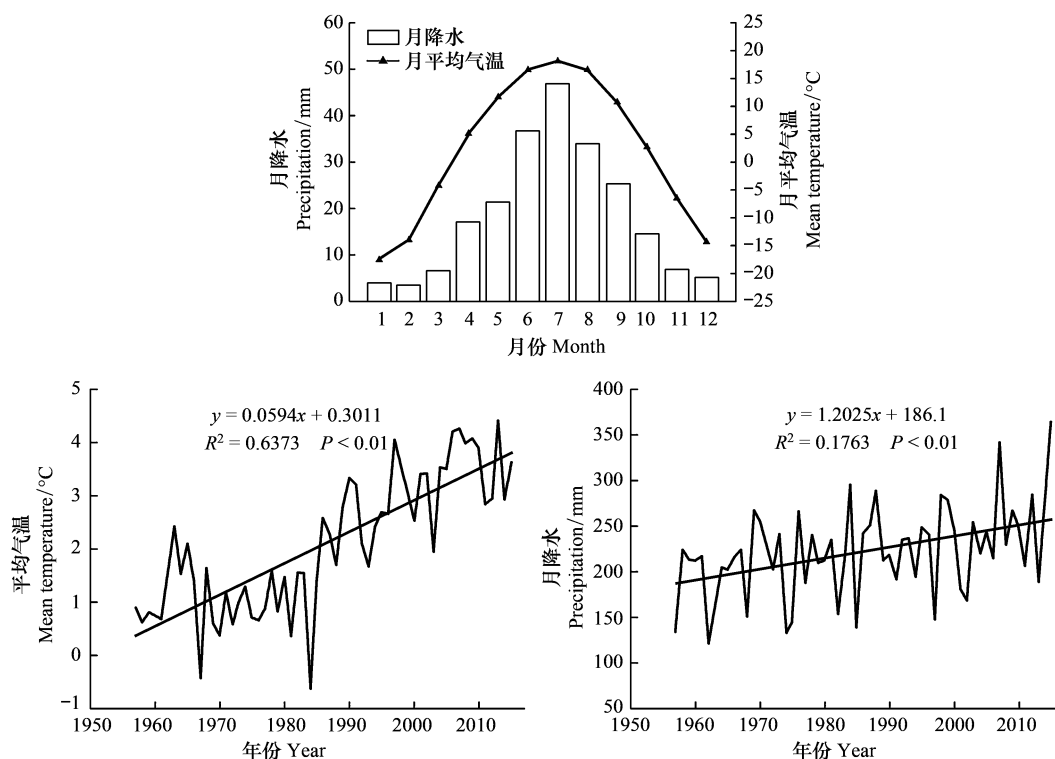


图 2 巴里坤气象站逐月降水量与平均气温、逐年平均气温和逐年降水量(1957—2015)

Fig.2 Monthly precipitation and mean temperature, annual mean temperature and precipitation of Balikun meteorological station (1957—2015)

1.2 树轮数据

2017 年 7 月,研究人员前往哈密地区东天山段采集云杉树芯样本。虽高海拔天山庙与低海拔西黑沟,的具体位置不同(表 1),但均处在同一气候影响背景下,且此处树木生长受到明显的干旱影响^[10]。采样过程遵照树轮气候学与树轮生态学原理,尽量采取远离林中,植被稀疏,靠近山崖,土壤流失,岩石裸露,受到人为扰

动较少的树木,如此采集的树轮样本才可能含有更多气候变化的信息,选取年龄较大的活树 50 棵,使用生长锥平行胸高处钻取树芯 100 根(表 1),复本量达到树轮气候研究所要求的数量^[15]。

表 1 东天山段采点概况

Table 1 Environmental information of the tree-ring sampling sites

采点名称 Sampling location	代号 Code	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	树/样芯 Tree/core	平均海拔/m Elevation	郁闭度 Canopy density
天山庙	TSS	43°18′	93°40′	24/48	2620	0.4
西黑沟	XHS	43°32′	92°55′	26/52	2317	0.7

1.3 研究方法

参照树木年轮学的基本原理和研究步骤^[17],将样品放置实验室自然风干,固定,打磨,目测查年,用精确度为 0.001 mm 的 Lintab 程序进行年轮测宽,利用 COFECHA 程序对东天山雪岭云杉进行交叉定年检验^[18],剔除其中奇异点,以及与主序列相关较差的序列,再用 ARSTAN 年表研制程序建立树轮年表,对去趋势序列以双权重平均法进行合成得到标准化年表(Standard Chronology, STD)、差值年表(Residual Chronology, RES)与自回归年表(Autoregressive chronology, ARS)本文以含有更多低频信息的标准化年表为准。

考虑到采样地高山与盆地相间,地形复杂,故本文采用了现今常用的 3 种去趋势方法去除生长趋势,样条函数法(Smoothing Spline Function, SPL)、负指数函数法(Negative Exponential Function, NEP)和区域曲线标准化方法(Regional Curve Standardization, RCS),样条函数法与负指数函数法均是拟合去除树木自身遗传因素,以及种间干扰竞争产生的抑制或释放等对生长趋势的影响,样条函数是直接采用连续、光滑插值对年轮宽度进行拟合,无需假设树木生长形式,适用于湿润地区;负指数函数适用于半干旱区与干旱区生长限制因子单一,远离林中,种间竞争不显著,且较少受到非气候因子影响的树木^[17];区域曲线标准化方法则对每一根样芯生长趋势建立曲线拟合,能很好保留树芯低频信息,还能恢复长于树轮序列长度的气候变化信息^[19]。

为了分析去趋势方法对高低海拔树轮宽度年表的影响,利用上述 3 种去趋势方法研制出 6 个宽度年表(西黑沟 SPL、西黑沟 NEP、西黑沟 RCS、天山庙 SPL、天山庙 NEP、天山庙 RCS)作比较;然后和气象站气候要素做相关普查,分析不同去趋势的东天山高低海拔云杉径向生长对气候响应关系和找出何种去趋势方法对何种气候信号更敏感;再使用滤波法分离出树轮宽度年表的高低频,计算出树轮宽度年表的全频(原始年表指数)、高频(高通滤波值,滤去 $\geq 8a$ 低频信号)和低频(低通滤波值,滤去 $< 8a$ 高频信号)的相关系数,分析何种去趋势方法能够保留较多低频信息和高低海拔树轮宽度年表共同含有何种频域信息更多;最后与其它资料对比,验证前文的观点。

2 结果与分析

2.1 三种去趋势方法的树轮宽度标准化年表的特征

以 EPS(样本总体代表性)大于 0.85 为准确定可靠年段^[20],西黑沟树轮宽度标准化年表可靠年段是 1880—2017 年,天山庙树轮宽度标准化年表可靠年段是 1720—2017 年,两个年表的共同可靠年段是 1880—2017 年。树轮与气候学原理认为:高质量年表含更多可靠气候信息^[21-23],其特征是平均敏感度、标准差、信噪比、第一特征向量比和样本对总体代表性值大,一阶自相关值小,从而适用于气候因子的响应分析^[17-19]。从表 2 可见,在高低海拔年表中,3 种去趋势年表的平均敏感度、标准差、信噪比、第一特征向量比、缺轮率和样本对总体代表性值均较大,尤以高低海拔 NEP 年表各项特征值与 SPL 年表较为接近,说明 3 种去趋势方法在高低海拔年表研制中影响较为一致;整体而言,低海拔树轮年表的平均敏感度、信噪比、第一特征向量比、缺轮率和样本对总体代表性值均高于高海拔,唯有低海拔 RCS 年表的标准差由 0.302 升为 0.328,说明低海拔年表含有更多气候变化信息。如图 3 所示,3 种去趋势方法研制的树轮宽度标准化年表总体上具有较强的同步性。

表 2 标准化树轮年表的主要特征参数

Table 2 Main characteristic parameters of the standardized tree-ring chronology

年表 Chronology	西黑沟 XHS			天山庙 TSS		
	SPL	NEP	RCS	SPL	NEP	RCS
标准差 Standard deviation	0.291	0.29	0.302	0.248	0.282	0.328
信噪比 Signal to noise ratio	51.9	35.24	40.07	31.55	17.1	12.29
平均敏感度 Mean sensitivity	0.291	0.291	0.285	0.184	0.185	0.19
一阶自相关 First-order auto-correlation	0.292	0.309	0.459	0.575	0.71	0.806
样本对总体代表性 Expressed population signal/%	98.1	97.2	97.6	96.9	94.5	92.5
第一特征向量百分比 Percentage of first eigenvector/%	60.3	49.2	51.1	49.8	32.8	24.4

SPL:样条函数年表 Smoothing spline function chronology; NEP: 负指数年表 Residual chronology; RCS: 区域曲线标准化年表 Regional curve standardization chronology

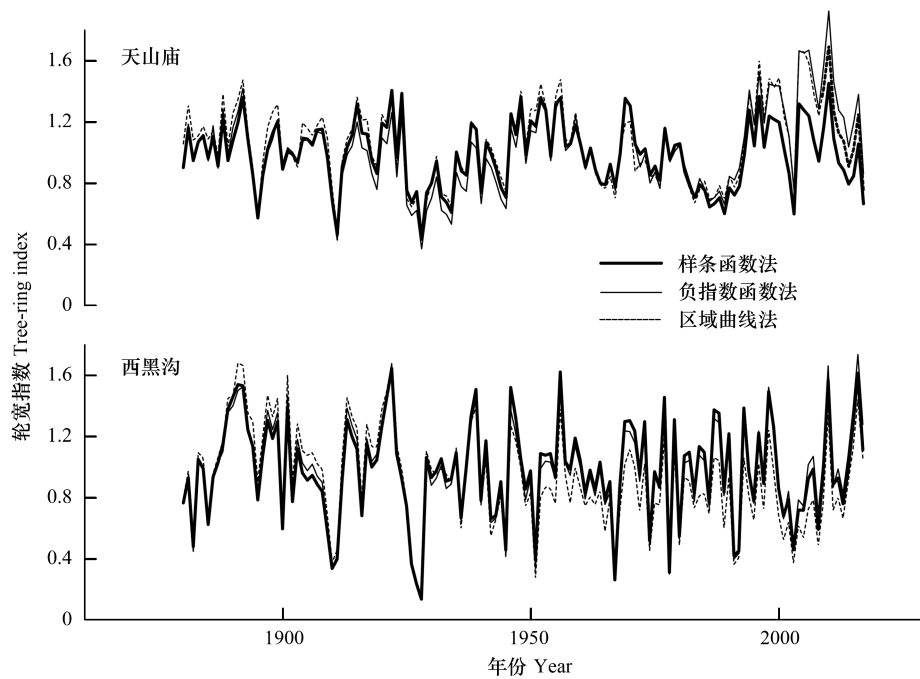


图 3 由样条函数法、负指数函数法和区域曲线法研制的树轮宽度标准化年表比较

Fig.3 Comparison of tree-ring width chronologies developed by spline function, negative exponential function and regional curve method

2.2 云杉径向生长对气候响应

通过 6 个年表与影响云杉生长较强的上年 10 月至当年 9 月的降水与气温做单相关分析,选取其中相关显著性水平超过 0.05,具有树木生长意义的时间段。结果表明:高海拔云杉径向生长与上年 10 月和当年 6—9 月的平均气温显著正相关,最高为当年 7 月 0.553 ($P<0.01, n=58$) (表 3),因此,东天山高海拔雪岭云杉径向生长可能受生长季 6—9 月的平均气温限制。低海拔树木径向生长与 5 月平均气温显著负相关,相关系数达到 -0.453 ($P<0.01, n=58$),与降水在 1 月和 4—5 月显著性正相关,最高为 5 月,相关系数为 0.357 ($P<0.01, n=58$),因此,春季干旱可能是东天山低海拔雪岭云杉树木径向生长的主要限制性因子。在受温度限制作用的高海拔处,NEP 年表相对 RCS 年表与平均气温相关更强些;在降水较少的低海拔,不仅表现出与当年 4—5 月降水正相关,还与当年 5 月平均气温负相关,而且负相关强于正相关,这也间接表明此处降水对树木径向生长的正向作用,NEP 年表与降水相关强于其它两种去趋势法研制的树轮宽度年表。因此 NEP 年表与高低海拔平均气温正相关或与降水正相关系数均为最大,表明东天山高低海拔的年表中,NEP 年表对气候响应更敏感。

表 3 3 种去趋势方法的东天山高低海拔云杉径向生长与气象资料的相关系数

Table 3 The Correlation coefficients between the tree ring chronologies and climatic data													
温度相关 Temperature		P10	P11	P12	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
TSS	SPL												
	NEP	○								○	○	○	○
	RCS	○								○	○	○	○
XHS	SPL								○				
	NEP								○				
	RCS								○				
降水相关 Precipitation		P10	P11	P12	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
TSS	SPL						□						
	NEP								□				
	RCS												
XHS	SPL				●			□	□				
	NEP				●			□	○				
	RCS				●			□	□				

P: 上年 Previous year; C: 当年 Current year; △: 代表正相关, 相关系数通过 0.01 的显著性检验; ●: 代表正相关, 相关系数通过 0.05 的显著性检验; ○: 代表负相关, 相关系数通过 0.01 的显著性检验; □: 代表负相关, 相关系数通过 0.05 的显著性检验

2.3 树轮宽度年表的频域相关

2.3.1 不同去趋势方法的树轮宽度标准化年表频域相关性

通过上文发现, 低海拔树轮宽度年表所含气候信息更多, 且负指数函数法去趋势得到的树轮宽度年表对气候变化响应更敏感, 下文由此均以低海拔年表和负指数去趋势法为准。从表 4 可见: 由样条和负指数函数两种去趋势方法研制的树轮宽度标准化年表在全频、高频和低频的相关性均极强, 说明两种方法对年表的影响较为相似。从表 5 可知, 使用区域曲线去趋势方法研制的树轮宽度标准化年表所含低频方差较之其它两种方法的低频方差约多 15%, 说明使用区域曲线去趋势方法较之其它两种去趋势方法, 能够保留树轮宽度年表中更多低频信息。

表 4 3 种去趋势方法研制的树轮宽度标准化年表在全频、高频和低频的相关

Table 4 Correlation of tree-ring width standardized chronology developed by three detrended methods at all frequency, high frequency and low frequency

频域 Frequency	RCS—NEP	NEP—SPL	SPL—RCS
全频域 All-frequency	0.924	0.986	0.906
高频域 High-frequency	0.989	0.997	0.98
低频域 Low-frequency	0.972	0.991	0.941

RCS—NEP: 代表区域曲线年表与负指数函数年表相关; NEP—SPL: 代表负指数函数年表与样条函数年表相关; SPL—RCS: 代表样条函数年表与区域曲线年表相关

表 5 3 种去趋势方法研制的树轮宽度标准化年表在低频与高频的方差百分比

Table 5 Percentage of variance of tree-ring width standardized chronology at high- and low- frequencies developed by three detrended methods

方差百分比 Percentage of variance/%	SPL	NEP	RCS
低频方差 Variance of low frequency	29.5	30.3	45
高频方差 Variance of high frequency	52.4	50.4	40

2.3.2 高低海拔树轮宽度标准化年表的频域相关性

由表 6 可知: 高低海拔的标准化年表在低频域相关系数最大, 高频域较低, 表明两个海拔的树轮宽度变化在低频最为相似, 在高频存在一定差异。

表 6 高低海拔的树轮宽度标准化年表在全频、高频和低频域的互相关性系数

Table 6 Correlation coefficient of standardized chronology of tree-ring width at high- and low- elevations in all-frequency, high-frequency and low-frequency domains

年表 Chronology	全频域 All-frequency	高频域 High-frequency	低频域 Low-frequency
TSS—XHS	0.451	0.602	0.872

3 讨论

3.1 不同去趋势方法的影响

树轮宽度年表研制过程中,不同去趋势方法对年表质量有重要影响。去趋势方法是通过一定的数学函数模型曲线拟合树木生长趋势,常用曲线有随机曲线、确定曲线和经验曲线,其中样条函数属于随机曲线^[24],负指数函数属于确定曲线^[25],区域曲线属于经验曲线^[26]。6 个年表特征值均较高,有较为可靠的气候信息,可直接用于气候响应分析,但因选用不同去趋势曲线拟合,在年表保留气候信息、波幅和对气候因子响应敏感性,以及含有低频信息方面出现一定差异。东天山高低海拔 NEP 年表与 SPL 年表特征值最为接近,可能是采点在干旱区与半干旱区,郁闭度均达到 0.4,树间竞争较激烈,样条函数法适用于树间竞争激烈的样地,负指数函数法适用于半干旱区与干旱区。两处年表波动趋势较为一致,波幅却有一定差异,因为样条函数法和负指数函数法均是通过插值法或比值法(实际轮宽值比拟合值)对每一个序列进行生长趋势拟合,使得序列更为接近实际轮宽生长曲线,所以波幅较之区域曲线标准化方法较小。从图 3 可见,在 3 种去趋势年表序列末端均有一定下降趋势,可能是去趋势方法不能有效地辨认出生物信号与气候信号,误将气候信号也拟合去,即所谓的去趋势拟合问题^[27]。在与气候因子响应时,发现 NEP 年表对气候响应更敏感,贾飞飞等^[28]在半干旱区的哈思山使用不同去趋势方法研究树轮宽度对气候信号影响时也发现 NEP 年表对温度响应更敏感;区域曲线标准化方法能够保留年表中更多低频信息,因为区域曲线标准化方法不必同其它两种方法一样,预先需要估计树轮序列的生长趋势,这样就避免了对生长趋势的过度拟合,此外本文采样点云杉之间存在一定年龄差,应该从总体观察由年龄差引起的生长趋势特性,进而选取拟合度高的生长趋势,可只有区域曲线标准化方法是从总体上去除生长趋势的,因此使用其可以保留年表中较多低频信号,但是区域曲线标准化方法更适用于树轮序列长度更长和年龄结构分布均匀的样芯,所以此文区域曲线标准化方法在保留年表低频信息时,未表现出较大优势。

3.2 高低海拔的影响

树木在生长过程极易受到立地环境的影响,其中影响因素之一便是海拔高低,随海拔升高,水热组合出现差异^[29],从而高低海拔的树轮宽度年表对气候变化敏感性、与气候因子响应和所含频域信息均有影响。本研究中西黑沟年表比天山庙年表含有更多气候变化信息,且对气候变化更敏感,靳翔等^[30]在川西亚高山冷杉气候响应研究中发现:树轮年表特性随海拔升高而降低,低海拔树轮年表敏感性更强。年表的平均敏感性在下降可能是该地区树木生长受到降水的限制,而降水随海拔高度升高而增多,从而使得降水限制作用随海拔升高而逐渐降低,生物学指明:高海拔树木为应对生态环境变化,降低新陈代谢水平,因此高海拔树木云杉对外界环境变化敏感性下降。高海拔云杉径向生长与上年冬季 10 月和生长季 6—9 月的平均气温均超过 0.01 的显著性检验水平正相关,而与降水不敏感,勾晓华等^[31]在祁连山东部地区研究发现:森林上限树木对降水不敏感。其主要树木生理学意义在于东天山高海拔山区常年积雪,雨水充沛,水分能满足上限云杉生长所需,但是温度较低,难以达到云杉生长最适温度,巴里坤气象站的 6—9 月平均温度为 15.5℃,根据每升高 100 m 海拔,气温下降 0.6℃,采样点平均温度大约为 9.5℃,并没有达到云杉生长的温度阈值^[32],所以高海拔夏季温度达不到最适温度,因此温度越高,生长越好。上年冬季 10 月树木形成层仍在形成中,光合作用在细胞内积累有机物,为次年生长积累能量物质,若此时温度偏低,有机物储存将不够,袁玉江等^[33]发现在新疆天山北坡

的上限树明显受到冬季低温的限制。6—7 月是云杉的速生期,对于早材的形成至关重要,若当时温度过低,树木细胞分化减慢,则会使树木形成层受到限制,形成窄轮,反则形成宽轮;8—9 月是云杉生长后期,主要是晚材的形成,此时树木的生长仍未停止,合适的温度促使树木木质化形成。低海拔云杉树木径向生长与春季降水显著正相关,同时与春季平均气温显著负相关,彭剑峰^[34]等提出过低海拔处树木生长限制因子不是单一的,是水热组合共同作用的观点。低海拔采样点在森林下限,降水理应是主要影响因子,但是平均气温通过促进蒸发、植物呼吸和蒸腾作用,间接影响树木生长,所以云杉宽度年表与 5 月平均气温呈现显著性负相关,同时与当年 4—5 月的月平均降水达到显著性正相关,即春季高温和缺水共同作用的春旱可能是影响低海拔雪岭云杉径向生长的主导因子,Jiao^[10]等和 Zhang^[35]等均发现雪岭云杉径向生长明显受到生长季早期干旱影响,从树木生长生理学角度看,4—9 月是云杉生长期,当年 4—5 月气温上升,积雪开始融化,为云杉发芽提供水分,5 月气温越来越高,促进植物呼吸、水汽蒸发和植物蒸腾作用加强,土壤滞水减少,消耗养分增多,用于生长的养分减少,此时的降水补充生长所需和气温间接消耗的水分,有利于树轮生长,反则窄轮易出现^[36]。高低云杉径向生长限制因子不同,可能是低海拔云杉林带处于森林下限,靠近哈密盆地沙漠,土壤含水少,温度比高海拔处高,蒸发更强烈,易受到气温的间接作用,海拔高处,降水能够满足树木生长需求,温度成为了主要限制作用,这也可能是高低海拔树轮宽度年表均含有较多气温变化信息的原因,与徐国保等^[8]认为树轮宽度指数与哈密地区的平均气温具有较好的相关性是一致的。

3.3 对于旱事件的共同反映

1880—2003 年,中国气象灾害大典^[37]中记载的干旱事件与两个年表中共同极低值对应年份都有出现(表 7),说明年表含有的气候信息是可靠的。袁玉江等^[5]在巴里坤树轮研究中发现年表极值与巴里坤蝗灾相关较好,且李钢等^[38]认为蝗灾的爆发与干旱呈正相关关系。巴里坤蝗灾年严重有 1882 年、1909 年、1939 年、1941 年、1951 年和 1953 年^[8],两个标准化年表与其中 4 个蝗灾出现年份对应,进一步说明我们制作的标准化年表是具有一定可信度的。两个年表的共同极低值区间中 1882—1885 年、1910—1911 年、1926—1928 年和 1974—1978 年,张同文等^[4]在东天山木垒地区利用树轮宽度资料发现偏干期有 1910—1912 年和 1926—1928 年,王劲松等^[3]探究哈密八大石森林上限树轮记录的温度变化信息时发现年表暖期有 1874—1877 年、1912—1921 年、1944—1958 年、1975—1982 年和 1997—2003 年,很显然在东天山三个不同地点的研究,却有着几乎相似的干旱信息反映,进一步验证了两个标准化年表含有较多温度信息,在解释与重建此地区的气温变化方面有较大潜力。

表 7 树轮宽度标准化年表共同年段内极低值与历史事件对比

Table 7 Comparison of the extremely low values and historical events in the common year of the standardized chronology

共同极低值区间 Low value interval	历史事件 Historical events	巴里坤蝗灾年 Locust
1882—1885 年	—	1882
1909—1911 年	1910 年,东天山木垒县遭旱灾,农田歉收...	1909
1933—1934 年	1934 年,巴里坤县大旱歉收...	—
1951—1954 年	1954 年,哈密地区干旱...	1951、1953
1963—1967 年	1963 年,巴里坤受旱灾农田面积近 9 万亩...	—
1974—1978 年	1974 年,全疆大旱,巴里坤春夏干旱... 1978 年,由于干旱少雨,哈密部分泉眼干涸...	—
1986—1989 年	1986 年,哈密全区受干旱缺水... 1989 年,全疆特大干旱,哈密干旱成灾...	—
1991—1992 年	1991 年,新疆干旱,哈密旱灾损失近 1140 万元...	—

4 结论

通过不同去趋势方法的新疆东天山高低海拔雪岭云杉树轮宽度标准化年表特征、年表与气候响应的关系

和年表间在不同频域互相关,及其与其它资料对比,可以总结出以下几点结论:

(1) 3种去趋势法对东天山高低年表特征值影响较为一致,虽然区域曲线法能够保留树轮标准化年表中更多低频信息,但优势不明显,而负指数函数年表对气候响应更敏感。(2) 高海拔的雪岭云杉树木径向生长与6—9月平均气温均呈显著正相关,夏季温度可能是东天山高海拔雪岭云杉径向生长的主要限制因子;低海拔雪岭云杉树木径向生长与春季降水显著正相关,同时与春季平均气温显著负相关,春季高温和缺水共同作用的春旱可能是影响高低海拔雪岭云杉径向生长的主导因子。(3) 高低海拔的标准化年表在低频域相关系数较大,共同含有更多温度信息,两个标准化年表在解释与重建此地区的气温变化方面有较大潜力。在东天山高低海拔雪岭云杉的去趋势方法研究中,负指数函数法可能比样条函数法和区域曲线法更适合。

参考文献(References):

- [1] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H, Harris I C, Jones P D, Shiyatov S G, Vaganov E A. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D3): 2929-2941.
- [2] 张瑞波. 基于树轮的中亚西天山干湿变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [3] 王劲松, 李金豹, 陈发虎, 勾晓华, 彭剑峰, 刘普幸, 靳立亚. 树轮宽度记录的天山东段近 200a 干湿变化. *冰川冻土*, 2007, 29(2): 209-216.
- [4] 张同文, 袁玉江, 陈向军, 范子昂, 喻树龙, 陈峰, 尚华明, 张瑞波, 秦莉. 利用树轮宽度资料重建东天山木垒地区降水量. *第四纪研究*, 2015, 35(5): 1121-1133.
- [5] 袁玉江, 王承义. 巴里坤 300 年干湿变化特征及未来趋势预测. *沙漠与绿洲气象*, 1990(4): 10-14.
- [6] 罗格平, 袁玉江. 巴里坤盆地现代气候波动及近 250 年来的冷暖变化. *冰川冻土*, 1991, 13(1): 77-83.
- [7] 张志华, 吴祥定, 李骥. 利用树木年轮资料重建新疆东天山 300 多年来干旱日数的变化. *应用气象学报*, 1996, 7(1): 53-60.
- [8] 徐国保, 刘晓宏, 陈拓, 安文玲, 侯书贵, 李忠勤. 新疆哈密八大石森林上限树轮记录的温度变化信息. *山地学报*, 2009, 27(4): 402-410.
- [9] Chen F, Shang H M, Yuan Y J. Dry/wet variations in the eastern Tien Shan (China) since AD 1725 based on Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*. Fisch. et Mey) tree rings. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 110-116.
- [10] Jiao L, Jiang Y, Wang M C, Kang X Y, Zhang W T, Zhang L N, Zhao S D. Responses to climate change in radial growth of *Picea schrenkiana* along elevations of the eastern Tianshan Mountains, northwest China. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 117-127.
- [11] 秦莉, 袁玉江, 喻树龙, 尚华明, 陈峰, 范子昂, 张同文, 童忠. 利用树轮宽度资料重建天山东段近 443 年相对湿度变化. *地球环境学报*, 2012, 3(3): 908-914.
- [12] 张晴, 于瑞德, 郑宏伟, 杨美琳, 甘森. 天山东部不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析. *植物研究*, 2018, 38(1): 14-25.
- [13] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 张齐兵, 胡婵娟, 罗淑政. 不同去趋势方法对树轮年表气候信号的影响——以卧龙地区为例. *植物生态学报*, 2011, 35(7): 707-721.
- [14] 袁玉江, 魏文寿, Esper J, 喻树龙, 张瑞波. 采点和去趋势方法对天山西部云杉上树线树轮宽度年表相关性及其气候信号的影响. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 809-814.
- [15] Fritts H C. *Tree rings and Climate*. New York: Academic Press, Inc.Ltd., 1976.
- [16] 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 方修琦. 雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)树轮宽度对气候变化的响应. *地理学报*, 2004, 59(6): 863-870.
- [17] 吴祥定. *树木年轮与气候变化*. 气象出版社, 1990.
- [18] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43(3): 69-78.
- [19] 方克艳, 刘昶智, 勾晓华, 李颖俊. 树轮学的一些基本研究方法和存在的问题. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(5): 41-46.
- [20] 程雪寒, 吕利新. 藏东南树木年轮记载的公元 1560 年以来的极端干旱事件. *第四纪研究*, 2015, 35(5): 1093-1101.
- [21] 牛军强, 袁玉江, 张同文, 尚华明, 张瑞波, 喻树龙, 陈峰, 姜盛夏. 阿尔泰山区两种树轮宽度年表气候响应特征. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(1): 59-67.
- [22] 李漠岩, 袁玉江, 魏文寿, 张同文, 秦莉. 阿勒泰西部树轮宽度年表特征及其气候响应. *沙漠与绿洲气象*, 2011, 5(6): 16-21.
- [23] 海丽其姑·阿不来海提, 袁玉江, 魏文寿, 喻树龙, 张同文, 陈峰, 尚华明, 张瑞波. 阿勒泰中部地区树轮宽度年表特征及其对气候的响应. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(3): 36-43.
- [24] Cook E R, Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 1981, 41: 45-53.
- [25] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology*. Netherlands: Springer, 1990.

- [26] Cook E R, Woodhouse C A, Eakin C M, Meko D M, Stahle D W. Long-term aridity changes in the western United States. *Science*, 2004, 306 (5698): 1015-1018.
- [27] Melvin T M, Briffa K R. A "signal-free" approach to dendroclimatic standardisation. *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 71-86.
- [28] 贾飞飞, 鲁瑞洁, 尚媛, 田丽慧, 陈原. 不同去趋势方法对哈思山地区树轮宽度年表气候信号的影响. *干旱区地理*, 2014, 37(4): 676-683.
- [29] 张慧, 邵雪梅, 张永. 不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应的研究进展. *地球环境学报*, 2012, 3(3): 845-854.
- [30] 靳翔, 徐庆, 刘世荣, 姜春前. 川西亚高山岷江冷杉和铁杉年轮对气候因子的响应. *林业科学*, 2013, 49(1): 21-26.
- [31] 勾晓华, 陈发虎, 李金豹, 杨梅学. 祁连山东部地区高分辨率气候记录研究. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2002, 38(1): 105-110.
- [32] Esper J, Shiyatov S G, Mazepa V S, Wilson R J S, Graybill D A, Funkhouser G. Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Climate Dynamics*, 2003, 21(7/8): 699-706.
- [33] 袁玉江, 李江风. 天山乌鲁木齐河源 450a 冬季温度序列的重建与分析. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 64-70.
- [34] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 张永香, 刘普幸, 张永, 方克艳. 阿尼玛卿山地祁连圆柏径向生长对气候的响应. *地理学报*, 2007, 62(7): 742-752.
- [35] Zhang R B, Yuan Y J, Gou X H, Zhang T W, Zou C, Ji C R, Fan Z, Qin L, Shang H M, Li X J. Intra-annual radial growth of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 36-42.
- [36] 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, Jacoby G, 方克艳, 田沁花, 张永. 青藏高原东北部树木年轮记录揭示的最高最低温的非对称变化. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(11): 1480-1492.
- [37] 温克刚, 史玉光. 中国气象灾害大典-新疆卷. 气象出版社, 2006.
- [38] 李钢, 刘倩, 杨新军, 颜祥, 黄兵兵. 明清时期河南蝗灾时空特征及其与气候变化的联系. *自然灾害学报*, 2015, 24(1): 66-76.