

DOI: 10.5846/stxb201603140451

李文卿, 江源, 赵守栋, 张凌楠, 刘钺. 六盘山地区油松树轮宽度年表与多尺度标准化降水指数的关系. 生态学报, 2017, 37(10): - .

Li W Q, Jiang Y, Zhao S D, Zhang L N, Liu T. Response of tree-ring width chronology of *Pinus tabulaeformis* to multi-scale standardized precipitation index (SPI_n) in the Liupan Mountain Area. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): - .

六盘山地区油松树轮宽度年表与多尺度标准化降水指数的关系

李文卿, 江源*, 赵守栋, 张凌楠, 刘钺

北京师范大学资源学院, 北京 100875

摘要: 研究利用在六盘山地区采集的油松树轮样芯建立树轮宽度标准年表(STD), 分别与不同长度时间单元(月、半月、旬)和多时间尺度的标准化降水指数(SPI_n)序列进行相关性分析。油松标准年表与不同长度时间单元 SPI 的相关结果显示, 较小的时间单元会使相关性表达更加精确, 而时间单元过小时则会因为数据波动性增大而导致相关关系弱化。因此, 相较于月和旬, 半月是相关性分析更为合适的时间单元长度。油松标准年表与多时间尺度 SPI 的相关结果显示, SPI 多时间尺度的特性有助于揭示油松径向生长对不同时间尺度水分状况的响应特征, 且油松在不同生长时期对于不同时间尺度水分状况具有相异的响应机制。在温度较低(<0℃)的冬季, 短时间内的降水并不利于树木生长, 而长时间良好的水分储备会为树木生长季需水提供保障; 在生长季前期, 长时间良好的水分状况比短期内的降水更有利于树木的生长; 在生长季, 补给性水分和土壤水分都对树木生长起着至关重要的作用。

关键词: 树轮生态学; 时间单元; 相关性变化; 标准化降水指数

Response of tree-ring width chronology of *Pinus tabulaeformis* to multi-scale standardized precipitation index (SPI_n) in the Liupan Mountain Area

LI Wenqing, JIANG Yuan*, ZHAO Shoudong, ZHANG Lingnan, LIU Tan

College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: This study generated a standard tree-ring width chronology by using *Pinus tabulaeformis* samples collected in the Liupan Mountain area and calculated the correlativity between standard chronology and SPI series, which covers three time units of different sizes (i.e., monthly, semi-monthly, and 10 day) and eight time scales. The result of correlation analysis between STD and SPI in different time units showed that semi-monthly was more suitable than monthly and 10 day units for correlation analysis because the shorter units lead a more accurate correlation expression, whereas very short units diluted the significant correlations. In addition, the correlation analysis between STD and SPI with multiple time scales showed that the multi-time scale characteristics of SPI revealed different responses of the radial growth of *Pinus tabulaeformis* to multi-scales water conditions. Trees exhibited response mechanisms to different water conditions in different growth units: 1) under the situation of low temperature, precipitation undermined the trees' growth in the short term, but promoted it in the long term; 2) in the pre-growing season, water conditions in long term were more beneficial than in the short term; and 3) in the growing season, sufficient precipitation at all time scales was crucial to the radial growth of *Pinus tabulaeformis*.

Key Words: dendroecology; time unit; correlation change; SPI

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41630750)

收稿日期: 2016-03-14; 网络出版日期: 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangy@bnu.edu.cn

树木的生长受到自身遗传因素和外界环境因素的共同影响^[1]。探究树木径向生长与气候变化之间的响应关系一直是树轮生态学的重要研究方面^[2-4],将树轮宽度年表与气候要素序列进行相关性分析是这类研究中十分常用的方法^[5-6],而气温和降水无疑是影响树木生长最重要的两个气候因子。现有研究大多采用气象站提供的气象观测数据或其它气候指数,将月、季度或年作为时间单元分析树轮与气候因子之间的关系,讨论不同时段气候因子对树木径向生长的制约作用。

基于研究需要,已有多种干湿指数被应用于树轮生态学领域^[5,7]。标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) 由 McKee 等人于 1993 年^[8]提出,经不断规范和完善^[9],现已成为一种被广泛认可和应用的表征区域干旱程度的重要指标^[10]。SPI 具有多时间尺度的特性,可以同时反映区域内不同时间尺度和不同方面的水资源盈亏状况;与降水量观测值相比, SPI 稳定性更强,对于降水量少、降水变率大的大陆性干旱半干旱气候区而言,该指数的应用能够有效规避极端观测数据的影响;与其它干旱指数相比, SPI 仅考虑降水单一要素,无须获取复杂的环境要素数据,使研究结果更易得到解释,其计算过程也相对简便^[11-12],与 SPEI 相比, SPI 对小区域水分状况的代表性更强,与 PDSI 相比, SPI 具有多时间尺度的特性。这些特点使 SPI 成为一种十分适合干旱半干旱地区树轮生态学研究应用的气候指标,有助于揭示树木生长在不同阶段对不同时间尺度干旱状况的响应规律。

目前,时间单元划分对树轮宽度年表与气候要素相关性表达产生的影响尚不明晰,树木径向生长对不同时间尺度水分状况的响应规律也有待研究。本文选择六盘山作为研究区域,利用油松 (*Pinus tabulaeformis*) 树轮宽度年表和气象站提供的观测数据;通过划分不同长度的时间单元,讨论时间单元长度对年表与气象要素相关性表达的影响;利用 SPI 多时间尺度的特性,揭示油松不同生长阶段径向生长对不同时间尺度水分状况的响应规律,为干旱区山地针叶林的管理和保护工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究使用的树轮样芯采集自宁夏回族自治区南部六盘山地区,采样点位于六盘山天然油松林分布的北界^[13]——须弥山(图 1)。研究区域所处的气候类型为典型的温带大陆性气候,受西伯利亚冷空气影响较大,终年干旱少雨,因此当地树木生长受干旱胁迫明显^[14],对气候变化的响应也十分敏感。

本文使用的气象观测数据来源于固原气象站 (106°16'E, 36°00'N, 海拔 1753 m), 计算 SPI 依据的原始数据为 1957—2011 年的日降水量连续观测序列。根据固原气象站实测资料计算,区域内多年平均降水量为 432.5 mm,其中 6—9 月降水量占全年总降水量的 73.9%;年均温为 6.7℃,最高月均温出现在七月,为 19.2℃,具有典型的大陆性半干旱气候特征。多年月平均气温和月降水分布情况如图 2 所示。

1.2 树轮宽度年表的建立

本文使用的油松树轮样芯采样时间为 2012 年 7 月,样品采集严格遵守树木年轮学的相关规范^[1]。在样点内选择生长状况良好、树龄较长、未受人工和自然灾害干扰的油松样树,计 25 株,沿平行和垂直坡向两个方向在每株样树 1.3 m 树高处用生长锥钻取样芯两根,共得到 50 根样芯。采样点的具体信息如表 1 所示。

表 1 采样点概况

Table 1 Summary of sampling site

采样点 Site	树种 Species	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	坡向 Slope aspect	坡度 Gradient	郁闭度 Canopy density	样本量(芯/树) Sample size (core/tree)
须弥山(XMS)	油松	36°17' N	105°54' E	1743	东偏北 37°	35°	0.4	50/25

采回的树轮样芯经晾干、固定、打磨等预处理后,进行交叉定年,用 LINTAB 轮宽测量仪测量样芯年轮宽度(测量精度为 0.01 mm),并用 COFECHA 程序对交叉定年和轮宽量测的结果进行检验和校正^[15],剔除个别

年份较短或对年表敏感性影响较大的序列。然后使用 ARSTAN 程序通过负指数函数拟合的方法去除树木生长趋势,得到三种树轮宽度年表(差值年表、标准年表和自回归年表)以及年表统计特征和公共区间分析结果^[16]。

1.3 标准化降水指数(SPI)的计算

SPI 表示区域某时间段降水量观测值相对于同期降水量长期状况可能出现的概率,值越高代表区域气候条件越湿润。Edwards 和 McKee 等人在分析大量历史资料后发现,降水量在长时间尺度上符合参数未定的 Gamma 分布^[17]。依据这一理论建立降水量概率分布函数,并根据已知的历史降水量观测序列用最大似然估计法估计未定参数的最似然值,得到概率分布函数,将其转化为标准正态分布,即为 SPI 的计算公式。使用者可以自由指定 SPI 的标度,即 SPI_n 表示前 n 个时间单元降水量的累积概率。 n 取值越大, SPI_n 能代表区域越长时间尺度的水分盈亏状况。不同标度的 SPI 可以直接区分由于短时降水过少引起的浅层土壤水分亏缺和由于长时降水过少引起的补给性水分亏缺(包括地下水位、深层土壤水分、水库水位等)^[11]。为保证估计待估参数的准确性,降水观测序列的时间跨度须在 40a 以上,且时间单元的长度应大于一周^[18]。 SPI_n 的具体计算方法如下^[14]：

①建立概率密度函数,积分得到概率分布函数

$$G(x) = \int_0^x g(x) = \int_0^x \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} dx, \quad z(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (1)$$

式(1)中, x 为计算序列内某时间单元降水量观测值, α, β 为待估参数;

②最大似然估计法计算待估参数:

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3}A}}{4A}, \quad \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}, \quad A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x_i)}{m} \quad (2)$$

式(2)中, m 为计算序列包含的时间单元个数, $\bar{x}$ 代表各时间段降水量均值, x_i 为序列内第 i 时间单元的降水量观测值;

③将式(2)带入式(1),令 $t = x/\hat{\beta}$ 替换变量,并将 $G(x)$ 转化为 Gamma 方程:

$$G(x) = \frac{1}{z(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (3)$$

避免降水序列中零值超出 Gamma 方程定义域的情况,做以下转换:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (4)$$

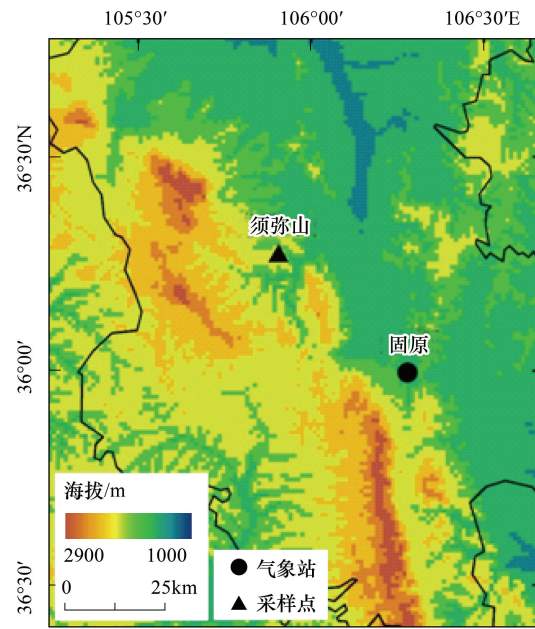


图1 采样点与气象站分布

Fig.1 Distribution of sampling site and meteorological station

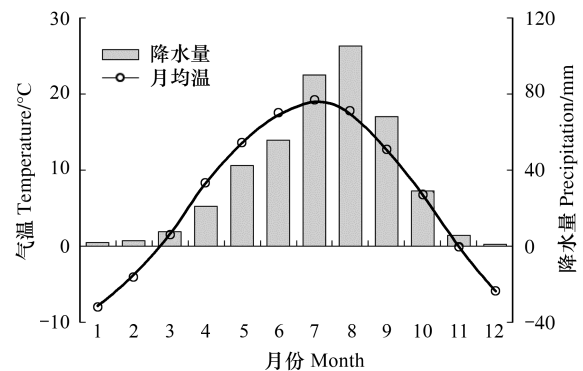


图2 固原气象站多年平均月均温和月降水量

Fig.2 Monthly precipitation and mean temperature for years in Guyuan meteorological station

式(4)中, q 为计算序列内降水量零值出现的概率;

④将式(4)代入式(3), 并将其转化为标准正态分布, 即得到 SPI 计算公式(5):

$$1^\circ: \text{当 } 0 < H(x) \leq 0.5 \text{ 时, } SPI = S(x) = - \left(a - \frac{c_0 + c_1 a + c_2 a^2}{1 + d_1 a + d_2 a^2 + d_3 a^3} \right), a = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{H^2(x)} \right]}$$

$$2^\circ: \text{当 } 0.5 < H(x) < 1 \text{ 时, } SPI = S(x) = \left(a - \frac{c_0 + c_1 a + c_2 a^2}{1 + d_1 a + d_2 a^2 + d_3 a^3} \right), a = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{[1 - H(x)]^2} \right]} \quad (5)$$

式(5)中, $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ 为 Gamma 函数标准化的固定常数项。

固原气象站可以提供 1957—2011 年的日降水量连续观测数据, 序列长度满足 SPI 计算的精度要求。将气象站提供的日降水量序列转变为月、半月、旬 3 种时间单元的降水量序列, 然后使用美国国家干旱减灾中心 (<http://drought.unl.edu>) 提供的 SPI 计算程序分别计算 3 种时间单元降水量序列不同标度的 SPI_n ($n=1, 2, 3, 6, 9, 12, 18, 24$) 供相关分析之用。

1.4 相关性分析

六盘山地区植物生长季一般在 8—9 月份结束^[13-14], 且树木生长会受前一年气候变化的影响^[19], 因此选择前一年 10 月到当年 9 月作为分析时段, 共包含 12 月、24 半月和 36 旬, 分别以 HM_i 和 TD_j ($p19 \leq i \leq 18, p28 \leq j \leq 27$) 表示半月和旬时间单元的序数, p 代表前 1 年。计算油松树轮宽度标准年表与不同时间单元、不同标度 SPI 序列的 Pearson 相关系数, 并进行双尾检验, 设置显著水平为 0.01 和 0.05, 相关性分析的时间序列跨度为 1958—2011 年, 自由度为 52。

2 结果

2.1 树轮宽度年表的建立

研究建立的年表由 46 组油松树轮宽度序列计算得到, 包含 1880—2012 年共 132 年的树轮宽度指数连续序列。本文使用树轮宽度标准年表 (STD, 图 3) 进行相关研究。

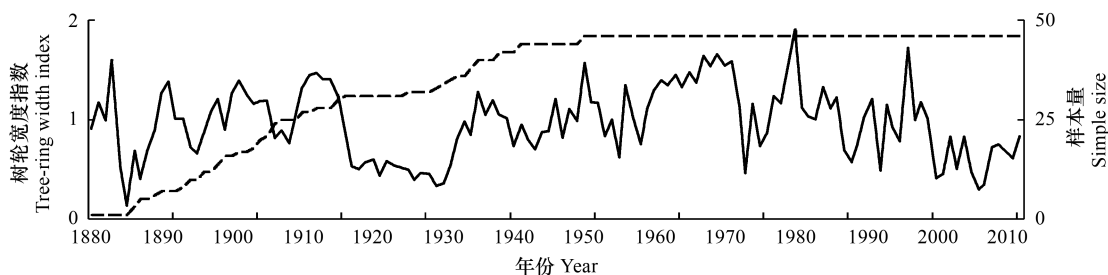


图 3 油松树轮宽度标准年表

Fig.3 Standard ring-width chronology of *Pinus tabulaeformis*

年表的统计特征可以反映树木生长的一些基本特征以及树轮年表包含环境信息的多少^[1], 许多重要指标直接决定年表的质量和使用价值。在树木年轮学中, 平均敏感性 (MS)、相关系数 (R_1, R_2, R_3)、信噪比 (SNR)、第一主成解释量 ($PC1$) 和样本总体代表性 (EPS) 等指标数值越大, 表示所选样本建立的年表对于群体的代表性越好、包含的环境信息越多^[1]。

本研究使用的油松树轮宽度标准年表样本总体代表性为 0.966, 大于 0.85 的最低阈值^[20], 平均敏感性、信噪比等也处于较高水平 (表 2), 这都表明研究使用的油松标准年表具有较高的可信度, 可以较好的反映当地气候变化, 适用于相关研究。

表 2 年表统计特征及公共区间(1935—2011)分析结果
Table 2 Chronology statistics and the results of common interval analysis (1935—2011)

年表统计量 Chronology staistics		公共区间分析 Common interval analysis	
样本量(树/芯) Trees/Cores	25/50	公共区间 Common interval	1935—2011
序列长度 Time span	1880—2012	所有样芯平均相关系数 R_1	0.480
指数均值 Mean indices	0.964	树间平均相关系数 R_2	0.470
标准差 Standard deviation	0.365	树内平均相关系数 R_3	0.832
平均敏感性 M.S.	0.287	信噪比 SNR	28.664
一阶自相关系数 AC1	0.607	第一主成解释量 PC1	0.509
		样本总体代表性 EPS	0.966

2.2 树轮宽度标准年表与不同时间单元 SPI_t 相关分析结果

2.2.1 半月时间单元对相关性的影响

从图 4 可以看到,将时间单元长度缩短到半月,树轮宽度年表与气候要素序列的相关关系出现在更短的时间段内。油松标准年表与当年 7、8 月份的 SPI_t 分别呈现显著的正相关和负相关关系($P<0.05$),而与 7 月、8 月范围内的 HM14 和 HM15 两个半月并未显示出显著的相关关系,显著相关关系出现在 HM13、HM16 两个半月内,且显著性水平在 HM13 提高到了 0.01。此外,将时间单元长度缩短到半月,还出现了时间单元为月时未表现出的显著相关;油松标准年表与当年 3 月 SPI_t 的负相关关系没能通过显著性检验,而在同时间范围内与半月 HM5 却表现出极显著的负相关关系($P<0.01$)。综上,将时间单元缩短到半月,不仅精确了相关关系出现的时段,还避免了时间单元过大时对显著相关关系的掩盖。

2.2.2 旬时间单元对相关性的影响

时间单元的长度进一步缩短到旬,相较于月和半月,油松标准年表与 SPI 的相关关系出现在了更短的时间段内:1)油松标准年表与前一年 12 月 SPI_t 呈显著正相关关系($P<0.01$),而仅与相同范围内 TDp34 和 TDp36 的 SPI_t 呈显著正相关关系;2)油松标准年表并未与当年 9 月 SPI_t 出现显著相关,却与其范围内 TD26 的 SPI_t 呈现显著的正相关关系($P<0.05$)。时间单元长度缩短到旬,某些时段的相关关系出现弱化,从图 4 可以看到:1)在 HM5,油松标准年表与 SPI_t 有极显著的正相关关系($P<0.01$),而与相同时段 TD7 和 TD8 两旬 SPI_t 相关关系的显著性水平仅为 0.05;2)油松标准年表与当年 2 月 SPI_t 的相关关系在时间单元长度缩短后虽未出现显著水平的下降,但相关系数出现了明显的减小;3)油松标准年表与当年 HM1 有极显著的正相关关系($P<0.01$),但在时间单元缩短到旬以后,未出现显著的相关关系。

2.3 树轮宽度标准年表与不同时间尺度干旱的响应关系

在讨论树木径向生长与不同时间尺度干旱响应关系的差异时,时间单元的长度选择较为适中的半月。研究计算了短期($SPI_n, n=1,2,3$)、中期($SPI_n, n=6,9,12$)、长期($SPI_n, n=18,24$)3 类共 8 组不同时间尺度的 SPI 序列与油松标准年表进行相关性分析。短期 SPI 可以反应区域短时间降水状况影响的土壤水分的盈亏状况,中长期 SPI 则可以反映区域长时间降水状况影响的补给性水分的盈亏状况^[9,11]。从图 5 中可以看到,油松树轮宽度年表与 SPI_n 序列的相关关系随 SPI 标度的增大变化很大,尤其是短期和长期之间的差别,在某些时间段甚至出现了相关关系正负方向的转变。

研究结果如图 5 所示:1)在前 1 年秋季(HMp19—p22),油松标准年表与短期 SPI 的相关关系并不显著,而与中长期的 SPI 有显著的相关关系,且显著性大都在 0.01 以上;2)在温度低于冰点的时间段(HMp23—7),油松标准与短期的 SPI 几乎都有极显著的负相关关系($P<0.01$),而与长期的 SPI 有极显著的正相关关系($P<0.01$),与中期 SPI 的关系比较复杂,与 SPI_6 大都呈现显著的负相关关系($P<0.05$),与 $SPI_{9,12}$ 在时间段 HMp23—2 有显著的正相关关系($P<0.05$),在时间段 HM5—7 有显著的负相关关系($P<0.05$);3)在当年生长季前期(HM8—10),油松标准年表仅与长期的 SPI 表现出极为显著的正相关关系($P<0.01$),而与其它标度的 SPI 没有显著的相关关系;4)在生长季(HM11—16),油松标准年表与所有标度的 SPI 表现出正相关关系,与

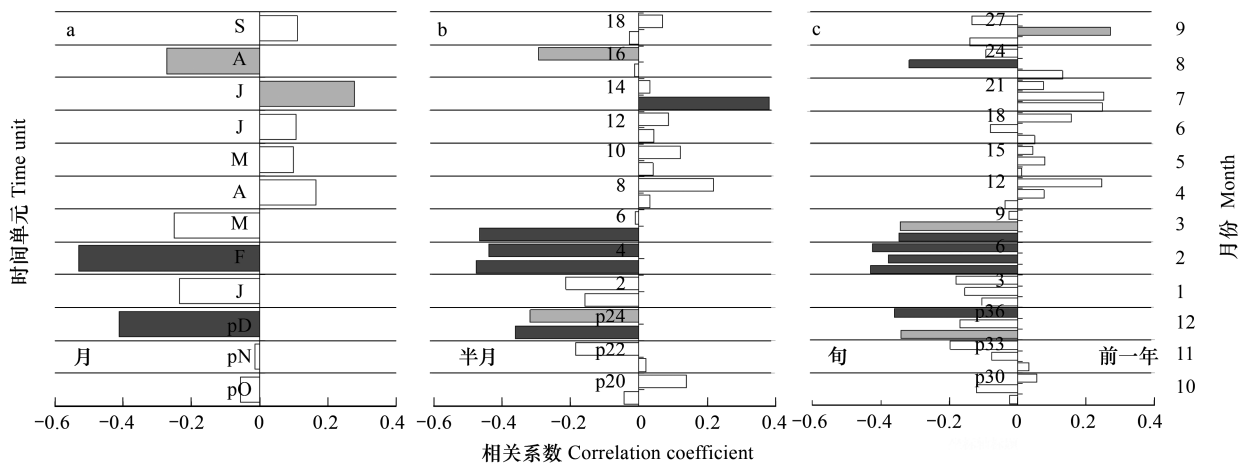


图4 六盘山油松标准年表与不同长度时间单元 SPI_1 相关分析结果

Fig.4 The correlation coefficients of standard tree-ring width chronologies with three SPI_1 series

三幅条形图分别代表月、半月和旬3种时间单元的相关分析结果,横轴为相关系数,纵轴为时段;pO-S代表前1年10月到当年9月,p19—18代表前1年第19半月到当年第18半月,p28—27代表前一年第28旬到当年第27旬;黑灰白色填充分别代表 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 和不显著相关

SPI_{24} 在整个生长季都呈现极显著的正相关关系($P < 0.01$),而与其它标度 SPI 仅在 HM13—14 有显著的正相关关系($P < 0.05$);5)油松标准年表与当年秋季(HM17—18)各标度的 SPI 均未表现出显著的相关关系。

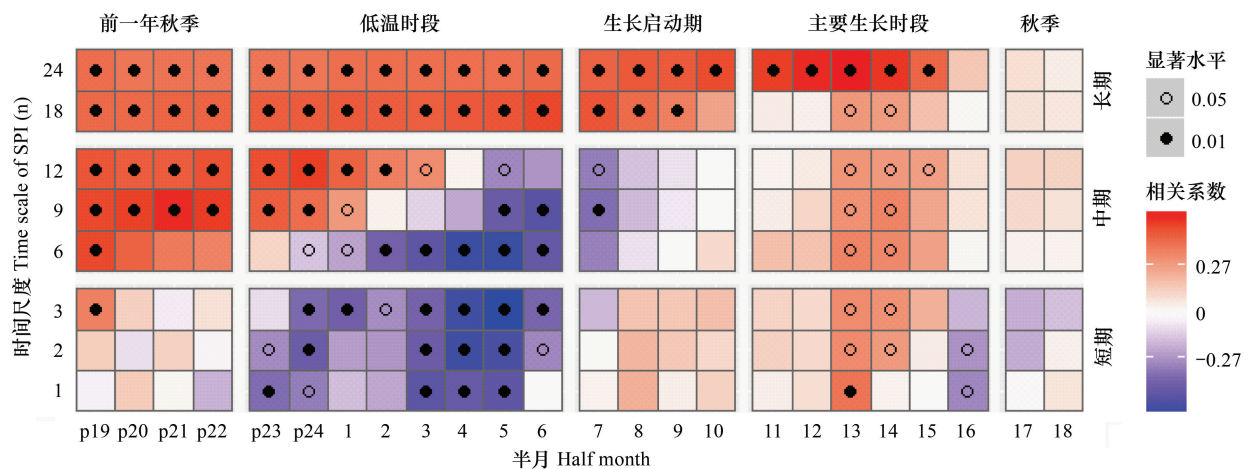


图5 年表与 SPI_n 相关关系瓦片图

Fig.5 Tiles figure of correlations between chronology and SPI_n

图中横轴为半月时段(从前一年第19半月到当年第18半月),纵轴为 SPI 标度;蓝色代表负相关关系,红色代表正相关关系,颜色越深相关程度越高;空心圆和实心圆标记分别代表 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$

在讨论油松生长对不同时间尺度 SPI 的响应机制时,应注意温度在其中起到的重要作用^[21]。从图6可以看出:前1年11月到当年3月是研究区域的低温时段($< 0^\circ\text{C}$),气温在3月之后逐渐回暖并在当年9月重新回落;油松树轮宽度年表与前1年11月以及当年4月—7月的气温有显著的负相关关系(4月、6月、7月: $P < 0.01$;前1年11月、5月: $P < 0.05$)。

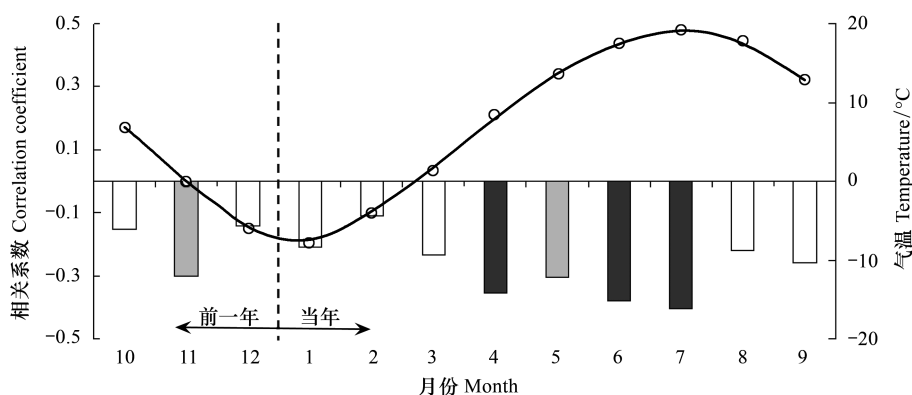


图 6 油松标准年表与六盘山气象站平均(1958—2011)月均温相关分析结果

Fig.6 The correlation coefficients of standard tree-ring chronology with monthly mean temperature

图中条形图黑灰白色填充分别代表 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 和不显著相关;折线图代表一个生长周期内逐月平均气温的变化

3 讨论

3.1 不同时间单元对相关性的影响

低温时段的降水(SPI_1)以雪和冻雨的形式对树木机体造成伤害(如折断枝条等),消耗存储的营养物质,对树木生长不利,这一观点得到诸多研究的支持^[22-24]。如图 6 所示,前 1 年 12 月至当年 3 月是当地油松生长周期最冷的时间段,平均温度普遍在冰点以下,这正解释了油松标准年表与此时间段降水(SPI)出现的负相关关系。

油松标准年表与不同时间单元 SPI_1 相关性分析的结果显示,油松生长与当年 3 月 SPI_1 没有显著的相关关系,却与同时间段(3 月)上半月(HM5)和上中两旬(TD7, 8)有显著的负相关关系,即短时降水在 3 月的上半月对树木生长不利,在下半月却对树木生长影响不大。如果这一现象得到合理解释,就可以说明以月份为时间单元进行相关性分析会掩盖许多相关信息,更小的时间单元可以精确相关关系出现的时间段。

从图 7 可以看出,3 月是该区域气温从 0°C 以下恢复到以上的节点月份。在 3 月上半月(HM5),有 16.4% 的年份均温在冰点以上,而在下半月(HM6)这一比例高达 87.3%,3 月上中下旬(TD7, 8, 9)的这一比例分别是 16.4%、67.3% 和 94.5%。由此可见,3 月上半月(HM5)温度较低,降水易以雪和冻雨的形式出现对树木生长造成不利影响,而下半月(HM6)较暖,降水对树木生长的影响甚微。可见,在半月 HM5 和旬 TD7, 8 出现的显著负相关关系并非数据偶然,在树木生长对水分要求不大的时期,较低的温度通过改变降水型态进而影响树木的生长。以月为时间单元仅可以显示出相关性在 2 月到 3 月发生变化(由显著负相关到不显著相关),而以半月和旬为时间单元可以展示相关性变化更精确的时间段。所以,时间单元缩短可以避免较大时间单元对某些相关关系的掩盖,精确相关关系出现的时间段,显示树木生长对降水(SPI_1)显影机制转变的准确时间。

7 月是树木生长的关键时期,需要大量水分满足生长所需。在此时间段,温度越高土壤水分的蒸发也就越强,土壤水分流失越快,树木生长对补给性水分和即时降水的需求也就越高。因此,油松标准年表与 7 月降水(SPI_1)呈显著正相关关系($P < 0.05$),而与 7 月气温呈显著负相关关系($P < 0.01$)。在 7 月时段,时间单元为月和半月时,年表与 SPI_1 的显著正相关关系得以正确表达,而当时间单元长度缩短到旬时,油松标准年表与 7 月上中下三旬(TD19, 20, 21) SPI_1 的相关关系均不显著。应表现的相关关系并未得到表达,主要是因为旬(10 日)已接近 SPI 计算要求的最短时间单元(7 日)^[18],降水在短时间段波动性和随机性较大的特点显现,导致 SPI 的准确性和代表性不足,无法准确反映树木生长与该时段降水的相关关系。

综上,在进行树轮宽度年表与气候因子相关性分析时,较小的时间单元可以避免过大时间单元对相关关系的掩盖,也会使相关关系的表达更加精确,但当时间单元过小时,由于波动性和随机性的增强,反而会弱化

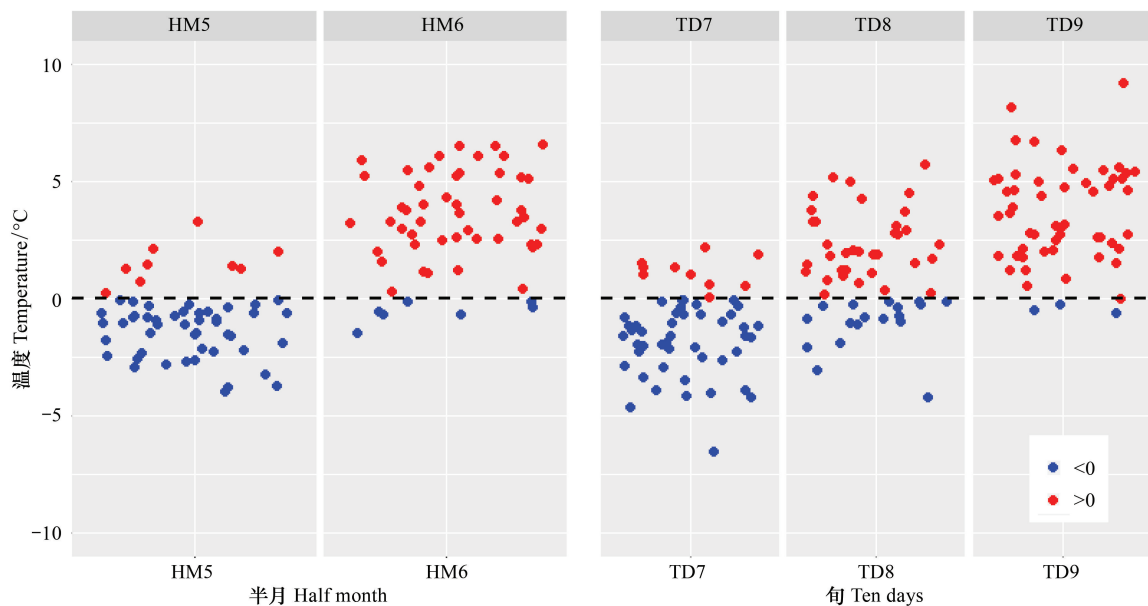


图7 1957—2011 各年三月份上下半月及三旬均温分布

Fig.7 Jitter point figure of mean temperature of two halves and three periods of 10 days of March from 1957 to 2011

图中横轴为时间单元序号,纵轴为平均温度;点代表 1957—2011 年每 1 年的相应时间单元的平均温度,其中红蓝色分别代表对应均温大于和小于 0°C

应有的相关关系。对于须弥山油松,月并不一定是相关关系表达的最优时间单元,半月是相对更为合适的选择。

3.2 油松标准年表与不同时间尺度 SPI 相关关系的差异

由于前 1 年秋季(HMp19—p22)距油松当年生长季较远,此时段短期降水并不会对油松当年的生长造成影响,而中长期的水分状况却可以通过影响区域的补给性水分状况影响树木当年的生长,因此油松标准年表与中长期 SPI 有显著正相关关系($P < 0.05$)。

气温的变化影响油松径向生长对降水(SPI_n)的响应规律^[21],在气温低于冰点的时段(HMp23—6),短时间内的降水会以降雪和冻雨的形式对油松机体造成损伤^[22-24],影响树木下一阶段的生长;而长期内充足的降水会以深层土壤含水或地下水的形式为油松下一阶段的生长提供充足的水分补充。因此,油松标准年表与 SPI 的相关关系随 SPI 标度 n 的增大出现由负到正的变化。

在生长恢复期(4—5 月, HM7—10),油松生长与温度有显著的负相关关系($P < 0.05$),而与中短期 SPI($n < 12$)没有显著的相关关系,温度是该时段限制树木生长的主要因子,这与董满宇^[25]、田沁花^[26]等人的研究结果一致。在此阶段,油松脱离休眠状态,光合速率较慢,较高的温度促进植株的蒸腾作用,从而延缓茎干水分的恢复过程,影响树木径向生长^[25]。与长时间尺度 SPI 的显著正相关关系($P < 0.01$)说明,长期内充足的降水仍然会为油松快速生长期的生长提供水分保障。

在生长季(HM12—15),植株生长旺盛,需水量大,较高的温度加速土壤水分蒸发使水分状况更加严峻。油松的生长不仅需要长期补给性水分的积累,也需要短期即时降水的补充,表现出与所有标度 SPI 的显著正相关关系($P < 0.05$),长期和短期的水分状况以及温度共同影响此阶段油松的生长过程。8 月下半月(HM16)已接近生长季尾,植株生长速率放缓,对补给性水分(SPI_{6-24})的需求不大,短期内较多的降水(SPI_{1-2})反而意味着阳光遮蔽的多云天气,光合作用因光照不足受到抑制,对油松生长造成不利影响^[22]。

在当年秋季,温度逐渐降低,树木径向生长基本停滞,加之温度逐渐降低使土壤保水能力增强,此时间段内的降水状况不会对当年的树木生长造成显著影响,而是转而影响下一年的树木生长,因此在此时期,油松标

准年表与各标度 SPI 均没有显著的相关关系。

油松树轮宽度标准年表与不同标度标准化降水指数的相关分析结果显示,油松在不同的生长阶段对不同时间尺度水分状况的响应关系有明显差异,这种差异很有可能是由特定生长环境下形成的树木自身生长规律导致的^[27]。

4 结论

研究利用采集自六盘山地区的树轮样芯建立树轮宽度标准年表,通过与不同时间单元长度及多时间尺度标准化降水指数的相关分析,结合已有研究结果,得到以下主要结论:

1)在进行树轮宽度年表与气候要素序列相关性分析时,时间单元缩短可以使相关关系的表达更加精确,但同时也需要承担由于气候要素在短时间单元波动性和随机性增大造成的相关关系弱化的风险。就须弥山地区的油松而言,月份并不一定是最适时间单元,半月是相对折中的选择。但由于气候状况和树种生理特性的差异,该规律的普适性仍需进一步验证。

2)SPI 是一种便于计算、稳定性强的气候指数,适用于干旱半干旱区树木生长与气候关系的分析研究。借助 SPI 多时间尺度的特性,研究可以揭示油松径向生长对不同时间尺度和不同方面水资源状况的响应特征:短期降水在温度较低的时期对六盘山地区树木生长有不利影响;在生长季中,油松对短期、中期和长期的水分条件均有显著响应,由较高气温和较少降水造成的干旱是限制油松径向生长的主要因素;而在非生长季,油松更趋向于对中长期水分状况有所响应。

参考文献 (References):

- [1] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [2] Zhang W T, Jiang Y, Dong M Y, Kang M Y, Yang H C. Relationship between the radial growth of *Picea meyeri* and climate along elevations of the Luyashan Mountain in North-Central China. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 142-149.
- [3] Wang H, Shao X M, Jiang Y, Fang X Q, Wu S H. The impacts of climate change on the radial growth of *Pinus koraiensis* along elevations of Changbai Mountain in northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289: 333-340.
- [4] Boden S, Kahle H P, Von Wilpert K, Spiecker H. Resilience of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growth to changing climatic conditions in Southwest Germany. *Forest Ecology and Management*, 2014, 315: 12-21.
- [5] 方克艳, 勾晓华, 陈发虎, 彭剑峰, 刘普幸, 王茂, 朱有明. 树轮生态学研究进展. 冰川冻土, 2008, 30(5): 825-834.
- [6] Li Z S, Shi C M, Liu Y B, Zhang J L, Zhang Q B, Ma K Q. Summer mean temperature variation from 1710-2005 inferred from tree-ring data of the Baimang Snow Mountains, northwestern Yunnan, China. *Climata Research*, 2011, 47(3): 207-218.
- [7] Kempes C P, Myers O B, Breshears D D, Ebersole J J. Comparing response of *Pinus edulis* tree-ring growth to five alternate moisture indices using historic meteorological data. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(4): 350-357.
- [8] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston: American Meteorological Society, 1993.
- [9] Guttman N B. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(2): 311-322.
- [10] Wu H, Hayes M J, Weiss A, Hu Q. An evaluation of the standardized precipitation index, the China-Z index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(6): 745-758.
- [11] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 523-529.
- [12] Touchan R, Funkhouser G, Hughes M K, Erkan N. Standardized precipitation index reconstructed from Turkish tree-ring widths. *Climatic Change*, 2005, 72(3): 339-353.
- [13] 王梦麦, 戴君虎, 白洁, 崔海亭. 利用树木年轮重建六盘山地区 1900 年以来的干湿变化. *古地学报*, 2009, 11(3): 355-360.
- [14] 李文卿, 范宽, 刘颖慧, 张凌楠, 江源. 六盘山地区油松 (*Pinus tabulaeformis*) 径向生长对气候因子的响应. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(1): 105-110.
- [15] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [16] Cook E R. A time series analysis approach to the tree ring standardization[D]. Tucson: University of Arizona, 1985.

- [17] Edwards E C, McKee T B. Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. Paper No. 634, Climatology Report No. 97-2. Colorado: Colorado State University, 1997.
- [18] Guttman N B. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 113-121.
- [19] 王亚军, 马玉贞, 郑影华, 鲁瑞洁, 桑艳礼, 蒙红卫. 宁夏罗山油松 (*Pinus tabulaeformis*) 树轮宽度对气候因子的响应分析. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 971-976.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 张文涛, 江源, 王明昌, 张凌楠, 董满宇, 郭媛媛. 芦芽山阳坡不同海拔白杆径向生长对气候变暖的响应. *植物生态学报*, 2013, 37(12): 1142-1152.
- [23] Gedalof Z, Smith D J. Dendroclimatic response of mountain hemlock (*Tsuga mertensiana*) in Pacific North America. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(2): 322-332.
- [24] Dang H S, Jiang M X, Zhang Q F, Zhang Y J. Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling Mountain, China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1/3): 143-150.
- [25] 董满宇, 江源, 杨浩春, 王明昌, 张文涛, 郭媛媛. 芦芽山林线白杆生长季径向生长动态. *植物生态学报*, 2012, 36(9): 956-964.
- [26] 田沁花, 刘禹, 蔡秋芳, 包光, 王伟平, 薛文亮, 朱文杰, 宋慧明, 雷莺. 油松树轮记录的去 134 年伏牛山 5-7 月平均最高温度. *地理学报*, 2009, 64(7): 879-887.
- [27] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, Beguería S, Trigo R, López-Moreno J I, Azorin-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Moran-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(1): 52-57.