DOI: 10.5846/stxb201810092181
王亚军,张永,邵雪梅.河北太行山南段树木年轮指示的 167 年来 5—7 月相对湿度变化.生态学报,2019,39(12): - .
Wang Y J, Zhang Y, Shao X M. Variation in relative humidity from May to July during the past 167 years in the Southern Taihang Mountains in Hebei Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

河北太行山南段树木年轮指示的 167 年来 5—7 月相对湿度变化

王亚军,张永,邵雪梅
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

摘要:本研究建立了河北太行山南段侧柏(*Platycladus orientalis*)树轮宽度年表,分析树木径向生长对水热变化的响应,重建了研究区 167 年来 5—7 月相对湿度变化。结果表明,侧柏树轮宽度与 6 月降水显著正相关,与 5—7 月逐月均温和最高温均显著负相关,侧柏径向生长受到春末夏初水热条件的显著制约。研究区 167 年来干湿变化明显,明显的干旱期有 1876—1877,1900-01,1904—1912,1918—1921,1926—1930 和 1933—1935 年,湿润期有 1871—1873,1882—1884,1888—1890,1893—1895,1953—1956,1971—1972 和 2002-03 年。5—7 月相对湿度变化与旱涝等级负相关达到 0.01 显著水平。周期分析表明,167 年来 5—7 月相对湿度变化存在 2—4 年、7.71 年和 60 年左右周期,可能与太平洋活动和太阳活动有一定关联。

关键词:河北太行山南段;侧柏;相对湿度;响应

Variation in relative humidity from May to July during the past 167 years in the Southern Taihang Mountains in Hebei Province

WANG Yajun, Zhang Yong, SHAO Xuemei
Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, *China*

Abstract: In this paper, tree-ring width chronologies of *Platycladus orientalis* were developed from the southern Taihang Mountains in Hebei Province. The response of tree radial growth to hydrothermal change was analyzed, and the mean relative humidity from May to July during the past 167 years was reconstructed. The results showed that tree radial growth of *Platycladus orientalis* responded significantly and positively to June precipitation, and negatively to mean temperature and the maximum in May, June, and July. The tree radial growth of *Platycladus orientalis* was restricted by hydrothermal conditions in late spring and early summer. The reconstruction showed that there was a markable change in humidity and dryness during the recent 167 years. Obvious dry periods occurred in 1876—1877, 1900-01, 1904—1912, 1918—1921, 1926—1930, and 1933—1935, and humid period occurred in 1871—1873, 1882—1884, 1888—1890, 1893—1895, 1953—1956, 1971—1972, and 2002—2003. The reconstruction series was negatively related to the drought and flood level index at the 0.01 significance level. Cycle analysis showed that the reconstruction of relative humidity from May to July during the past 167 years had periods of approximately 2—4 years, 7.71 years, and 60 years.

Key Words: the southern Taihang Mountains in Hebei Province; *Platycladus orientalis*; relative humidity; response

---

基金项目:河北省科学技术研究与发展计划项目(15454201D);国家重点研发计划项目(2017YFC1502401)资助
收稿日期:2018-10-09; **网络出版日期**:2019-00-20
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbyjwang@163.com

在全球变暖背景下,近年华北平原的气候变化有向干热化发展的趋势[1],将对植物生长造成重大影响。河北太行山位于华北平原西部,处于中、西部地区的过渡地带,生态环境脆弱且敏感,植物生长与气候变化间的响应是研究热点之一[1]。

树木年轮资料具有分辨率高(年或者季节)、连续性强和时间序列长等优势,广泛用于气候环境变化研究[2-4]。目前,中国大部分地区均已建立不同树种的树木年轮年表,分析树木径向生长对气候变化的响应,并恢复过去气候环境变化,不过侧柏(*Platycladus orientalis*)树轮学研究成果相对较少,仅对北京山区侧柏[5—7]和黄帝陵侧柏进行了相关研究[8-9]。研究表明,北京地区侧柏年轮宽度和密度对气候变化相当敏感[5],黄帝陵侧柏年轮宽度变化可能受到太阳活动的影响[9],侧柏是进行树轮研究难得的材料[5]。

本文研究区位于太行山。太行山树轮学研究表明,油松(*Pinus tabulaeformis*)[10]和白皮松(*Pinus bungeana*)[11]对气候变化响应敏感,且根据树轮宽度重建了1805—2005年干旱指数变化序列[11],显示了太行山树轮气候学研究的潜力。由于气候及人为因素影响,太行山大面积次生林的年代较短,制约着太行山树轮学研究进展,树轮研究成果远远不足。侧柏是河北太行山南段植被恢复主要树种之一,且在阳坡广泛分布,不过至今未见侧柏树轮学相关研究报导。

本文在河北太行山南段采集侧柏树轮样本,目的在于分析其年轮宽度对水热变化的响应,揭示侧柏径向生长的主要限制因子,并寻找长序列树轮样本,试图重建历史时期气候变化,期望为太行山树轮学研究提供基础资料,同时希望为太行山区荒山绿化、水土保持和生态环境恢复与治理提供一定的理论依据和建议。

1 资料与方法

1.1 树轮材料

树轮样本采自河北太行山南段偏城林场(图1)。该区域地形地貌复杂多样,水、热条件变化较大,地带性植被为落叶阔叶林,主要有针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌丛、灌草丛和草甸等多个植被型,其中油松、侧柏、栓皮栎林(*Quercus variabilis*)和鹅耳枥林(*Carpinus turczaninowii*)等分布广泛。在偏城设立2个侧柏采样点,分别记作PC1和PC2,侧柏多种植于20世纪50—60年代。PC1树芯采集时间为2016年4月,采样点海拔在960m左右,阳坡,郁闭度较低,为0.2—0.3,共选取22棵树,每棵树采集1—3根树芯,共45根树芯;PC2树芯采集于2017年2月,采样点也位于阳坡,平均海拔在1100m左右,坡度10—20°,郁闭度较低,为0.2—0.3,共采集17棵树,每棵树1—3根树芯,共44根树芯。因为两个采样点距离居民点都比较远,且海拔相对较高,加之森林管理人员的防护,所以生长过程中树木几乎不受人类活动影响,适合用于树木年轮气候学分析与研究。

树木年轮样本按照常用的树木年轮分析程序,进行干燥、粘贴、打磨以及初步目测定年,采用LINTAB年轮宽度测量仪测量树木年轮宽度,分辨率0.01mm。采用COFECHA程序[12]检查交叉定年和测量结果,剔除与主序列相关系数小的样本。利用ARSTAN程序[13]建立树轮年表。在建立年表过程中,采用不同的函数拟合生长曲线,逐根测试,另外考虑到树木生长比较密集,最终35根树芯选择步长为30年的样条函数(因为大部分树芯长50年左右),4根采用负指数函数拟合树木生长趋势,最终分别建立两个采样点侧柏的标准化(STD)年表(图2)。

1.2 气候资料

树轮采样点周围气象站点有石家庄气象站(38°02′N,114°25′E,81.0m)、邢台(37°04′N,114°30′E,77.3m)、榆社(37°04′N,112°59′E,104.14m)、晋东南(36°12′N,113°07′E,926.5m)和长治(36°04′N,99°18′E,991.4m)。石家庄气象站较远,距离采样点大约131km。晋东南气象数据止于1985年,长治气象数据始于1986年,数据长度较短,而且距离采样点距离较远,超过100km。最终选取了邢台和榆社气象站记录的月总降水量、月均温、月平均最高温、月平均最低温和相对湿度。月降水量计算距平百分率,月均温、月均最高温、月均最低温和相对湿度分别计算距平,然后将邢台和榆社站气候要素分别平均,作为研究区气候资料,气候时段选取1957—2016年。上述气象数据来源于国家气候中心数据共享网络(http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/

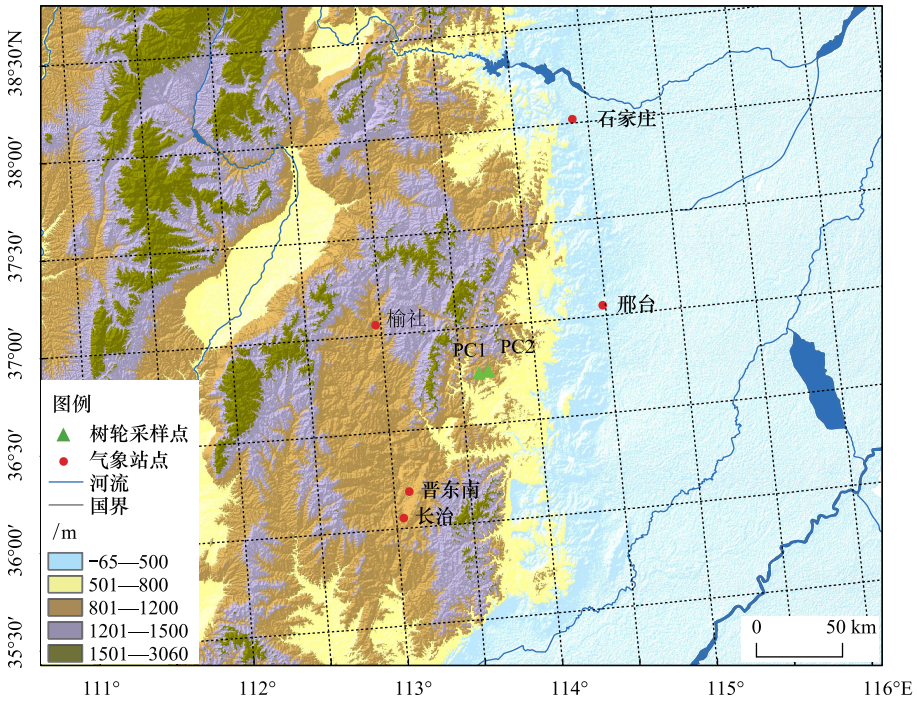

图 1　研究区位置与采样点分布

Fig.1　Location of study region and distribution of sampling site

气象站点:SJZ:石家庄;YS:榆社;XT:邢台;JDN:晋东南;CZ:长治

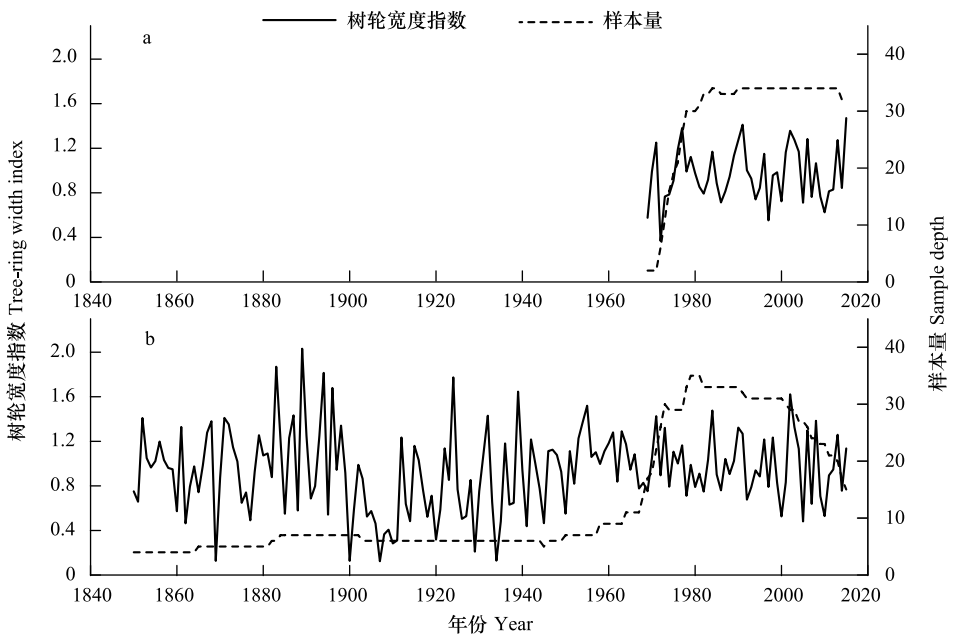

图 2　树轮宽度指数序列(黑色)与样本量(蓝色)

Fig.2　Ring width chronology (black line) and the sample depth (blue line)

a:采样点 PC1 年表; b: PC2 年表

2011qsjgx/)。

帕默尔干旱指数指示了一个地区的水分收支状况,考虑了月降水和地表气温对当地地表水分需求的影

响,近似地衡量了气象干旱程度,比单独的降水量更能代表地表湿度状况。本文选取采样点附近 PDSI 格点(113.5—114.0° E, 36.5—37.0° N)(http://climexp.knmi.nl/selectfield_obs2.cgi? id = someone@ somewhere)1971—2015 年 1—12 月 PDSI 数值,与树轮宽度进行相关分析。

进行树木年轮气候学分析时,选取前年 9 月份至当年 10 月份共 14 个月的气候要素。

1.3 方法

采用相关函数分析树轮宽度和气候要素间的相关关系;利用简单线性回归分析法建立树轮宽度与气候要素的转换方程;采用交叉验证法[14]和分段检验法[15]验证转换方程;重建序列阶段划分的标准如下,重建序列均值用 mean 表示,标准差用σ代表,高于 mean+0.5 σ为湿润(温暖)时期,低于 mean−0.5 σ为干旱(寒冷)时期;采用 MTM (multi-taper method)[16]分析过去气候变化序列的周期特征。

2 结果

2.1 年表统计特征

侧柏树轮宽度年表特征值和公共区间分析结果见表 1。

表 1 年表特征值和公共区间分析结果

Table 1 Statistics of chronology and common interval analysis of chronology

	PC1	PC2
树种 Tree Species	侧柏	侧柏
树(芯) Trees (Cores)	20(35)	16(39)
年表区间 Chronology Interval	1969—2015	1850—2016
平均敏感性 Mean Sensitivity (MS)	0.289	0.435
一阶自相关系数 Autocorrelation Order 1	0.091	0.135
公共区间 Common Interval	1975—2015	1975—2015
样本相关系数 Mean Correlations among All Radii (R_1)	0.410	0.512
树内相关系数 Mean Correlations between Trees (R_2)	0.657	0.654
树间相关系数 Mean Correlations within Trees (R_3)	0.392	0.503
信噪比 Signal-to-noise Ratio (SNR)	10.427	12.600
样本的总体代表性 Expressed Population Signal (EPS)	0.912	0.926
C_{SSS} > 0.85 的第 1 年(芯)	1972 (5)	1850 (4)

C_{SSS}:子样本信号强度系数 Coefficient of the subsample signal strength[17]

树木年轮学理论一般认为 MS、R1、R2、R3、SNR 和 EPS 等越大,则表明序列的共性越强,所选样本越能够代表当地树木的群体变化特征。本研究获得的树木年轮年表序列的统计特征值及公共区间分析结果(表 1)显示上述指标值都较高,说明树木年轮宽窄变化对采样点树木的群体代表性较强。

2.2 侧柏树轮宽度指数与气候要素的相关关系

为了解河北太行山南段树木径向生长对水热变化的响应,分析了侧柏树轮宽度与降水、均温、平均最高温、平均最低温和平均相对湿度的相关关系。

PC1 侧柏树轮宽度与前一年 9 月到当年 10 月降水的相关关系表明,年轮宽度与当年 4 月和 6 月降水显著正相关(图 3a);与 5 月和 6 月均温负相关达到 0.01 显著水平,与 7 月均温负相关达到 0.05 显著水平,与 5 月、6 月和 7 月最高温负相关皆达到 0.01 显著水平,与 9 月最低温显著正相关(图 3b)。PC2 侧柏树轮宽度与 6 月降水正相关达到 0.01 显著水平(图 3e),与 5 月和 6 月均温负相关达到 0.01 显著水平,和 7 月均温负相关 0.05 显著水平,与 5 月、6 月和 7 月最高温负相关达到 0.01 显著水平,与 5 月最低温负相关达到 0.05 显著水平(图 3f)。可见,侧柏径向生长受到降水和气温变化的显著影响。

上述相关分析结果表明,春末夏初降水对侧柏,另外年降水对 PC2 采样点侧柏径向生长有促进作用,而生长旺季高温引起的干旱,对树木生长有抑制作用。

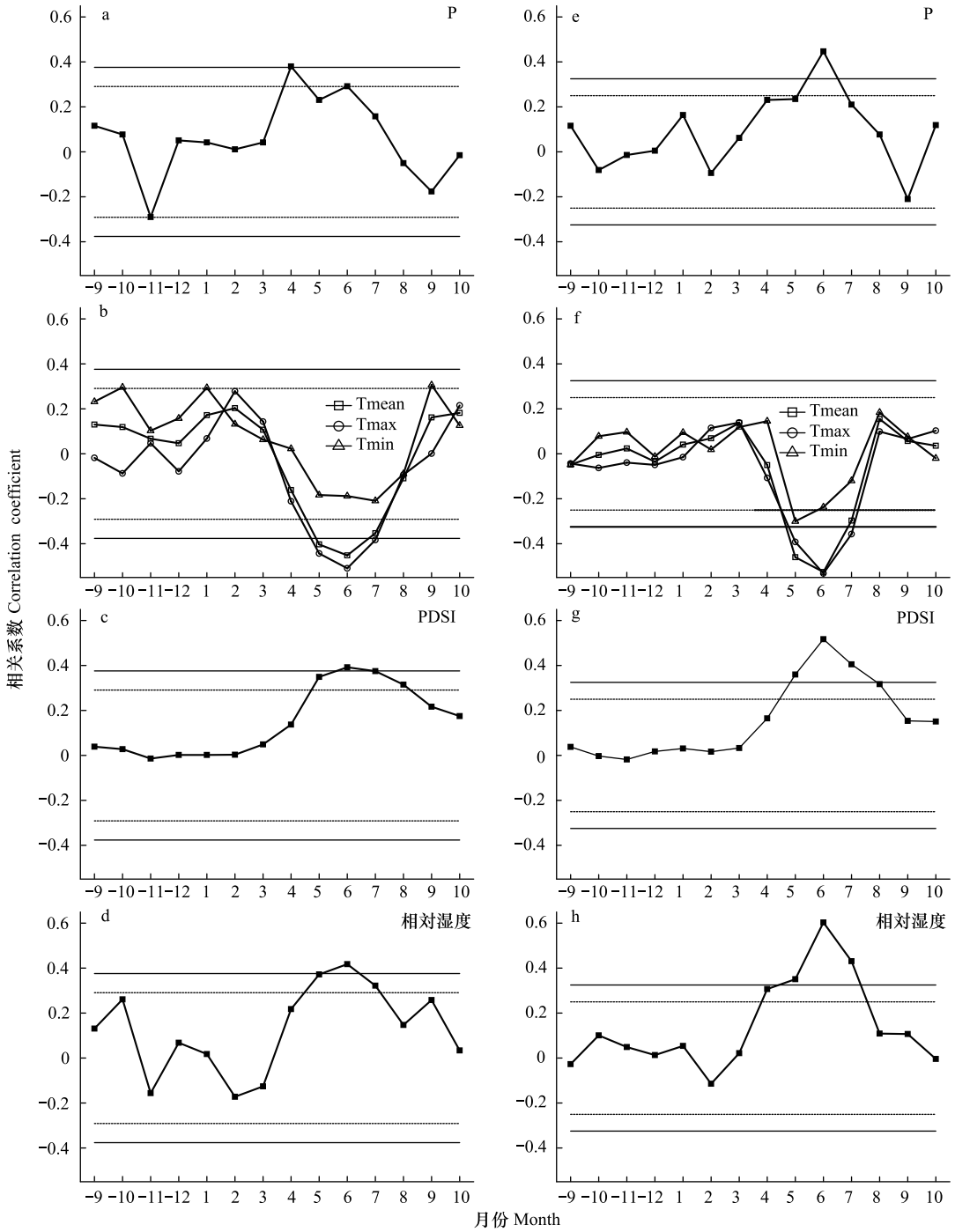

图 3　树轮宽度指数与气候要素相关系数

Fig.3　Correlation coefficients between tree-ring width index and climate data

a—d,e—h 分别是 PC1 和 PC2 年表与气候要素的相关关系,实线是 0.01 显著水平,虚线是 0.05 显著水平

为了研究水热组合变化对树木径向生长的综合影响,进一步分析了树轮宽度与 PDSI 和平均相对湿度的相关关系。结果表明,PC1 侧柏树轮宽度与 5—8 月各月 PDSI 均显著正相关,其中与 6 月 PDSI 正相关达到 0.01显著水平(图 3c);与 6 月湿度正相关达到 0.01 显著水平,与 5 月和 7 月湿度正相关达到 0.05 显著水平(图 3d)。PC2 侧柏树轮宽度与 5—8 月各月 PDSI 均显著正相关(图 3g),与 4—7 月逐月相对湿度均显著正相关,其中与 5 月、6 月和 7 月相对湿度的正相关都达到 0.01 显著水平(图 3h)。可见,生长旺季水热条件对侧柏径向生长具有显著影响。

另外,计算了树轮宽度与季节(时段)气候要素的相关系数,其中 PC2 树轮宽度与 5—7 月平均湿度相关系数最大(r=0.648, P<0.001),所以拟用 PC2 树轮宽度重建研究区过去 5—7 月平均相对湿度的变化。

2.3 侧柏树轮宽度指数与 5—7 月相对湿度转换方程的建立

本文选取树木当年轮宽指数(RWt)作为预报因子重建 5—7 月湿度($RH_{5—7}$),转换方程为:

$$RH_{5—7} = 10.320 \times RW_t - 10.423$$

其中,RW 为树轮宽度指数,t 表示年份。

方程的复相关系数为 R=0.648,方差解释量 42.0%,调整后的方差解释量为 41.0%,F 检验值为 42.038,远远超过置信度为 0.001 的检验,显示出所建立的转换方程具有较高的显著性,实测和重建湿度比较吻合(图 4 a, b)。

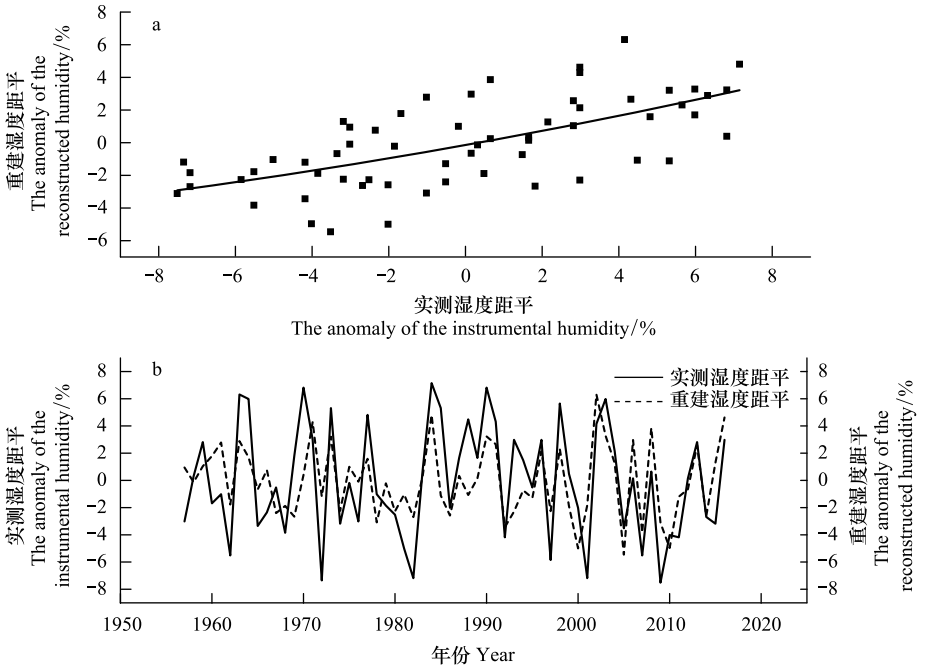

图 4 a 实测和重建 5—7 月平均相对湿度散点图;b 实测(黑色)和重建值(蓝色)对比

Fig.4 (a) Scatter plot of the instrumental and reconstructed RH57; (b) Instrumental (black line) and reconstructed (blue line) RH57

表 2 各项检验参数

Table 2 Parameters tested by verification

校准期 Calibration Period					验证期 Verification Period				
时期 Interval	r	R_{adj}^2	F	p	时期 Interval	ST/FST	t	RE	CE
1957—1986	0.604	0.342	16.052	0.000	1987—2016	22**/21*	2.902	0.342	0.341
1987—2016	0.704	0.478	27.555	0.000	1957—1986	24**/21*	4.109	0.452	0.450
1960—2014	0.648	0.410	42.038	0.000	1960—2014	46**/43**	5.180	0.385	0.385

r: 转换方程的复相关系数 Pearson Correlation Coefficient,R^2adj: 调整后的方差解释量 Variance after Adjusting,ST/FST: 分别代表符号检验值和一阶差符号检验值 Sign Test/First Difference Sign Test,t: 乘积平均检验值 Product-mean Test,RE: 误差缩减值 Reduction Error,CE: 有效系数 Coefficient of Efficiency

交叉检验结果(表 2)表明,重建值和实测值的原始值符号检验(S1)和一阶差符号检验(S2)分别通过了 45 和 43 个,皆达到 0.01 的显著性水平检验,说明转换方程重建的过去气候变化,无论是高频还是低频变化序列,与实测序列都比较接近。乘积平均值达到 5.180,同样达到 0.01 的显著性水平,说明重建序列与实测序列比较吻合。误差缩减值 RE 为 0.385,说明重建序列与实测序列具有很好的相似性;有效系数 0.385,也大于 0。分段检验各项参数同样通过检验。上述结果表明转换方程稳定,可用来重建过去气候变化。

2.4　研究区 167 年来 5—7 月相对湿度变化

本研究中 Csss>0.85 时,对应区间为 1850—2016 年,此时有 2 棵树 4 根树芯; 当 Csss>0.90 时,对应区间为 1865—2016 年,此时有 3 棵树 5 根树芯;当 Csss>0.99,对应区间为 1958—2016 年,此时有 4 棵树 11 根树芯。最终本文选取 1850—2016 年作为重建区间(Csss>0.85)。过去 167 年 5—7 月相对湿度变化见图 5。结果显示,研究区干湿变化明显,尤其是 20 世纪 40 年代以前。167 年来湿润期(多于 2 年)有 1871—1873,1882—1884,1888—1890,1893—1895,1953—1956,1971—1972 和 2002-03 年,干旱期(多于 2 年)有 1876—1877,1900-01,1904—1912,1918—1921,1926—1930 和 1933—1935 年。

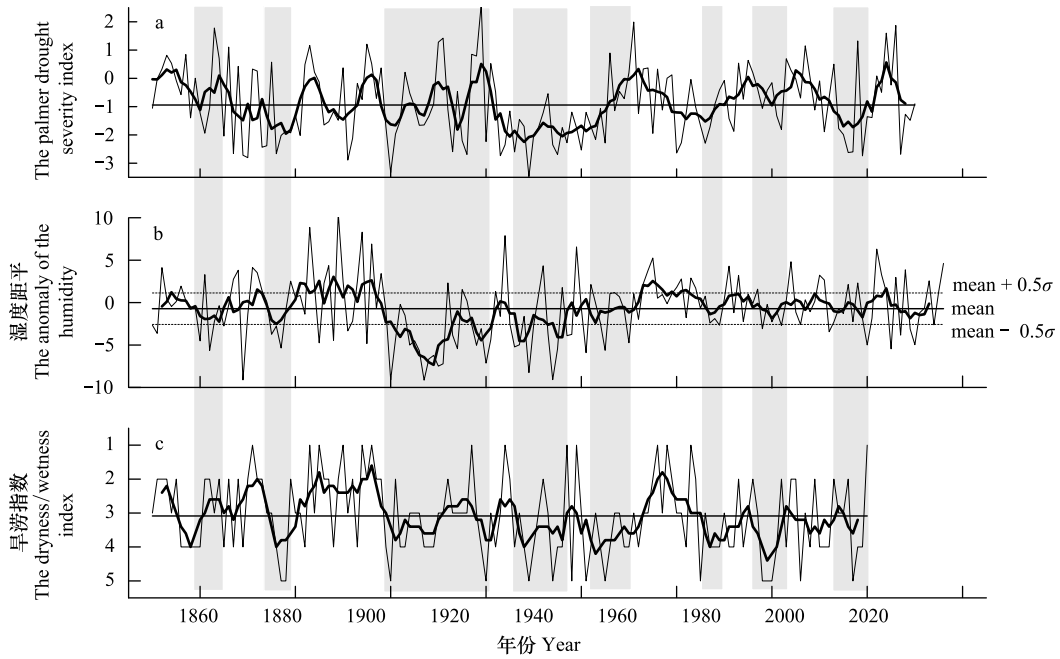

图 5　167 年来 5—7 月相对湿度变化

Fig.5　the RH57 reconstruction during the recent 167 years

a, 神农山 PDSI 变化; b.本研究;c. 邯郸旱涝指数变化; 细实线为年值,平滑曲线为 5a 滑动平均值

MTM 周期分析表明(图 6),在 95%置信水平上,重建 5—7 月相对湿度变化的年代际尺度周期有 63.69a 和 59.88a,年际尺度周期有 7.71a,3.84a,3.83a,3.70a,3.14a, 3.13a, 3.05 和 3.04a,其中 63.69a,59.88a,3.84a,3.83a,3.70a,3.14a 和 3.13a 达到 99%置信水平。

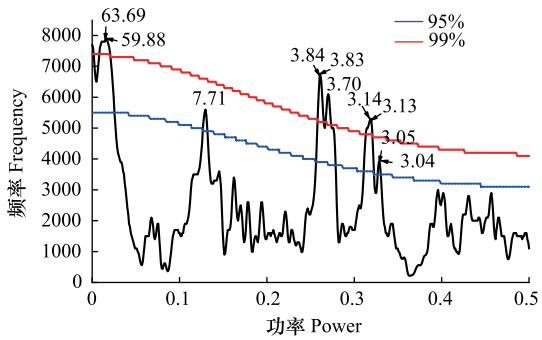

图 6　167 年来 5—7 月相对湿度变化的 MTM 周期分析

Fig.6　MTM spectrum analysis of the reconstructed RH_{5-7}

3　讨论

从生理学角度看,春季树木开始生长,降水增加,则早材细胞分裂快,细胞数量多且体积大,所以易形成宽年轮。树木生长与春季(月份)降水显著正相关,在太行山其他地区也有体现,河南万仙山油松径向生长主要受到 5 月(或春季)降水的正影响和 6 月温度的负影响[10],神农山白皮松[11]皆受到 5 月(或春季)降水的正影响。本研究侧柏径向生长对水热变化的响应与上述研究相似。而且,本研究中 PC2 侧柏树轮宽度与年降水(上年 9 月到当年 8 月)显著正相关,表明侧柏年径向生长受到年降水量多少的显著限制,可能由于采样点位于阳坡,阳坡蒸散作用导致失水较严重,干旱加剧,加

上采样点土层浅薄,持水能力有限,所以侧柏年轮宽度与年降水显著正相关。

树轮宽度与生长旺季均温和最高温显著负相关,表明在生长旺季,均温和最高温越高,植物蒸腾和土壤水分蒸发速度加快,树木有效利用水分减少。另外采样点位于阳坡,均温和最高温越高,则蒸散作用更大,所以高温条件下倾向于形成窄年轮。这与《树木学》中"高温对侧柏生长不利"的观点相吻合[18]。9 月最低温高,相当于延长树木生长季,有利于形成宽年轮。相对湿度与空气中水分含量以及温度有关,侧柏树轮宽度与 5 月、6 月和 7 月湿度皆显著正相关(图 3h),表明在生长旺季,侧柏径向生长受到水分多少和气温高低的综合影响。可见,侧柏径向生长与春末夏初降水的正相关,以及与春末夏初温度的负相关具有明确的生理学意义。

为进一步验证重建 5—7 月平均相对湿度距平序列的可靠性,计算了重建序列与邯郸和长治旱涝等级序列(1850—2000 年)(http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx/)的相关系数。旱涝共分 5 级,分别用数字 1、2、3、4 和 5 表示涝,偏涝,正常,偏旱和旱。相关结果表明,重建序列与邯郸和长治旱涝等级相关系数分别为-0.456($p<0.001$)和-0.12($p<0.05$),即湿度高值年多对应于旱涝指数低值年,反之亦然。重建序列的干湿变化趋势与研究区旱涝变化的基本一致性,从另一角度证明了重建序列的可靠。

本研究重建序列与河南省神农山重建 PDSI 变化对比(图 5)发现,5—7 月平均相对湿度变化序列的低谷时期,在神农山 PDSI 变化中也多体现为 PDSI 低值期。另外,与史料记录对比发现,研究区 1876—1877 年干旱期对应于光绪初年 1876—1878 年华北严重干旱时期,这段时期华北地区粮食歉收,米价上涨,华北 5 省人口大量死亡或迁出,且相关调查分析表明,1876—1878 年的大旱是全球化现象[19];1920—1921 年农产品批发物价年指数较前几年为高,这几年是华北区域灾荒频发的年份[20];1926—1930 年旱灾,对应于华北 1928—1930 年大旱,此次大旱灾冀、鲁、豫、晋被灾县达 276 个[20]。可见研究区 5—7 月相对湿度变化与大范围干湿变化具有一定同步性。

研究发现,重建序列的 2—4 年和 7.71 年周期与 ENSO 周期[21-22]比较吻合,表明研究区 5—7 月相对湿度在年际尺度变化上可能与 ENSO 有关。63.69a 和 59.88a 周期与北太平洋 50—70 年震荡周期[23-24]和太阳活动 50—80 年波动[25]比较接近,研究区湿度变化可能与太平洋和太阳活动有一定关联。

4 结论

本研究建立了河北太行山南段侧柏树轮宽度指数序列,探讨了树轮宽度与降水、气温、PDSI 和湿度的相关关系, 并重建了过去 167 年 5—7 月相对湿度变化,得到以下结论。

(1) 阳坡侧柏树轮宽度与 6 月降水显著正相关,与 5—7 月逐月均温和最高温均显著负相关,侧柏径向生长受到生长旺季的降水、均温和最高温的显著制约;与 5—8 月各月 PDSI 均显著正相关,与 5—7 月逐月相对湿度均显著正相关,侧柏径向生长受到生长旺季水热条件的显著影响。

(2) 过去 167 年 5—7 月相对湿度变化明显,明显干旱期有 1876—1877,1900-01,1904—1912,1918—1921,1926—1930 和 1933—1935 年,重建序列与邯郸和长治旱涝等级分别达到显著负相关。

(3) 过去 167 年 5—7 月相对湿度变化具有明显的 2—4 年、7.71 年和 60 年左右周期。

参考文献(References):

[1] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.

[2] Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, D'Arrigo R D, Jacoby G C, Wright W E. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. Science, 2010, 328(5977): 486-489.

[3] Glueck M F, Stockton C W. Reconstruction of the North Atlantic Oscillation, 1429-1983. International Journal of Climatology, 2001, 21(12): 1453-1465.

[4] Shao X, Xu Y, Yin Z Y, Liang E, Zhu H, Wang S. 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.

[5] 黄荣凤, 赵有科, 吕建雄, 鲍甫成. 侧柏年轮宽度和年轮密度对气候变化的响应. 林业科学, 2006, 42(7): 78-82.

[6] 路伟伟, 余新晓, 贾国栋, 李瀚之, 刘自强. 基于树轮 $\delta^{13}C$ 的北京山区侧柏水分利用效率. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2128-2134.

[7] 陈英, 杨华, 李伟, 许俊利, 王金增. 北京地区侧柏生长与气象因子的典型相关分析. 林业资源管理, 2012, (4): 86-90.
[8] 彭新民, 冯博. 黄陵柏树年轮与太阳活动的周期分析. 陕西天文台台刊, 1992, 15(2): 189-192.
[9] 冯博, 韩延本. 太阳活动对黄帝陵 500 年侧柏年轮变化的可能影响. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39(5): 776-784.
[10] 彭剑峰, 杨爱荣, 田沁花. 万仙山油松径向生长与气候因子的关系. 生态学报, 2011, 31(20): 5977-5983.
[11] 彭剑峰, 刘玉振, 王婷. 神农山白皮松不同龄组年轮-气候关系及 PDSI 重建. 生态学报, 2014, 34(13): 3509-3518.
[12] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-75.
[13] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization[D]. Tucson: University of Arizona, 1985.
[14] Michaelsen J. Cross-validation in statistical climate forecast models. Journal of Applied Meteorology, 1987, 26(11): 1589-1600.
[15] Meko D, Graybill D A. Tree-ring reconstruction of Upper Gila River discharge. Journal of the American Water Resources Association, 1995, 31(4): 605-616.
[16] Mann M E, Lees J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. Climatic Change, 1996, 33(3): 409-445.
[17] Wigley T M L, 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.
[18] 祁承经, 汤庚国. 树木学. 北京: 中国林业出版社, 1994.
[19] 郝志新, 郑景云, 伍国凤, 张学珍, 葛全胜. 1876—1878 年华北大旱: 史实、影响及气候背景. 科学通报, 2010, 55(23): 2321-2328.
[20] 任云兰. 民国时期华北灾荒与天津粮食市场(1912—1936 年). 中国农史, 2006, 25(2): 69-77.
[21] Huber M, Caballero R. Eocene El Niño: evidence for robust tropical dynamics in the "hothouse". Science, 2003, 299(5608): 877-881.
[22] Rittenour T M, Brigham-Grette J, Mann M E. El Niño-like climate teleconnections in new England during the late Pleistocene. Science, 2000, 288(5468): 1039-1042.
[23] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(6): 1069-1080.
[24] Minobe S. A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. Geophysical Research Letters, 1997, 24(6): 683-686.
[25] Ogurtsov M G, Nagovitsyn Y A, Kocharov G E, Jungner H. Long-Period cycles of the sun′s activity recorded in direct solar data and proxies. Solar Physics, 2002, 211(1/2): 371-394.