

DOI: 10.5846/stxb201306121687

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.

Peng J F, Liu Y Z, Wang T. A tree-ring record of 1920's—1940's droughts and mechanism analyses in Henan Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3509-3518.

神农山白皮松不同龄组年轮-气候关系及 PDSI 重建

彭剑峰^{1,*}, 刘玉振¹, 王 婷²

(1. 河南大学资源与环境研究所 环境与规划学院, 开封 475004; 2. 河南农业大学林学院, 郑州 450002)

摘要:对比来自河南省神农山的不同年龄组白皮松树轮宽度年表特征值,发现敏感性都较高,表明树轮中含有较多的气候信息;树木越老敏感性越大但标准差也越大,幼龄树敏感性降低但信噪比(SNR)和样本总体解释量(EPS)都较老龄树大;整个组的信噪比(SNR)和样本总体解释量(EPS)高于各个年龄组。与气候因子相关结果表现出幼树和老树受温度的限制作用要强于中龄树(尤其是当年5月);树木生长模型显示其方差解释量为53.7%,调整后为48.3%,都通过99.9%的显著检验,表明当年5月和前一年9月的水热组合是树木生长的主要限制因子。各轮宽年表与前一年11月至当年10月的PDSI的相关均明显高于与各月PDSI的相关值,表明水热年组合的影响强于各月的水热组合。利用整个采样点样本建立的树轮宽度标准年表重建的1805—2005年时段的PDSI序列明显凸现出20世纪20—40年代研究区为严重的干旱期;多窗谱分析也表明,神农山地区存在2.3—5.1a、36.6a和78.7a的准周期,其中2.7a、2.8a和78.7a准周期最显著。这些周期性干湿变化可能与太阳活动、季风和ENSO的变化存在一定的关系。

关键词:神农山;白皮松;树木年轮宽度;PDSI;重建

A tree-ring record of 1920's—1940's droughts and mechanism analyses in Henan Province

PENG Jianfeng^{1,*}, LIU Yuzhen¹, WANG Ting²

1 Institute of resources and environment of the University, College of environment and planning, Kaifeng Henan 475004, China

2 College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450002, China

Abstract: We found that the tree rings have higher mean sensitivity (MS) via comparisons among tree-ring width chronologies of *Pinus bungeana* in different age-class from Shennong Mountains in Henan Province. The MS is standard deviation (SD) particularly high for the older trees. While the signal-to-noise ratio (SNR) and expressed population signal (EPS) for the young trees are higher than these of the older age-class trees. The SNR and EPS of the entire age-class is higher than individual age-class. We investigated the climate-growth responses for chronologies at different age-classes. It is revealed that there are some different responses to temperature and limiting influence to the younger age-class and the older age-class trees are more than the middle age-class trees (especially in current May). The tree-ring chronology explained 53.7% and 48.3% of the instrumental variances of the mean temperature and precipitation in current May and previous September. This indicates that the correlation with temperature and precipitation of current May and previous September is the main limiting factor of growth of trees.

The higher correlation between chronology and PDSI from previous November to current October than that to each month PDSI indicates that the correlation with temperature and precipitation during a year is stronger than that of individual month. The result of PDSI reconstructed from 1805 to 2005a of all *Pinus bungeana* shows there lies a serious drought period

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31270493);河南省教育厅自然科学基金资助项目(2011B170003)

收稿日期:2013-06-12; **修订日期:**2013-11-13

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

from 1820's to 1840's. Significant multidecadal spectral peaks of 2.3—5.1a, 36.6a and 78.7a were identified, and 2.7a, 2.8a and 78.7a were most significant with 0.01 level. The periodic variation of dry and wet may potentially be the fingerprints of some climate change forcings such as solar activity, summer monsoon and ENSO activity.

Key Words: Shennong Mountains; *Pinus bungeana* Zucc; tree ring-width; PDSI; reconstruction

树轮资料以定年准确、连续性强、分辨率高(年分辨率)、轮宽量测精度高、与气候水文要素相关度高、易于采样和复本量大等优点^[1],使其成为全球气候变化研究的重要手段之一。我国北方干旱、半干旱地区是气候变化的敏感区,为树轮气候学研究提供了极好的机会,然而树轮研究密度仍然很低^[2],在北方地区进一步加大研究地点密度,建立树轮“场”显得非常必要和迫切^[3],尤其是我国东部受人类活动影响强烈、古老的树木非常稀少、成片分布的原始森林(大多是残留种或孑遗种)更少的区域,树轮气候的研究难度增大,使树轮气候学研究面临新的挑战。

白皮松为中国特有珍稀树种,喜光、耐阴、耐旱、耐干燥瘠薄、抗寒力强,一般生长在海拔 500—1800 米的山地石灰岩形成的土壤中,天然林在我国主要分布在北纬 30°52'—38°15',东经 104°15'—113°50'之间的陕西秦岭、太行山南部,河南西部山地、甘肃南部及天水麦积山、四川北部江油观雾山及湖北西部等地^[4-5]。河南神农山位于太行山的南端,其白松岭上的天然白皮松林,属于白皮松(*Pinus bungeana* Zucc)树木生长的东界^[4],这里是我国二、三级阶梯地势的过渡带,对区域降水有明显的阻挡作用,白皮松树轮边界清晰,是利用树轮宽度研究气候变化的很好材料,过去研究中仅见刘禹等^[6]利用白皮松树轮宽度重建山东于林年平均最低气温序列并分析了气温变化规律和孙艳荣等^[7]利用白皮松树轮纤维素的碳稳定同位素研究过去北京地区近 70 年的气候变化。

20 世纪 80 年代的调查^[8]显示整个白松岭白皮松群落有 4 个较明显的年龄组:1)500a 左右大树,仅岭顶零散分布约 13 株;2)50a 以上的树散生于岭顶两侧,仅占总株数的 0.5%左右;3)10 龄以上幼树,约占总株数的 45%,分布于缓坡地带,多冲出灌木层以上;4)3 龄左右的幼苗,将近占 54.5%,多潜伏在灌木林层下,这就为本区利用不同年龄级白皮松树轮来研究气候响应提供了非常好的资料。传统的树轮学研究方法认为去除生长趋势后,年龄对径向生长的

影响一般就不再考虑^[9-10],然而近年来,树轮宽窄变化与树龄间的不确定性引起了广泛关注^[11],国外学者在研究中发现不同树种、不同年龄的树木径向生长对气候的响应不同^[12-15],国内学者近几年也开始进行年龄与径向生长关系的研究^[11,16-17]。

本文拟以树龄结构层次明显、但树木数量较少的神农山白皮松进行不同年龄组树轮径向生长与气候关系的研究作为基础,重点建立白皮松树轮生长的气候变化模式,然后利用树轮年表序列重建过去该地区气候变化中的干旱事件,进而揭示该地区的干湿变化规律,为今后该区域白皮松的抚育更新、森林管理服务。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

神农山,为国家 AAAA 级风景旅游区,位于河南省沁阳市城区西北 23 公里的太行山麓,地理座标介于北纬 35°11'30"—35°19'和东经 112°44'—113°02'之间,其中白松岭是神农山最具代表性的地质景观,有“龙脊长城”之称,其一岭九峰,海拔最高处 1090m,长约 11.5km,仅开辟 2.5km 的绝岭天路,路两边是陡峭的万丈深渊,白皮松因其生长在龙脊长城上且树干布满斑驳陆离的色块,酷似龙鳞,故而得名龙鳞松,它是亚洲唯一的三针松,生长于海拔 800m 以上的悬崖绝壁上,这里是全国数量最多、最集中的野生龙鳞松原生地。

本区属暖温带大陆性季风气候,四季分明。春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季晴和日长,冬季寒冷干燥。据沁阳市气象站(35°13'19"N, 112°47'39"E,海拔约 180m)观察:年平均气温 14.3℃。1 月份最冷-2℃,7 月份最热,平均气温 27.4℃;全年大于 10℃的活动积温 4692.2℃;年平均日照时数 2496h,日照率 57%;无霜期 219d;年平均降水量 619mm,多集中在 7、8、9 月 3 个月,占全年降水量的 70%,水热同期。由于地处太行山南沿,华北平原与山西高原过渡地段,山高林密,地形复杂,既阻挡西北寒流的

侵袭,又截留了东南沿海暖湿气流,形成独特的小气候,降雨量较平原偏多,空气温度偏高,夏季气温较平原低 6—8℃。本区白皮松林 (*Form. Pinus bungeana*) 群系为天然次生林,零星分布于白松岭等地海拔 1000m 左右的中低山顶处,土壤为褐色土,微碱性。林相较整齐,郁闭度 0.4—0.5,建群种白皮松,伴生种有白桦 (*Betula platyphylla*)、红桦 (*Betula albosinensis*) 等,林下灌木甚少。

1.2 样本采集和年表建立

本研究样芯的采样时间是 2011 年 4 月 1 日,采样点 (35°13'19"N, 112°47'39"E, 海拔 982—991m,) 为太行山南麓的神农山白松岭上已开发的岭顶区域,属于白皮松纯林群落。鉴于本区域老龄树木较少的特殊性,岭顶上的健康大树和一些较大的幼龄树几乎全部采集,采样尽量选择接近基部位置和每树 2 芯,最后共采集 24 棵树 35 个样芯,编号从 SN, 以备树木年轮分析。

所有样本带回实验室后,按照树木年轮分析的基本程序,依次经样芯的自然风干、固定、打磨等预处理^[18]及初步定年,并对缺轮和伪轮进行识别^[19],然后在精度 0.001mm 的 Velmex TBA 树轮宽度仪上进行轮宽测量,测量后的树轮样本序列值要进行计算机程序 COFECHA^[20]的质量检验,消除定年和宽度测量过程中出现的主观误差,剔除那些相关性差、序列过短和奇异点过多的个别序列。最终选取 20 棵树 25 个样芯。神农组最长的样本为 491a (1520—2010AD), 研究后发现本采样点的样本明显分为 3 组:老龄组, >250a 的样本有 5 树 6 芯;中龄组, 130—205a 的样本有 5 树 6 芯;幼龄组, <60a 的样本有 10 树 13 芯。虽然分组后的样本量达不

到国际树木年轮标准的要求,但可以通过对这一特殊区域的白皮松的年龄级树轮生长特征的分析,给予研究区内白皮松的生态研究和森林管理提供一点数据支持。

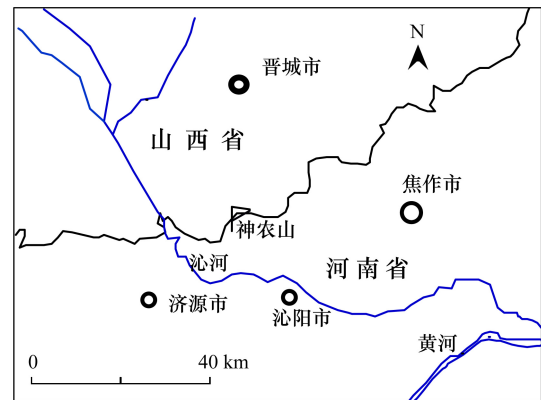


图 1 采样点神农山位置和沁阳气象站
Fig.1 Sampling site and Qinyang meteorological station in study area

用于气候分析的年表是通过 ARSTAN 程序^[21]建立的,都是采用负指数函数或样条函数拟合去掉树木本身遗传因子产生的生长趋势和树木之间干扰竞争产生的抑制和释放等的生长趋势,然后利用样本序列值和其拟合生长曲线值的商进行订正使其标准化。这样既能去掉生长趋势又保留更多的低频变化信息,最终分别建立了 3 种树轮年表即标准化年表 (STD)、差值年表 (RES) 和自回归年表 (ARS)。为了便于对比,所有年表的公共区间都选择在 1980—2010 年之间,采样点整个样芯的标准年表 STD 如图 2 及不同年龄组的特征值如表 1 所示。本研究中 STD 年表的 EPS>0.8 的位置是 7 根样芯,起始年为 1805 年。

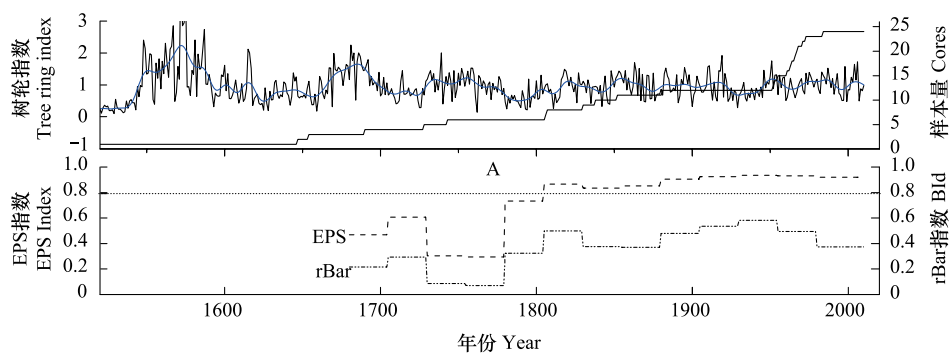


图 2 神农山白皮松树轮宽度年表及 11a 滑动平均和样本量以及基于 50a 滑动、25a 重叠的样本总体代表性 (EPS) 和相关系数 (rBar)
Fig.2 Ring-width chronology and 11-year moving average and the number of samplings for *Pinus bungeana* at Shennong Mountain and EPS, and rBar based on a window length of 50 year with a 25 year overlap

表 1 不同年龄组的树轮宽度标准年表 STD 的统计特征

统计项 Statistics item	STD 年表(公共区间 1980—2010 年) Standard chronologies (common period during 1980—2010)			
	整个组	老龄组	中龄组	幼龄组
	Entire- age class	Older-age class	Middle-age class	Younger-age class
年表研制样本量 Sampling cores in chronologies	20 树/25 芯	5 树/6 芯	5 树/6 芯	10 树/13 芯
年表平均敏感度 Mean sensitivity	0.390	0.406	0.406	0.255
年表的标准差 Standard deviation	0.525	0.539	0.411	0.321
样芯间的相关系数(r_1)	0.454	0.431	0.682	0.441
树间的相关系数(r_2)	0.456	0.458	0.574	0.442
树内的相关系数(r_3)	0.370	0.065	0.694	0.421
信噪比(SNR)	18.314	4.554	10.721	8.683
样本总体解释量(EPS)	0.948	0.820	0.915	0.897

1.3 研究区气候资料获取

气候资料来自距采样点 25km 的沁阳市气象站的月平均气温和月总降水量。气象数据采用 1971—2010 年的多月平均数据,其多年的月平均数据如图 3 所示,6—8 月是高温时期,降水集中在 7、8 月尤其 7 月最高,是典型的大陆性季风气候特征。利用 Mann-Kendell 方法^[22]对该站气象记录进行检验,未发现突变情况,代表了自然界的实际变化,可用做进一步的分析。鉴于气象站和采样点高差较大考虑,本研究又选取 Dai 等^[23]所提供的 PDSI 数据集的一个格点资料(33°45'N, 116°15'E, 分辨率为 2.5°×2.5°, 1970—2005 年;附近几个格点对比后选择的)。

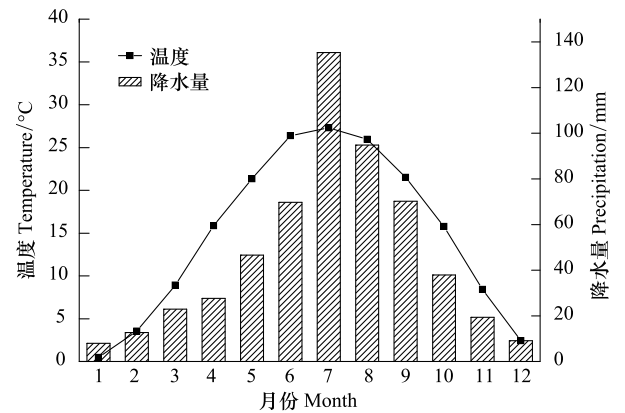


图 3 沁阳市气象站多年平均气温和降水分布图(1971—2010AD)
Fig.3 Monthly variations of mean air temperature (line with squares) and precipitation (bars) at the Qinyang Meteorological Station from 1971 to 2010

1.4 分析方法

本研究采用相关函数计算白皮松树轮度和气象

要素之间的关系,以便探究树木径向生长对气候因子的响应。基于采样点与气象站点之间的高差较大,又选取距离采样点较近且相关较好的一个 PDSI 格点资料进行分析,以验证树轮径向生长对 PDSI 及气候因子的响应的一致性。相关分析的气候资料包括月平均气温和月降水量及 PDSI 值都选取从上一年的 7 月至当年的 10 月。为了选取更适合的重建序列,本研究对比不同年龄组年表序列值与气候因素的关系,最后重建 1805—2005 年的 PDSI 指数,并且利用多窗谱(MTM 波谱)分析^[24]其变化周期。

2 结果与分析

2.1 研究区内不同年龄组的树轮年表的特征统计值

整个采样点样本的 COFECHA 分析结果显示,各样本序列与主序列的相关系数均值为 0.602 和平均敏感度为 0.473,这些原始测量的统计数据表明该区域的树轮宽窄变化模式接近、变化规律一致,可能反映树木生长受气候的短期变化或高频变化影响强烈;一阶自相关系数为 0.527,表明前期生长的滞后效应也较显著。

研制的标准年表统计特征值(表 1)发现,整个研究组年表平均敏感度仍较高为 0.39,树轮宽窄变化显著,表明样本中保持着较多的气候信息。表 1 中的不同年龄组特征值显示,树木越老年表的平均敏感度(M.S.)和标准差(S.D.)越大。为了对比分析不同年龄组的公共统计特征的不同,研制年表时采用统一的公共区间 1980—2010 年。由于采样点地势陡峭,树木大多生长在峭壁之上,因此所获取的样本量相对较少,大多为一树一芯,这样就造成样芯间

与树间的相关值差别不大,但中龄组的相关值较高,而树内的相关值差别较大(因样本少,尤其老龄组);整个组的信噪比(SNR)和样本总体解释量(EPS)都是最高的,其次为中龄组,老龄组最低。

2.2 树木径向生长与气候要素的关系

2.2.1 不同年龄组树轮宽度指数序列与气候要素的相关分析

由图 4 显示,不同年龄组的轮宽指数与各月气温和降水量也有较好的一致性。除了中龄组树木在 2—4 月及所有年龄组在 9、10 月外,树木对各月温度

几乎都表现出负相关,5 月份整个年龄组、幼龄组和老龄组都呈显著负相关而中龄组较弱相关;同样地树轮指数与大部分月份的降水量表现出正相关关系,诸如上一年的 9、10、12 月和当年的 1、2、4、5、6、7、8、9 等月份都是正相关,尤其上一年 9 月和当年 5 月都是显著正相关且整个年龄组的相关数值较高,同样 5 月的正相关幼龄组弱于中龄组和老龄组。总之,可以看出整个年龄组的树轮指数与气象要素有较好的相关关系,可用于建立树木生长模式。

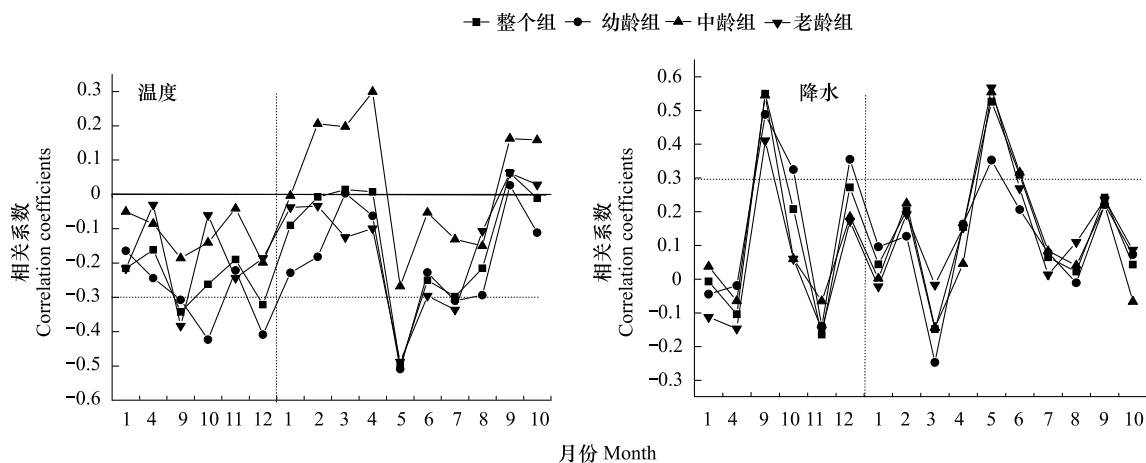


图 4 标准年表 STD 与气候因子的相关分析(虚线代表 95%置信水平)

Fig.4 Monthly variations of correlation coefficients between the standard chronology in different age-class trees and air temperature and precipitation

2.2.2 气候因子的生态模式

根据一系列的相关分析结果,该采样点的标准年表 STD 序列值与当年 5 月和前一年 9 月的温度呈显著的负相关,而与当年 5 月和前一年 9 月的降水量呈显著的正相关,因此建立转换方程如下:

$$W_t = 2.612 - 0.077T_{c5} - 0.012T_{p9} + 0.003P_{c5} + 0.003P_{p9}$$

$$N=39, r=0.733, R^2=53.7\%,$$

$$R_{adj}^2=48.3\%, F=9.86, P=0.000$$

式中, W_t 代表神农山采样点标准年表 STD 在 t 年的树轮序列值, T_{c5} 代表当年 5 月温度, T_{p9} 代表前一年 9 月温度, P_{c5} 代表当年 5 月降水量, P_{p9} 代表前一年 9 月降水量。

2.3 树木径向生长对 PDSI 的响应

为了更好地理解树轮宽度指数(STD)与气候要素的关系,这里从树轮宽度指数角度来分析不同年龄组对 PDSI 指数的相关分析,以对比不同年龄的树

木组对综合性气象指标的响应差异。

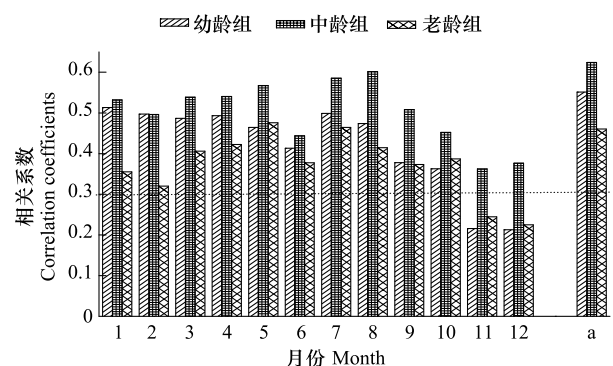


图 5 不同年龄组的 STD 指数与 PDSI 的相关分析(a 为前一年 11 月至当年 10 月平均值)

Fig.5 Monthly variations of correlation coefficients between the three age-class standard chronologies and PDSI(a represents mean from previous November to current October)

图 5 的结果可以看出,不同年龄组的树轮宽度指数与各月 PDSI 之间的相关也有一定的差异,尤其是中龄组各月都表现出较高的显著相关。对比与前

一年 11 月份至当年 10 月份平均值的相关,发现中龄组相关值最高(0.62),幼龄组相关值次之(0.55),老龄组最低(0.46),都远高于 95%置信水平之上,呈显著相关。由此可以看出,树轮的生长对 PDSI 指数的响应要比气温或降水量的响应要显著,更合适于重建该地区的 PDSI 指数序列。

2.4 PDSI 序列的重建

整个采样点的标准年表 STD 与前一年 11 月至当年 10 月 PDSI 值呈显著相关(0.594),因此建立了

转换方程如下:

$$PDSI_{p11-c10} = 3.7151Wt - 4.5221$$

$$N=35, r=0.588, R^2=34.4\%$$

$$R^2_{adj}=32.4\%, F=17.3, P=0.000$$

式中, $PDSI_{p11-c10}$ 代表从前一年 11 月至当年 10 月的 PDSI 平均值, Wt 代表神农山采样点标准年表 STD 在 t 年的树轮宽度值。 F 检验值为 17.3, $P=0.000$, 表明重建方程可靠。重建的 PDSI 曲线及 11 年滑动曲线如图 6 所示。

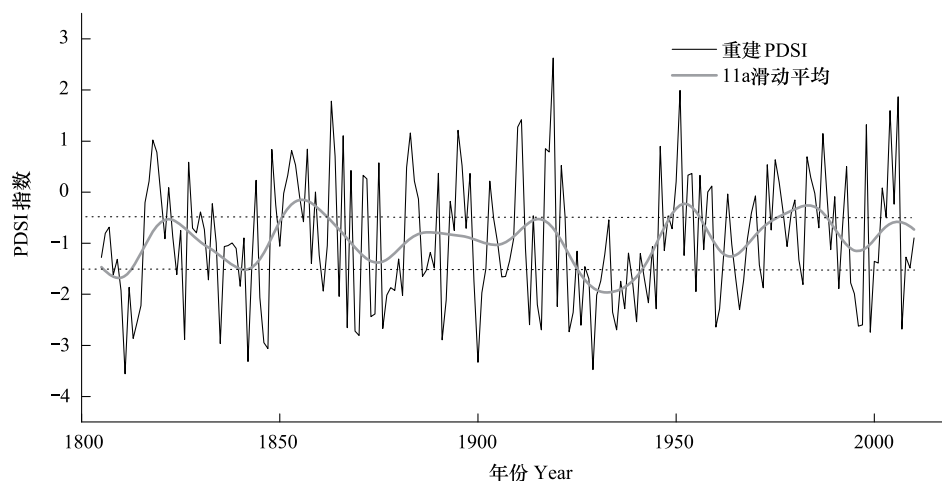


图 6 神农山地区 PDSI 的重建曲线和 11a 滑动平均曲线

Fig.6 Reconstructed PDSI series and 11year moving average curve of Shennong Mountain

重建方程的指数序列平均值为 -0.94 , 与 Li 等人^[25]在天山中部重建的 4—6 月 PDSI 值和梁尔源等人^[26]在浑善达克沙地重建的 5—7 月 PDSI 值及 Fang 等人^[27]在甘肃兴隆山重建的前一年 8 月到多年 7 月的年 PDSI 值几乎相同。根据研究区的实际情况和国内和研究结果^[25-27]等,把 PDSI 值介于 -1.0 ± 0.5 之间的范围视为神农山地区的正常湿润条件,把 $PDSI \leq -3.0$ 或 ≥ 1.0 作为判断极端干旱或湿润的临界值。

重建序列的多窗谱周期分析结果(图 7)显示, 2.7, 2.8 和 78.7a 的准周期最为显著,均超过 0.01 的显著检验;2.3, 2.4, 3.0, 5.1 和 36.6a 也较为显著,超过 0.05 的置信水平。

3 讨论

不同年龄组年表特征值显示,树木越老平均敏感度(M.S.)和标准差(S.D.)越大。老龄组样本的平均敏感度(M.S.)高,表明老龄树与气候变化关系密切;而标准差(S.D.)大则表明样本间的一致性差,老

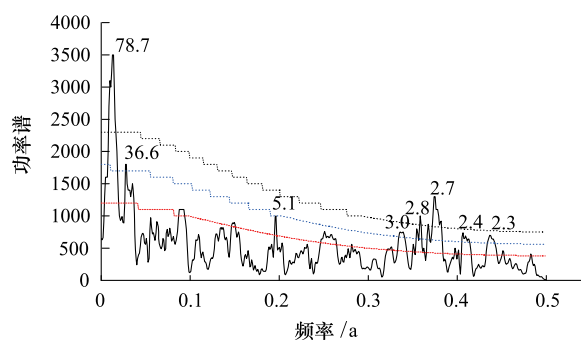


图 7 神农山地区 PDSI 的多窗谱周期分析结果(自上而下三条曲线分别代表 99%、95%和 90%的置信水平)

Fig.7 Spectrum analysis results of PDSI of Shennong Mountain (Top down three curves indicated the 99%, 95% and 90% significance level, respectively)

龄组样本的高标准差(S.D.)说明随着树龄的增长树木生长对气候变化响应的一致性减弱。不同年龄组的信噪比(SNR)和样本总体解释量(EPS)都是中龄组最高,老龄组最低,这些差异可能是不同年龄段白皮松的生理结构和功能差异引起的,年龄越大序列越长就会造成样本间的一致性减弱(也可能与本研

究样本量少,采样环境差异大有关),因而公共特征统计值就会减小。不同年龄组树轮宽度年表显示,树木越老敏感性越大但标准差也越大,幼龄树的“幼龄效应”显著,敏感性显著降低,但信噪比和样本总体解释量都较老龄树大,说明幼龄树中信息含量比较大,因此整体上说“幼龄效应”影响有限。这些与祁连山东部不同年龄组油松的研究结果非常相似^[17]。整个组的信噪比(SNR)和样本总体解释量(EPS)高于各个年龄组,可能是各个年龄组的信息组合或叠加的结果。

不同年龄组轮宽指数与气温的相关分析结果,可以看出幼龄组树木对温度的敏感性(即相关值)要高于老年组和中年组树木,尤其是前一年 10、12 和当年 5 月;对降水量的响应有很好的一致性,5 月显著相关明显地幼龄树弱于中龄树和老龄树,这与老龄树在蒸发速率增加的压力条件下,水阻力随着水压力的增加而增加,幼龄树不会因水阻力的增加而减少水的需求量^[28];对 5 月温度的响应,幼龄树和老龄树受温度的限制作用要强,而中龄树受温度的限制作用最小,这可能一方面与幼树的耐阴比中龄树较差有关;另一方面,幼树的根系较浅,表层土壤水分因气温变化、蒸散发加强而导致水分损失,结果加剧了水分的胁迫作用,从而抑制幼树的生长^[17]。对于老龄树而言,由于生理代谢和水分状况的差异,自身的体温较高^[29],5 月的高温会加剧树木水分的蒸腾作用,出现生理性缺水。

整个采样点的标准年表 STD 序列值与当年 5 月和前一年 9 月的温度呈显著的负相关,而与当年 5 月和前一年 9 月的降水量呈显著的正相关,表明生长季前期需要一定的热量和水分,但 5 月雨季还未到来,气温已经回升,较高的温度会造成土壤水分蒸发旺盛而水分亏损胁迫树木生长;9 月份处于生长季的末期,较多的降水,易使土壤水分含量增加,充足的营养物质及合适的土壤水分条件为来年树木的生长创造了有利的条件,这时如果长期处于晴好天气、温度较高,同样会造成土壤水分蒸发旺盛而水分亏损胁迫树木生长。因此,降水的多寡制约着树木的生长,即树轮指数与降水量的显著正相关具有明确的生理学意义,这和吕梁山南端白皮松群落的垂直结构研究结论——水分是限制群落发展的重要因素之一基本一致^[30]。从建立的当年 5 月和前一年 9 月

温度和降水量的生态模式可以看出,较高的解释量(53.7%)和调整解释量(48.3%)表明当年 5 月和前一年 9 月的水热组合对树木的生长影响很大。

PDSI 指数是充分考虑到降水、气温和土壤水分蒸发等多种因素,作为水分供需累积效应的一个近似度量,能够较好地指示土壤水分变化,表征土壤对于树木生长可供水量,同时也考虑了前期干旱的积累效应,能够体现降水对树木生长的滞后效应。鉴于气象站点与采样点高差较大,也存在一定的水平距离,本研究就选取了近年来比较关注的这个指标 PDSI。树轮年表与前一年 11 月至当年 10 月 PDSI 的相关呈显著正相关,相关值高于所有单月,表明白皮松生长受前一年 11 月至当年 10 月的水热组合影响明显高于各月的水热组合,年均 PDSI 是白皮松生长的主要限制因子,但从解释量和调整解释量上看,低于当年 5 月和前一年 9 月模式的解释量,显然水热的年份组合的影响要弱于当年 5 月和前一年 9 月的组合。不同年龄组的树轮宽度指数与 PDSI 之间的相关有一定的差异,尤其是中龄组各月都表现出较高的显著相关,而与前一年 11 月至当年 10 月 PDSI 平均值的相关都呈显著水平,其中龄组相关值最高(0.62),幼龄组相关值次之(0.55),老龄组最低(0.46),这显然是不同年龄段的植物生理作用需要不同水热而引起的。水热条件越好,水热都能满足树木生长,中龄树处于生长发育的生理旺盛时期,树木冠幅大叶片多、叶片内叶绿素含量高,光合作用强,所以生长越好;而老龄树随着生理机能的下降、叶片内叶绿素含量下降,对水热的有效利用减弱,即同化作用减弱、异化作用加强,大量有机物分解,光合速率下降^[29],所以生长最差。从吕梁山南端白皮松幼林种群研究中发现白皮松中前期增长、后期稳定的特点;幼林种群中径级存在一个死亡高峰(7.5—10cm 径级),而后个体间竞争相对平稳,数量减少趋于稳定^[31],这说明幼龄树与水热的相关可能因个体间竞争的存在而降低,因此幼龄树生长次于中龄树。

根据重建的 205a 的 PDSI 序列资料, $PDSI \leq -3.0$ 的极端干旱年份有 1811, 1842, 1847, 1900 和 1929 年;11a 的滑动曲线显示的 20 世纪 20 年代至 40 年代的 PDSI 值小于 -1.5 (正常湿润条件介于 -1.0 ± 0.5 之间)处于明显的干旱时期,与梁尔源

等^[32]利用树木年轮研究我国中西部地区 20 世纪 20 年代和 30 年代初的干旱一致,郑景云^[33]对黄河中下游地区过去 300a 降水变化研究中也发现 1916—1945 年是降水明显偏少的时段。与这一时段的历史记载^[34]基本一致:“民国九年(1920 年),豫自春徂秋雨泽稀少,亢旱情况实为数十年来所罕见,加以飞蝗肆虐,颗粒无收,农民转徙流离,道瑾相望”;“民国十七年(1928 年),豫春夏大旱,滴雨未降,夏秋继旱,麦歉收,秋禾枯,民饥”;“民国十八年(1929 年),豫春、夏、秋旱,夏数月不雨,麦禾未收,饥毙者无算。河流断,塘枯竭”;“民国二十五年(1936 年),河南省特大旱,自入夏至晚秋雨量特少,秋禾枯,止年底尚未得沛甘霖,灾情遍及全省,尤以豫西一带为惨重,受灾县达 76 个”;“1942 年,河南省大旱,春不雨,夏秋久旱,井涸塘竭,禾稼焦枯,饿殍盈野。延续到 1943 年春大旱,麦秋大部绝收,寥廓中原,赤地千里。那是的河南省三千万人,十之八九困于饥饿中,饿死者达三百万之多”。

重建序列中 78.7a 的显著准周期(超过 0.01 的显著检验),可能与东亚夏季风的近 80a 准周期有关^[35];重建中 36.6a 的显著准周期与太阳活动的 Bruckner 周期^[1]接近,与东亚夏季风 40a 准周期可能也有一定关系^[35];存在 2.3—5.1a 波动的显著准周期,可能和 ENSO 的周期变化有一定联系^[36],以前的研究同样揭示了 ENSO 对中国北部降雨的影响机制^[37-38]。因此,神农山地区干湿的变化可能与太阳活动、季风和 ENSO 的变化存在一定的关系。

5 结论

本研究以不同龄级分组研究为基础,清楚地了解神农山白皮松树轮宽度对该地区气候因子的响应,重建该区域的干湿变化规律。

(1) 本研究表明:不同年龄组树轮宽度年表敏感性都较高,树木越老敏感性越大,但中龄树信息含量最大。幼龄组树木受温度的限制作用较强,中龄树和老龄树对降水量的响应很好。与 PDSI 的相关表明水热年组合的影响大于月组合。

(2) 研究区树轮年表与当年 5 月和前一年 9 月的温度和降水量建立的树木生长模型可靠,其方差解释量为 53.7%,调整后为 48.3%,都通过 99.9% 的显著检验。

(3) 利用研究区的树轮宽度标准年表重建的 1805—2005 年时段的 PDSI 序列明显凸现出 1920—1945 年期间本研究区为严重的干旱期;多窗谱分析表明,神农山地区存在 2.3—5.1a、36.6a 和 78.7a 的准周期,其中 2.7、2.8、78.7a 准周期最显著,表明神农山地区干湿的变化与太阳活动、季风和 ENSO 的变化可能存在一定的关系。

致谢:焦作市旅游局和神农山风景区管理人员对工作给予帮助,兰州大学方克艳博士对对写作给予帮助,河南大学环境规划学院的彭卫、张伟杰、崔高仰参与采样和实验室工作,特此致谢。

References:

- [1] Gou X H, Deng Y, Chen F H, Yang M X, Fang K Y, Gao L L, Yang T, Zhang F. Tree ring based streamflow reconstruction for the upper Yellow River over the past 1234 years. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(33):3236-3243.
- [2] Cai Q F, Liu Y, Bao G, Lei Y, Sun B. Tree-ring-based May-July mean temperature history for Lüliang Mountains, China, since 1836. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(20):2033-2039.
- [3] Liu Y, Wang C Y, Hao W J, Song H M, Cai Q F, Tian H, Sun B, Linderholm H W. Tree-ring-based annual precipitation reconstruction in Kalaqin, Inner Mongolia for the last 238 years. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(25):2052-2059.
- [4] Editorial Committee of Silva of China. Silviculture Techniques of Main Tree Species in China. Beijing: Chinese Forestry Press, 1983:276-278.
- [5] Zhao Y, Zhang X Z, Wang X A. A study on geographical distribution law of *Pinus bungeana* natural forests in China. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 1995, 15(2): 161-166.
- [6] Liu Y, Lei Y, Song H M, Bao G, Sun B, Linderholm H W, Wang S G. The annual mean lowest temperature reconstruction based on *Pinus bungeana* (Zucc) ring width in the Yulin region, Shandong, China since AD 1616. Journal of Earth Environment, 2010, 1(1): 28-35.
- [7] Sun Y R, Mu Z G, Cui H T. Climatic reconstruction from the tree ring $\delta^{13}C$ values of *Pinus bungeana* during the past 70 years in Beijing. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(4): 85-90.
- [8] Zhao B L. Preliminary Investigation to *Pinus bungeana* natural communities in Baisongling Mountain. Journal of Henan Agricultural Sciences, 1982, 8:24-26.
- [9] Wu X D. Tree-ring and climate change. Beijing: Meteorology Press, 1990.
- [10] Cook E, Briffa K, Shiyatov S, Mazepa V. Tree ring standardization and growth-trend estimation//Cook E R,

- Kairiukstis L A, eds. Methods of dendrochronology. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, 1990, 104-123.
- [11] Yu G R, Liu Y B, Wang X C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in Qilian juniper (*Sabina przewalskii* Kom.). Trees, 2008, 22: 197-204.
- [12] Fritts H C. Tree rings and climate. Academic Press, New York, 1976.
- [13] Szeicz J M, MacDonald G M. Age-dependent tree-ring growth response of subarctic white spruce to climate. Canadian Journal Forest Research, 1994, 24: 120-132.
- [14] Colenutt M E, Luckman B H. The dendrochronological characteristics of *alpine larch*. Canadian Journal Forest Research, 1995, 25: 777-789.
- [15] Carrer M, Urbinati C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. Ecology, 2004, 85: 730-740.
- [16] Wang X C, Zhang Y D, Merae D J. Spatial and age-dependent tree-ring growth responses of *Larix gmelinii* to climate in northeastern China. Trees, 2009, 23 (4): 875-885.
- [17] Zhang F, Gou XH, Su J D, Gao LL, Liu W H, Man Z H. Age-dependent Responses of Tree Radial Growth of *Pinus tabulaeformis* to Climate in Eastern Section of the Qilian Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 634-639.
- [18] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree Ring Dating. Chicago: the University of Chicago Press, 1968.
- [19] Shao X M, Fang XQ, Liu H B, Huang L. Dating the 1000-year-old Qilian Juniper in Mountains along the Eastern Margin of the Qaidam Basin. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 90-100.
- [20] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-75.
- [21] Cook E R, Holmes R L. Users manual for ARSTAN. Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, Tucson, 1986.
- [22] Wei F Y. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007
- [23] Dai A G, Trenberth K E, Qian T. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870—2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5: 1117-1130.
- [24] Mann M E, Lees J. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. Climatic Change, 1996, 33: 409-445.
- [25] Li J B, Gou X H, Cook E R, Chen F H. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area, Northwest China. Geophysical Research Letter, 2006, 33: L07715, doi: 10.1029/2006GL025803.
- [26] Liang E Y, Shao X M, Liu H Y, Eckstein D. Tree-ring based PDSI reconstruction since AD 1842 in the Ortindag Sand Land, east Inner Mongolia. Chinese Science Bulletin, 2007, 52: 2715-2721.
- [27] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, Yang M X, Li J B, He M S, Zhang Y, Tian Q H, Peng J F. Drought variations in the eastern part of northwest China over the past two centuries: evidence from tree rings. Climate Research, 2009, 38: 129-135.
- [28] Ryan M G, Yoder B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth. Bioscience, 1997, 47: 235-242.
- [29] Li Q, Ma J X, Zhao F J, Shen Y B. Study of Physiological Characteristics of Ancient Tree in Jietai Temple and Tanzhe Temple of Beijing. Yunnan Forestry Science and Technology, 2004, 33(2): 37-41.
- [30] Bi R C, Cheng Y L, Yin D Z, Wei X Z, Li X Q, Huang L, Cui B Y, Wei W L. The study on *Pinus bungeana* community characteristics and species diversity in the south of Mt. Lüliang. Bulletin of Botanical Research, 2002, 22(3): 366-372.
- [31] Su J X, Sun J H, Tian Z P, Zhang J, Bi R C, Li X Q, Huang L, Cui B Y, Wei W L. Study on younger forest population structure of *Pinus bungeana* in the Lüliang Mountains. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2003, 23(2): 200-204.
- [32] Liang E Y, Shao X M, Huang L, Wang L L. The extreme drought in the 1920s and its effect on tree growth deduced from tree ring analysis: A case study in North China. Progress in Natural Science, 2004, 14(4): 469-474.
- [33] Zheng J Y, Hao X Z, Ge Q S. Variation of precipitation for the last 300 years over the middle and lower reaches of the Yellow River. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 35(08): 765-774.
- [34] Wen K G, Pang T H. The Meteorology Disaster Record over China—He'nan Volume. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 53-57.
- [35] Guo Q Y, Cai J N, Shao X M, Sha W L. Studies on the Variations of East-Asian Summer Monsoon during A D 1873—2000. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(2): 206-215.
- [36] Allan R. ENSO and climatic variability in the past 150 years. In: Diaz H, Markgraf V, ed. El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts. Cambridge University Press, Cambridge, 2000: 3-56.
- [37] Li J P, Zeng Q. A unified monsoon index. Geophysical Research Letter, 2002, 29(8): 1274, doi:10.1029/2001GL013874.
- [38] Lu R. Interannual variation of north China rainfall in rainy season and SSTs in equatorial eastern Pacific. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(18): 2069-2073.

参考文献:

- [1] 勾晓华, 邓洋, 陈发虎, 杨梅学, 方克艳, 高琳琳, 杨涛, 张芬. 黄河上游过去 1234 年流量的树轮重建与变化特征分析. 科学通报, 2010, 55(33): 3236-3243.
- [2] 蔡秋芳, 刘禹, 包光, 雷莺, 孙铂. 树轮记录的吕梁山地区公元 1836 年以来 5—7 月平均气温变化. 科学通报, 2010, 55(20): 2033-2039.

- [3] 刘禹, 王财勇, 郝文俊, 宋慧明, 蔡秋芳, 田华, 孙铂, Linderholm H W. 利用树轮宽度重建过去 238 年来内蒙古喀喇沁年降水量. 科学通报, 2011, 56(25): 2052-2059.
- [4] 中国树木志编辑委员会. 中国树木志(第一卷). 北京: 中国林业出版社, 1983: 276-278.
- [5] 赵焱, 张学忠, 王孝安. 白皮松天然林地分布规律研究. 西北植物学报, 1995, 15(2): 161-166.
- [6] 刘禹, 雷莺, 宋慧明, 包光, 孙铂, Linderholm H W, 王守功. 以白皮松树轮宽度重建公元 1616 年以来山东于林年平均最低气温. 地球环境学报, 2010, 1(1): 28-35.
- [7] 孙艳荣, 穆治国, 崔海亭. 北京地区近 70 年来白皮松树轮纤维素的碳稳定同位素与气候变化. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 85-90.
- [8] 赵保禄. 对白松岭区域内白皮松自然群落的初步调查. 河南农业科学, 1982, 8: 24-26.
- [9] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [17] 张芬, 勾晓华, 苏军德, 高琳琳, 刘文火, 满自红. 祁连山东部不同树龄油松径向生长对气候的响应冰川冻土, 2011, 33(3): 634-639.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第 2 版). 北京: 气象出版社, 2007.
- [26] 梁尔源, 邵雪梅, 刘鸿雁, Eckstein Dieter. 树轮所记录的公元 1842 年以来内蒙古东部浑善达克沙地 PDSI 的变化. 科学通报. 2007, 52(14): 1694-1699.
- [29] 李庆, 马建鑫, 赵凤君, 沈应柏. 北京市戒台寺、潭柘寺古树衰老的几个生理特征研究. 西部林业科学, 2004, 33(2): 37-41.
- [30] 毕润成, 成亚丽, 尹大泽, 魏学智, 李晓强, 黄磊, 崔本义, 尉文龙. 吕梁山南端白皮松的群落特征及其多样性的研究. 植物研究, 2002, 22(3): 366-372.
- [31] 苏俊霞, 孙建华, 田震平, 张杰, 毕润成, 李小强, 黄磊, 崔本义, 尉文龙. 吕梁山南端白皮松幼林种群结构的研究. 西北植物学报, 2003, 23(2): 200-204.
- [32] 梁尔源, 邵雪梅, 黄磊, 王丽丽. 中国中西部地区树木年轮对 20 世纪 20 年代干旱灾害的指示. 自然科学进展, 2004, 14(4): 469-474.
- [33] 郑景云, 郝志新, 葛全胜. 黄河中下游地区过去 300 年降水变化. 中国科学 D 辑, 2005, 35(08): 765-774.
- [34] 温克刚. 中国气象灾害大典(河南卷). 北京: 气象出版社, 2005: 53-57.
- [35] 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 沙万英. 1873—2000 年东亚夏季风变化的研究. 大气科学, 2004, 28(2): 206-215.