

DOI: 10.5846/stxb202003040406

刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 买尔当·克依木. 近 40 年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2020, 40(24): 9108-9119.

Liu Y L, Xin Z B, Li Z S, Maierdang Keyimu. Climate effect on the radial growth of *Populus simonii* in Northwest of Hebei for last four decades. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9108-9119.

近 40 年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异

刘亚玲¹, 信忠保^{1,*}, 李宗善², 买尔当·克依木²

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:运用树木年轮气候学方法,研究近 40 年河北坝上地区健康和衰退小叶杨人工林径向生长对气候响应敏感性差异,揭示健康和衰退杨树生长与气候关系的时间变异规律。结果表明:(1)衰退杨树径向生长对温度、降水等气候因素响应较健康杨树敏感。衰退杨树年表中的气候信号较强,与当年生长季(4、8—10 月)的气温因素呈显著负相关,与上一年休眠期(9 月—当年 1 月)和当年生长季(7 月)的降水和相对湿度呈显著正相关。健康杨树年表中气候信号较弱,主要与上一年冬季(12 月)和当年生长季(4 月)的气温因素呈显著负相关,与上一年生长末期(8—11 月)降水和相对湿度呈显著正相关。(2)从各年表与帕默尔干旱指数(PDSI)的响应强度来看,衰退杨树生长更易受夏季干旱胁迫影响。衰退杨树年表与上一年 9 月—当年 3 月、6—10 月的 PDSI 呈显著正相关,而健康杨树径向生长与 PDSI 呈弱的正相关。(3)1975—2017 年间,随气温升高,健康和衰退杨树生长对温度的敏感性下降;健康杨树生长对降水和 PDSI 的敏感性较为稳定,适应能力强,而衰退杨树生长对降水和 PDSI 的敏感性增强,适应能力变弱。综上所述,干旱胁迫是限制衰退杨树生长的主要因素,而健康杨树生长受气候影响较弱,能适应当地气候条件。衰退杨树对气候变化响应较健康杨树明显,在气候变暖背景下,衰退杨树生长的气候限制因子由温度转变为水分,导致河北坝上地区遭受干旱灾害时发生退化的趋势更加明显。

关键词:河北坝上;小叶杨;衰退;径向生长;气候响应

Climate effect on the radial growth of *Populus simonii* in Northwest of Hebei for last four decades

LIU Yaling¹, XIN Zhongbao^{1,*}, LI Zongshan², Maierdang Keyimu²

1 College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Dendroclimatic methods have been used to establish standard chronologies for the healthy and the declining trees of the *Populus simonii* artificial forest in northwest of Hebei Province over the past four decades. Correlation analyses were conducted between these chronologies and local climatic factors to establish the temporal variations of the growth-climate relationship for the the healthy and the declining trees of the *Populus simonii* forest. The results showed that (1) the tree-ring growth of the declining trees was more sensitive to meteorological factors than that of the healthy trees. The series of tree-ring widths of the declining trees exhibited significantly negative correlations with the temperature factors in April and

基金项目:京津风沙源人工林与土壤水分互馈机制(2017ZY02);国家自然科学基金项目(41877539)

收稿日期:2020-03-04; 网络出版日期:2020-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinzhongbao@126.com

from August to October of the current year; meanwhile, it yielded positive correlations with total precipitation and relative humidity from September of the previous year to January and for July of the current year. For the healthy trees, the series was significantly negatively correlated with the temperature factors for December of the previous year and April of the current year and positively correlated with the total precipitation and relative humidity from August to November of the previous year. (2) From the chronological response to the Palmer Drought Index (PDSI), the declining trees were more susceptible to summer drought stress. The tree-ring width series of the declining trees had a strongly positive correlations with the PDSI from September of the previous year to March of the current year, whereas from June to October of the current year, while the healthy trees were weakly affected by drought. (3) As the temperature rose from 1975, the temperature sensitivity of the healthy and the declining trees decreased, and the PDSI and total precipitation sensitivity of the declining trees increased; meanwhile, the healthy trees were stable. In summary, drought stress was the main factor limiting the growth of the declining trees, whereas the healthy trees were less affected by climate and could adapt to local climatic conditions. The declining trees were more sensitive to climate change than the healthy trees. With the warming and drying, the climatic limiting factor of the declining trees will change from temperature to moisture, which leads to a more pronounced trend of degradation during drought stress.

Key Words: Hebei Province; *Populus simonii*; declining; tree growth; climate response

我国西北、华北及东北西部地区,风沙灾害和水土流失严重,为减少自然灾害,改善其生态环境,于 1978 年批复建设三北防护林体系建设工程^[1]。自工程实施以来,我国三北地区植被覆盖率显著提高,森林覆盖率由 5.05% 增加到 13.57%,尤其华北地区植被覆盖率增长最快,人工林面积逐年增加^[2-4]。河北省张家口坝上地区杨树防护林是三北工程华北地区的重要组成部分,是预防京津冀沙尘天气发生和生态安全的重要保障,在防风固沙、降低风速、保持水土、涵养水源、调节小气候等方面发挥着至关重要的作用^[5-7]。

近年来,该区域杨树防护林出现了明显衰退现象,退化杨树面积占杨树防护林总面积的 4/5,其中濒临衰退和枯死杨树面积达到 $3.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占杨树防护林总面积的 1/3,主要表现为林木生长不良、大面积枯死和病虫害频发,防护林防护功能明显下降^[8-9]。已有诸多学者从树木生理过程^[9-11]、土壤理化性质^[12]、气候变化^[13-14]、病虫害^[12,15]以及人为因素^[13]等方面研究了该地区杨树防护林的衰退问题,但该区域杨树衰退的具体原因未能明确。树木年轮可以记录其过去径向生长过程^[16-18],为研究杨树对生长环境和气候变化的响应提供了难得契机,可以通过比较健康和衰退杨树的径向生长过程了解其衰退原因。

张北地区属于半干旱地区,受全球气候变化影响显著,自 20 世纪 80 年代以来,该地区温度持续上升,降水量减少,呈现暖干化趋势^[19],会对当地杨树人工林径向生长产生巨大影响。最新研究表明气候暖干化可能促进部分地区树木的生长^[20-21],也会抑制部分地区树木的生长^[21-22]。气候变化对不同区域不同树种生长的影响具有很大的区别。如在我国东北地区气候变暖引起土壤水分降低,干旱胁迫严重限制了红松、红皮云杉^[23]的径向生长,西藏地区温度升高限制了拉萨河流域大果圆柏生长,而在西北天山地区,温度升高促进了雪岭云杉林的生长^[20]。在同一地区不同物种对气候变化响应也有所不同,如小兴安岭地区黄菠萝径向生长随温度的升高而增加,而蒙古栎出现降低趋势^[21]。气候变化对树木生长的影响会随区域和树种的不同而产生较大差异,需要开展张北地区杨树生长对气候变化的响应研究,对全面了解气候变化背景下树木生长动态具有重要意义。

利用树木年轮气候学方法,以该地区广泛种植的小叶杨(*Populus simonii*)为研究对象,通过采集健康和衰退杨树树芯,研究了健康和衰退杨树径向生长对气候因素响应的差异以及气候变化对杨树生长的影响。研究有助于提升当前河北坝上地区三北防护林衰退过程与机制的认识,为全球气候变化背景下坝上地区过熟人工林经营与改造提供科学参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区二台镇林场位于河北省张家口市张北县境内,海拔 1370—1390 m,面积为 6.4 km²(图 1)。地处内蒙古南缘的坝上高寒区,属中温带大陆性季风气候,光照充足,昼夜温差大,干旱、多风、少水、无霜期短,年平均气温为 1—6 ℃,年降水量在 400 mm 左右,多集中于夏季(图 2)。研究区年平均日照时数 2897.8 h,年平均 7 级以上大风日数 30 天左右。该地区土壤风蚀严重,主要地带性土壤为栗钙土,土壤 pH 为 5.52—7.37。植被以 20 世纪 70 年代种植的小叶杨(*Populus simonii*)为主,造林时使用的是一年生扦插苗,初植密度偏大,后期抚育管理措施(间伐、肥水等)缺乏,现存杨树树龄基本一致,密度在 769—1849 株/hm²之间^[9]。其它防护林种还包括青杨(*Populus cathayana*)、北京杨(*Populus beijingensis*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等。样地中的杨树为小叶杨,包含健康和衰退杨树。

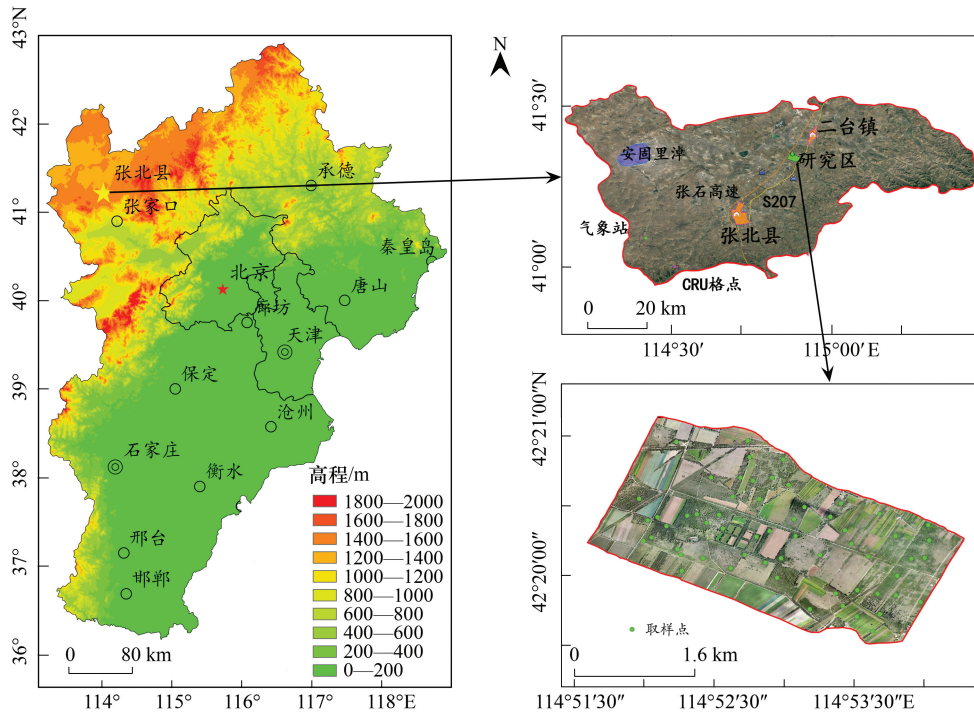


图 1 张北地区树木年轮采样点及气象站分布图

Fig.1 Location map of tree-ring sample site and meteorological station in Northwestern of Hebei, China

1.2 样品采集及年表建立

2018 年 7—8 月,在张家口市张北县二台镇林场采集健康和衰退的杨树树芯样品。研究以枯梢率来划分健康和衰退杨树,是指枯梢梢长度占树高的百分比(%)。当杨树枯梢率低于 20%时就将其定义为健康杨树,当枯梢率在 20%之上时将其定义为衰退杨树。用 5.15 mm 的生长锥在胸径(1.3 m)处沿东西方向钻取树芯。为对杨树的伤害减至最小,每棵树只钻取一根树芯,置于塑料管内编号封存。共采集杨树样芯 268 根,其中,健康杨树 197 根,衰退杨树 71 根。

将树芯带到实验室后,根据国际上标准方法,晾干后用白乳胶固定在木槽内^[24]。由于树木材质和人为原因导致部分样芯断裂严重难以固定粘贴,最终固定了杨树树芯 158 根,其中健康杨树 114 根,衰退杨树 44 根。自然晾干后用 400 目、800 目和 1200 目的干砂纸依次打磨,直到在显微镜下可以清楚看到杨树的细胞或年轮界线。利用精度为 0.001 mm 树木年轮分析仪 Win DENDRO™ (Regent instrument inc. Canada) 进行树轮宽度

参数的获取。为保证测量的准确性,用 COFECHA 程序进行交叉定年检验和校准^[25]。

为消除树龄和其他非气候因素导致的生长趋势,用 R 语言中 dplR 扩展包对每个树轮宽度序列进行去趋势(modified Hugeshoff curve)处理^[26],最后利用双权重平均法合成健康与衰退杨树标准年表、差值年表和自回归年表^[27]。考虑到标准年表包含更多的低频信息并且剔除了非气候信号和生长趋势^[16,28],利用健康和衰退杨树标准年表进行一系列研究。

1.3 气象数据及统计分析

气象资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),从距离取样点最近的张北气象站(114.42°E, 41.09°N,海拔为 1393.3 m)获取月降水量(PRE)、月平均气温(TMP)、月平均最低气温(TMN)、月平均最高气温(TMX)和月平均相对湿度(RH)气象数据(1975—2017 年)。选取不同年表与气象数据的最大公共时段进行相关性分析,健康和衰退杨树年表与气象数据的最大公共时段分别为 1975—2017 年和 1982—2017 年。考虑到树木生长对气候变化存在滞后性,选用上一年 6 月到当年 10 月的气候数据进行树木年表与气候要素相关性分析,该过程由 DendroClim 2002 程序^[29]实现。

张北地区干旱少水,研究选用了全球气候数据库(CRU TS 3.22 Global Climate Database, <http://www.cru.uea.ac.uk/>)中的帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI),来更好的反映杨树生长与水分的关系^[30]。从距采样点最近的 CRU 网格点(114.50°—115.00°E, 41.00°—41.50°N)选取 1975—2017 年 PDSI 数据。分析单月和季节性气候因子对杨树径向生长的影响,并利用滑动相关分析揭示健康、衰退杨树生长与气候关系的稳定性,滑动窗口为 20 a。

2 研究结果

2.1 气候年际变化趋势

该地区 1975 以来年平均气温以 0.41 °C/10 a ($P < 0.01$) 的速度上升(图 3),年平均最低气温(0.50 °C/10 a, $P < 0.01$)的上升速率明显高于年平均最高气温(0.35 °C/10 a, $P < 0.01$)。年降水量和相对湿度呈现降低趋势,但减少量不明显,出现小范围的波动现象(图 3)。1975—2017 年多年平均降水量为(391.5±71.0) mm,1978 年降水量最大为 548.4 mm,1997 年降水量最少,仅有 245.2 mm。研究区 PDSI 下降趋势明显(-0.38/10a, $P < 0.01$),多年份的 PDSI 值小于-2,该地区出现明显的气候暖干化的特征(图 3)。

2.2 健康和衰退杨树年表统计特征比较

建立了健康和衰退杨树树轮宽度标准年表,年表的起始年份最低样本量均大于 5 根样芯(图 4),建立的两个年表能够反映研究区健康和衰退杨树的径向生长年际波动特征。年表统计特征表明,健康和衰退杨树年表的标准差(SD)分别为 1.544 和 1.900,蕴含较多的气候信息(表 1)。衰退杨树的一阶自相关系数(AR1)较高(0.609),表明其受前一年气候的影响较大,存在“滞后效应”^[16]。2 个年表样芯间相关系数(Rbt)分别为 0.306 和 0.445,表明衰退杨树不同样芯间树轮宽度变化有很好的一致性。两个年表的样本总体代表性(EPs)均大于 0.85,表明采集的样本量包含的信号基本能代表当地的总体特征^[31]。健康和衰退杨树年表的信噪比(SNR)分别为 33.995 和 20.617,达到了较高水平,表明包含丰富的气候信号。以上各年表统计特征说明本次调查所用的树轮资料包含可靠的气候信息,适用于进行树轮气候学分析。

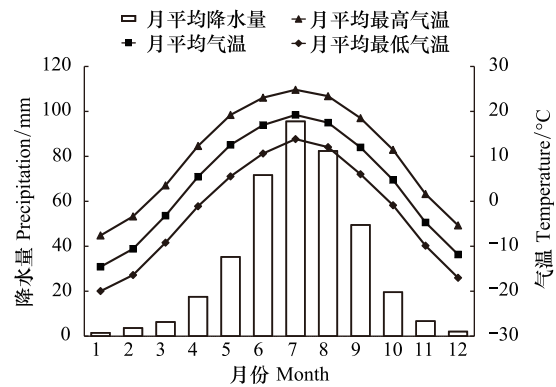


图 2 1975—2017 年张北地区温度降水季节分布

Fig.2 Seasonal distribution of temperature and precipitation in Northwestern of Hebei, China (1975—2017)

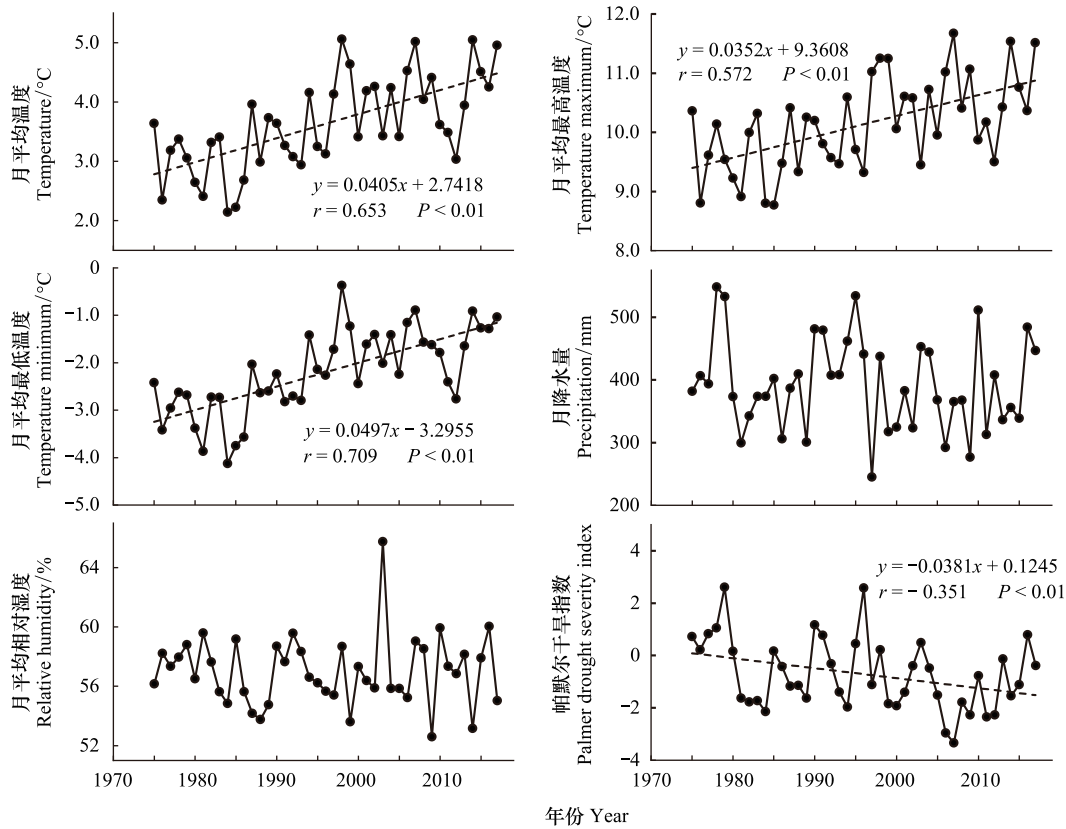


图3 1975—2017年张北各气象要素的变化趋势

Fig.3 Climatic changing trend of Northwestern of Hebei, China from 1975 to 2017

表1 张北坝上地区树轮采样点概况、标准年表主要特征参数及共同区间分析结果

Table 1 Site information, chronology statistics and results of common interval span analysis of standard tree-ring chronology from the Northwestern of Hebei, China

类型 Type	地点 Location	海拔 Elevation/m	时间段 Time length	样芯数 Number of cores	平均树轮宽度 Mean/mm	标准差 SD	一阶自相关 AR1	样芯间相关系数 Rbt	信噪比 SNR	样本群体表达信号 EPS
健康杨树 The healthy poplar trees	114.88°E, 41.34°N	1379.0	1975—2017	104	2.533	1.544	0.590	0.306	33.995	0.971
衰退杨树 The Declining poplar trees	114.88°E, 41.34°N	1379.0	1982—2017	35	2.570	1.900	0.609	0.445	20.617	0.954
气象站 Meteorological station	114.42°E, 41.09°N	1393.3	1956—2018	—	—	—	—	—	—	—
CRU 格点 CRU grid	114.50°E, 41.00°N	—	1901—2018	—	—	—	—	—	—	—

Mean:平均树轮宽度 Mean tree-ring width (mm);SD:标准差 Standard deviation;AR1:一阶自相关 First-order autocorrelation;Rbt:样芯间相关系数 Mean inter-series correlation;SNR:信噪比 Signal-to-noise ratio;EPS:样本群体表达信号 Express population signal

2.3 气候因素对杨树径向生长的影响

2.3.1 温度对杨树径向生长的影响

健康和衰退杨树径向生长与气温多呈负相关关系,衰退杨树年表表达的温度信号较健康杨树强,衰退杨

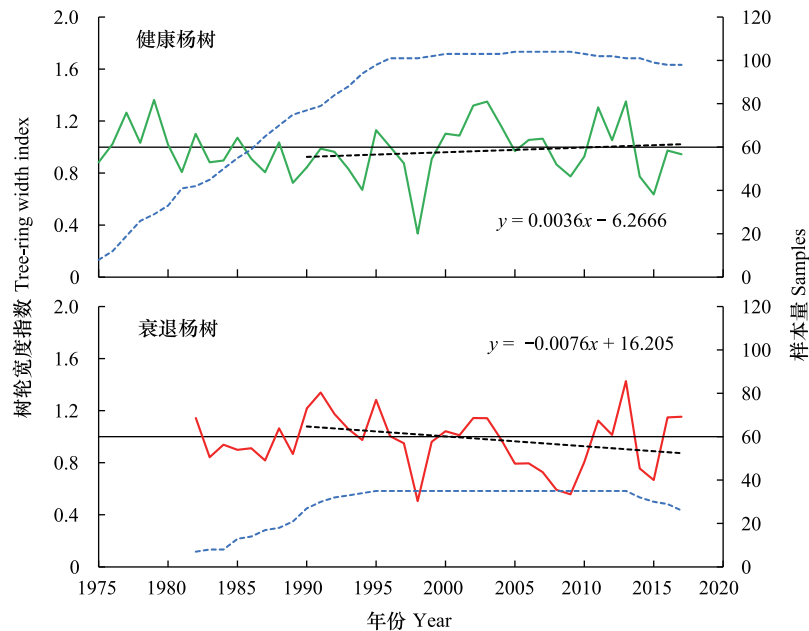


图 4 张北地区健康和衰退杨树标准年表

Fig.4 Standard tree-ring chronology of healthy and declining *Populus simonii* forest in Northwest of Hebei, China

绿色实线为健康杨树标准年表,红色实线为衰退杨树标准年表,蓝色虚线为样本量

树对气温响应敏感性强于健康杨树。健康杨树年轮宽度与上年 10 月—当年 1 月和当年 3—6 月温度显著相关(图 5, $P < 0.05$), 衰退杨树年轮宽度与上年 8—10 月、当年 4—6 月以及当年 8—10 月温度显著相关($P < 0.05$)。健康杨树与上年 12 月和当年 4 月温度指标呈显著负相关($P < 0.05$), 其中与当年 4 月平均温度、平均最高温度以及平均最低温度达到极显著相关水平($P < 0.01$)。衰退杨树与当年 4 月、7 月、9 月和 10 月平均气温, 7 月和 10 月最高气温以及 9 月和 10 月最低气温呈显著负相关(图 5, $P < 0.05$), 其中与当年 4 月平均温度、平均最高温度以及平均最低温度达到极显著相关水平($P < 0.01$)。两个年表与单月尺度 4 月份温度因素的相关系数比季节性尺度 4—6 月温度因素高。

2.3.2 降水和相对湿度对杨树径向生长的影响

健康和衰退杨树径向生长与降水和相对湿度多呈正相关关系, 衰退杨树年表表达的降水和相对湿度信号较健康杨树强。健康杨树年轮宽度与上年 8—11 月降水以及上年 8 月—当年 1 月相对湿度呈显著正相关(图 6, $P < 0.05$); 衰退杨树与上年 9 月—当年 1 月、5—9 月降水以及上年 9 月—当年 1 月、6—9 月相对湿度呈显著正相关($P < 0.05$)。衰退杨树与上年 9 月、11 月和当年 7 月降水以及上年 9 月和当年 7 月相对湿度呈显著正相关($P < 0.05$), 其中与当年 7 月降水和相对湿度达到极显著相关水平($P < 0.01$); 而健康杨树仅与上年 9 月降水和相对湿度呈显著正相关(图 6, $P < 0.05$)。衰退杨树年表与 7 月单月尺度降水的相关系数比 5—7 月季节尺度的相关系数高, 但年表与上年 11 月—当年 1 月的降水呈极显著正相关, 与单月尺度降水相关性较低。健康杨树年表与上年 8—10 月降水以及上年 8—11 月相对湿度呈极显著正相关, 而与单月尺度降水和相对湿度相关性仅 9 月达到显著水平。

2.3.3 干旱对杨树径向生长的影响

帕默尔干旱指数(PDSI)基于水平衡方程的供需概念, 根据降水和温度数据以及土壤含水量计算, 是反映土壤湿度的代用指标, 在干旱区的相关研究中被广泛应用, 其数值大小代表着土壤水分有效性状况^[32]。衰退杨树年表与多月份 PDSI 呈显著正相关, 而健康杨树径向生长与 PDSI 相关性不显著(图 7)。衰退杨树径向生长与 PDSI 在多月份(上年 9 月—当年 3 月、当年 6 月—10 月)呈显著正相关($P < 0.05$), 其中与上年 11 月以及当年夏季(6—8 月) PDSI 的相关性($r = 0.441—0.509$, $P < 0.01$)达到极显著水平。

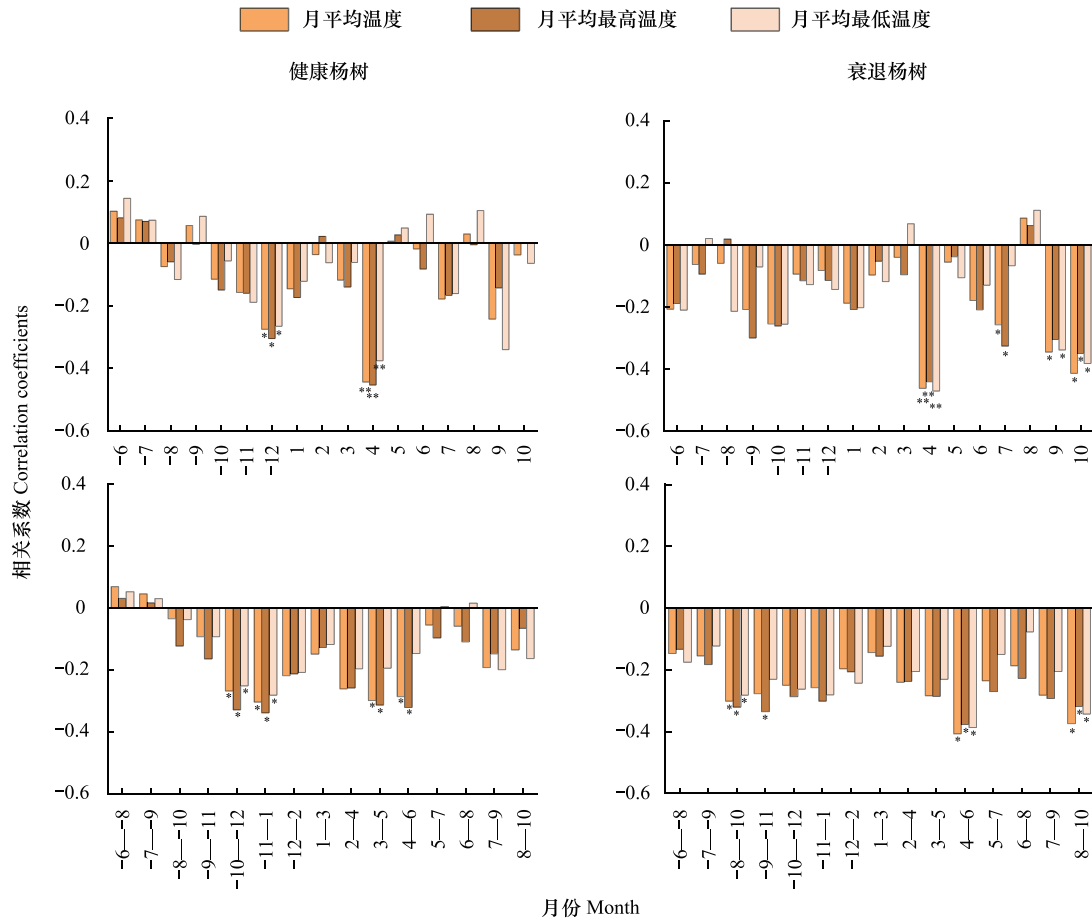


图5 张北杨树年表与单月和三个月(季节)尺度温度要素的相关关系

Fig.5 Correlation coefficients of *Populus simonii* chronologies between temperature factors

*代表 $P < 0.05$, **代表 $P < 0.01$, 月份前的“-”表示上一年, 如-6表示上一年6月份(单月尺度), -6--8表示上一年6月份—8月份(季节尺度)

2.4 杨树径向生长对气候响应敏感性年际变化趋势

衰退杨树与温度因子的负相关关系较健康杨树显著, 研究时段内健康和衰退杨树径向生长对温度因素的敏感性呈下降趋势(图8)。健康和衰退杨树年表对4—6月平均温度的响应分别在1982—2001年和1975—2014年间呈显著负相关, 之后负相关性逐渐降低; 两个年表与4月平均气温在1975—2016年间都呈显著负相关, 并且相关性年际间呈明显下降趋势。两个年表与4月和4—6月最高温度的响应有相同的变化趋势。健康杨树年表对8—10月平均温度的响应在1982—2017年间呈弱负相关, 而衰退杨树在1986—2017年间与之呈显著负相关($P < 0.05$), 在2010年之后负相关性逐渐降低。

衰退杨树与降水和PDSI的正相关性较健康杨树强, 研究时间段内衰退杨树径向生长对降水和PDSI的敏感性逐步增强, 而健康杨树径向生长对降水和PDSI的敏感性较为稳定, 呈现弱正相关性(图8)。由健康和衰退杨树年表对5—7月降水量和6—8月PDSI的滑动相关关系可见, 衰退杨树年表在1982—2017年间始终与降水量和PDSI呈正相关, 且对降水和PDSI的敏感性逐渐增强; 健康杨树年表在研究时间段内对两者的敏感性较衰退杨树弱, 对降水的敏感性在2014年时由负相关转为正相关, 和PDSI的敏感性也在逐步加强但是呈现弱相关性。由健康和衰退杨树年表对7月降水量和8月的PDSI的滑动相关关系可以看出, 衰退杨树年表在1982—2017年间与降水量和PDSI呈正相关性有上升趋势, 与降水量在1992—2011年之后达到显著性水平, 与PDSI在1997—2006年之后达到显著正相关; 健康杨树对降水量和PDSI的响应敏感性在1982—

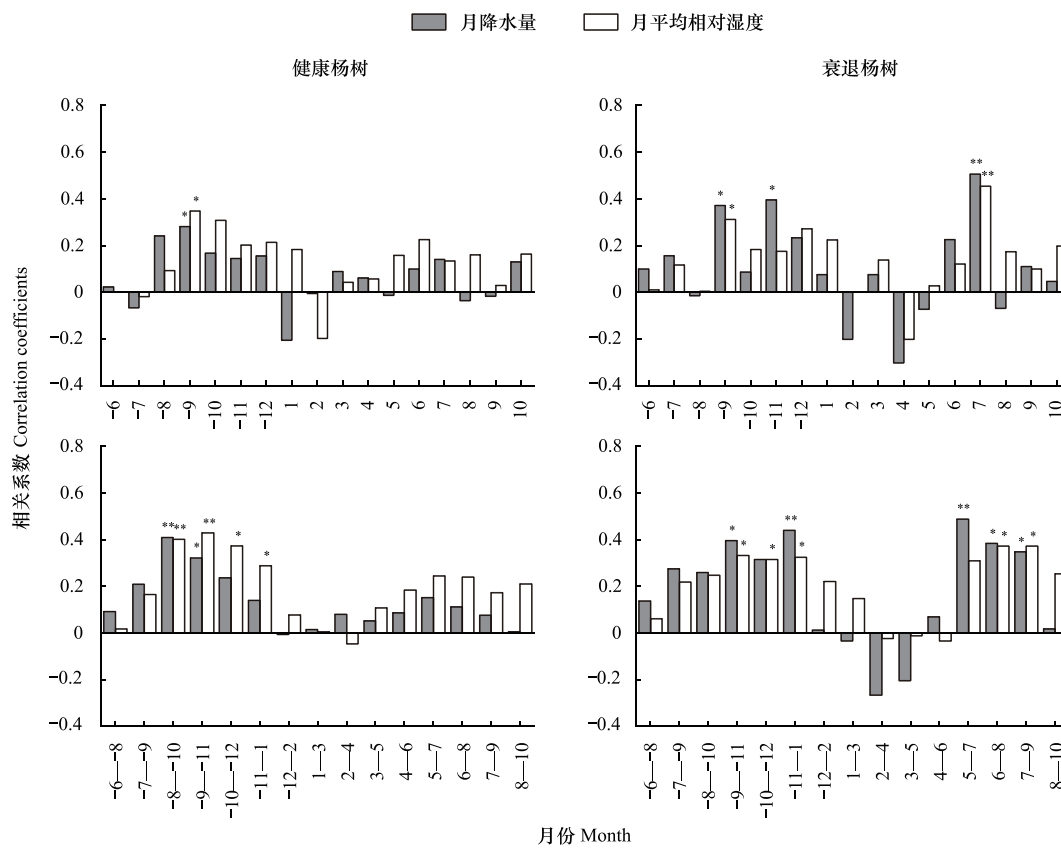


图 6 张北杨树年表与单月和三个月(季节)尺度降水和相对湿度的相关关系

Fig.6 Correlation coefficients of *Populus simonii* chronologies between precipitation and relative humidity

* 代表 $P < 0.05$, ** 代表 $P < 0.01$, 月份前的“-”表示上一年,如-6 表示上一年 6 月份(单月尺度),-6--8 表示上一年 6 月份—8 月份(季节尺度)

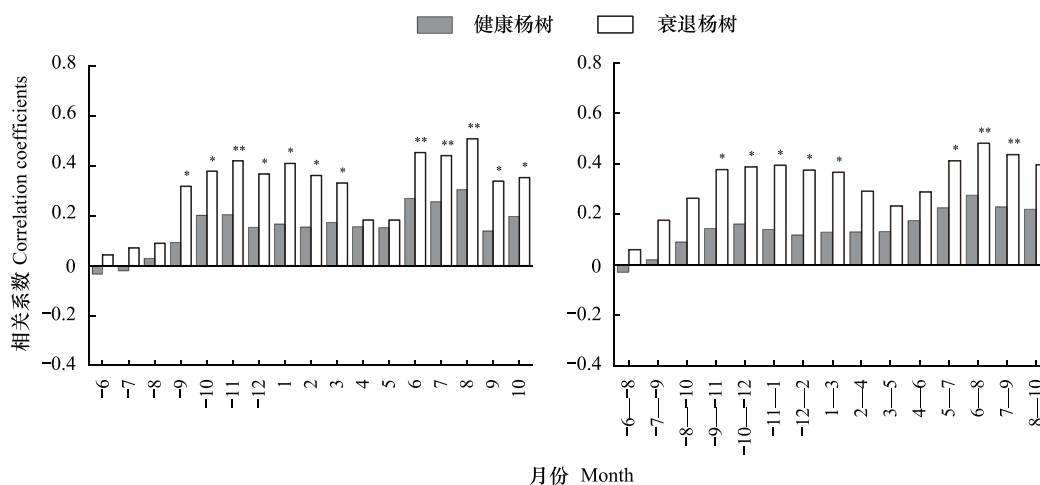


图 7 张北杨树年表与单月和三个月(季节)尺度 PDSI 的相关关系

Fig.7 Correlation coefficients of *Populus simonii* chronologies between PDSI

PDSI: 帕默尔干旱指数 Palmer drought index; * 代表 $P < 0.05$, ** 代表 $P < 0.01$, 月份前的“-”表示上一年,如-6 表示上一年 6 月份(单月尺度),-6--8 表示上一年 6 月份—8 月份(季节尺度)

2017 年间都较弱。

3 讨论

3.1 健康和衰退杨树径向生长与气候因子关系

河北坝上地区杨树人工林中衰退杨树主要受温度和降水条件的制约,而健康杨树对温度响应敏感,对水分变化响应相对较弱。该结果在河北地区内也有体现,由于受夏季水热条件的限制,河北木兰围场油松与 5、6 月气温呈显著负相关,而与 6 月降水呈显著正相关^[33];太行山南段侧柏径向生长受春末夏初水热条件的限制^[34];冀北山地落叶松受夏季气温和降水两个因子共同影响^[35];600 mm 年降水量等值线是中国树木径向生长对气候变化响应的重要空间边界,在该线的北部,树轮宽度通常与降水呈正相关,与温度呈负相关^[36],张北地区位于 600 mm 年降水量等值线北面,说明结果较为准确。

衰退杨树年表与生长季前 4 月、生长季 7 月和生长季末 9—10 月温度呈显著负相关关系,健康杨树与生长季前 4 月温度呈显著负相关。该地区小叶杨生长发育关键时期主要集中在 5—9 月,一般 5 月开始发芽,6—8 月为生长期,9 月末进入落叶休眠期^[9],在生长季中多月份平均气温过高对小叶杨生长产生胁迫,从而限制小叶杨径向生长。健康杨树对当年 4 月最低气温以及衰退杨树对 4 月、9 月和 10 月最低温度的响应较敏感,4 月份是小叶杨生长季前,当温度过低时,杨树生长受到限制,树木各种生理活动都会延迟^[37]。同时,受 9 月最低气温的影响,杨树提前进入休眠期,树木生长季变短,促使杨树形成窄树轮^[38]。健康杨树与当年 4 月最高气温以及衰退杨树与当年 4、7 和 10 月最高气温呈显著负相关,生长季前高温会使土壤蒸发增加,导致土壤的有效水分显著下降,进入生长季时没有充足的水分^[39],促使生长季缩短。在生长季期间,高温促使树木蒸腾作用加强,呼吸作用加强,消耗的养分过多,在生长季中树木径向生长减缓^[37,40]。

杨树径向生长与降水存在“滞后效应”,上年 8—11 月降水对衰退杨树的生长有促进作用,当生长季后期降水充足时可用于补充根系层的土壤水分,是下年生长季初期杨树生长的主要水分来源^[41]。张北雨热同期,在夏季时温度基本稳定在 20 °C 上下,树木各项生理活动进入旺盛时期,在持续高温情况下树木水分蒸发快速^[42],此时降水成为衰退杨树生长的主要限制因素。本地区 7 月份降水量最大,降水成为杨树快速生长的有利因素,所以与 7 月降水量正相关关系最显著。

总之,温度和降水对衰退杨树生长的限制作用明显强于健康杨树,可能与杨树衰退后生理功能下降有关。在高温干旱胁迫的影响下,杨树径向生长得不到充足的水分,杨树在低水势的条件下易形成导管的栓塞,它自身会调节牺牲部分构件来维持正常生理需水,如发生枯树梢现象降低植物蒸腾作用强度^[43]。发生林分枯梢现象说明对干旱的适应策略已超出其正常生长范围,气候变化极易影响衰退杨树生长,对气象因子响应敏感。当杨树遭遇干旱胁迫,它会调节气孔来减少水分蒸发,气孔关闭会阻碍植物与外界进行气体交换,CO₂ 供应不足,使植物体内碳水化合物储存不够,同时植物呼吸作用和新陈代谢消耗体内碳水化合物,而使本体处于“饥饿”状态,会使杨树径向生长下降生成窄轮^[44]。从生理过程方面理解杨树衰退过程还需要做出进一步研究。

3.2 气候暖干化对健康和衰退杨树的影响

根据张北气象站数据,在本研究区域内,1956—2017 年间年均降水量为(391.5±71.0) mm,为半干旱区域。近 60 年来温度呈现出显著上升的趋势,增长速率为 0.36 °C/10 a,多年份的 PDSI 值小于 -2,达到了严重干旱的程度^[45],这说明该地区温度快速升高引起干旱,气候呈现暖干化趋势。衰退杨树与 PDSI 在多月份呈显著正相关,径向生长下降,说明其深受水分胁迫的影响,而健康杨树与 PDSI 的相关性较弱,该地区的健康杨树对干旱具有较好的适应性。

在全球气候变暖的背景下,北半球树木生长对气候因素的敏感性随时间发生了明显变化^[46]。树木生长对干旱胁迫响应程度呈上升趋势,而对温度的响应出现下降趋势,致使干旱胁迫对树木生长产生了较大影响^[47]。在本研究中衰退杨树年表与气象数据的滑动相关分析表明,年表与春季温度负相关性有减弱的趋势,与夏季降水和 PDSI 的正相关性有增强的趋势,可能是气温升高引起的干旱胁迫严重影响了衰退杨树的生

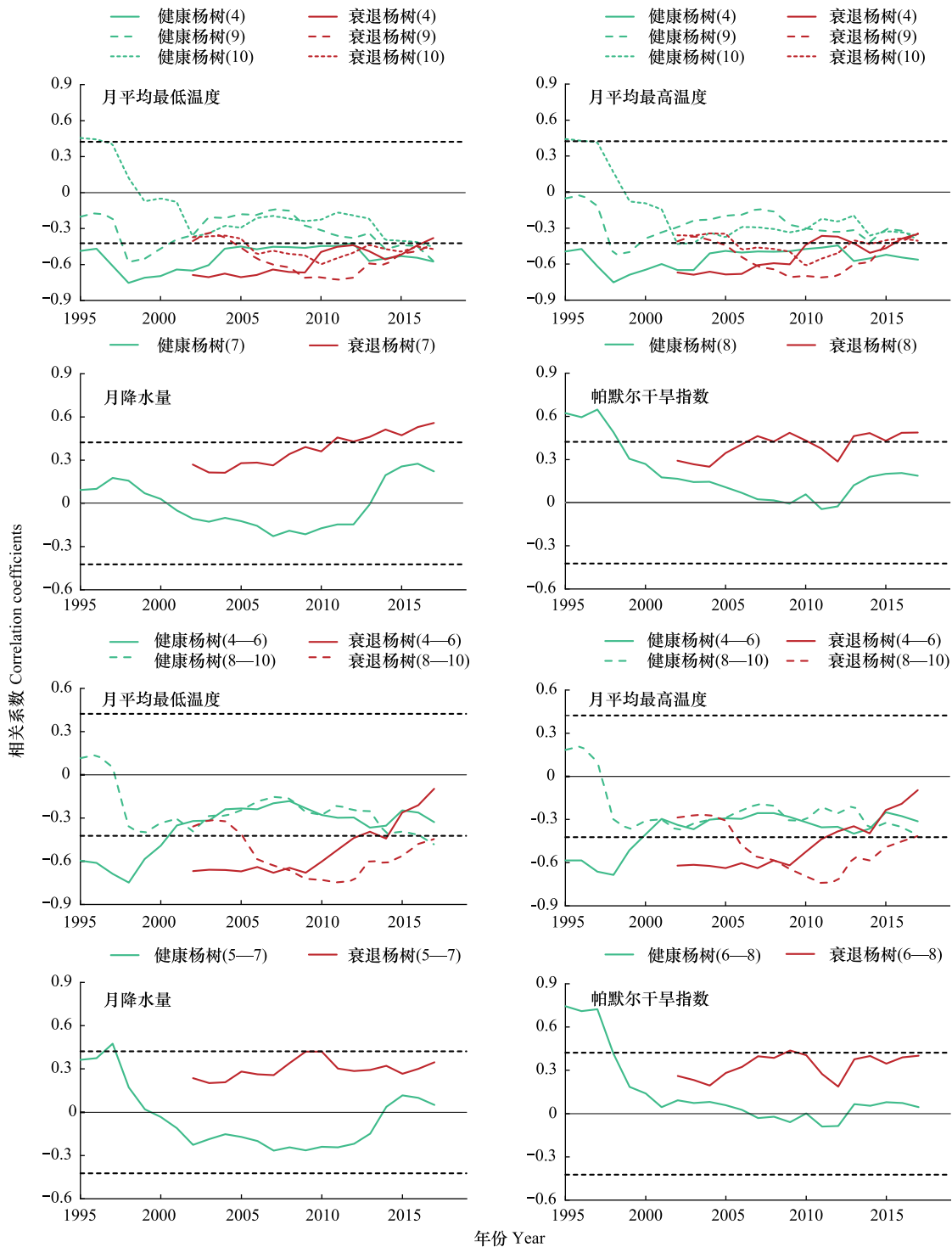


图 8 健康和衰退杨树年表与主要月份气候要素的滑动相关分析

Fig.8 Moving correlation function analysis computed between the two chronologies and the seasonal and monthly climate data for the most important months during the period 1975—2017

滑动相关分析窗口设置为 20 a;显著性相关水平为 $P < 0.05$;4 表示当年 4 月份(单月尺度),4—6 表示当年 4 月份—6 月份(季节尺度)

长,研究结果与 Babst 等^[47]的结论一致。小兴安岭蒙古栎生长与夏季最低温度负相关性有减弱的趋势,与夏季相对湿度的正相关性有增强的趋势,其径向生长出现衰退趋势^[21],本研究结果与其一致。伊春地区红松与红皮云杉随温度的上升,高温对其径向生长的抑制作用加强将不利于两种树木的生长,使其产生生长衰退现

象,与本研究结果一致^[23]。有研究指出气温升高会促进长白山地区红松以及天山地区雪岭云杉的生长,本研究与其结果相反,可能是气候区不同而导致的^[20,48]。健康杨树年表与春季和夏季温度的负相关性以及夏季降水和 PDSI 的正相关性有增强的趋势,但对健康杨树径向生长影响不大,说明当地气候适宜健康杨树的生长。

4 结论

以河北坝上地区三北防护林工程中小叶杨农田防护林为研究对象,利用树木年轮学方法建立健康和衰退杨树年轮宽度标准年表,探讨了健康杨树和退化杨树对温度、降水等气候因素响应的差异以及年际变化特征。发现健康和衰退杨树径向生长对气候因素的响应存在差异。温度是二者生长的主要限制因子,降水的限制作用相对较弱,衰退杨树较健康杨树对气候因素响应更加敏感。生长季前(4月)温度抑制健康和衰退杨树的生长,生长季(7月)降水促进衰退杨树的生长。高温引起的干旱胁迫明显抑制衰退杨树的生长,而健康杨树受其影响较小,健康杨树对张北地区气候具有较好的适应性。随着温度的持续升高,健康和衰退杨树与生长季温度、降水的相关性存在明显差异,衰退杨树径向生长由温度胁迫转变为水分胁迫,衰退杨树生长将更加受限制。衰退小叶杨对气候响应较健康小叶杨更加敏感,对干旱灾害敏感,适应能力下降,因此,干旱是小叶杨衰退乃至死亡的重要驱动因素。

参考文献 (References):

- [1] 李建树. 三北防护林体系工程发展现状及对策. 世界林业研究, 1994, (1): 64-69.
- [2] 申丽娜, 孙艳玲, 杨艳丽, 景悦. 基于 NDVI 的三北防护林工程区植被覆盖度变化图谱特征. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 70-77.
- [3] Duan H C, Yan C Z, Tsunekawa A, Song X, Li S, Xie J L. Assessing vegetation dynamics in the three-north shelter forest region of china using AVHRR NDVI data. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(4): 1011-1020.
- [4] Niu Q F, Xiao X M, Zhang Y, Qin Y W, Dang X H, Wang J, Zou Z H, Doughty R B, Brandt M, Tong X W, Horion S, Fensholt R, Chen C, Myneni R B, Xu W H, Di G Z, Zhou X M. Ecological engineering projects increased vegetation cover, production, and biomass in semiarid and subhumid Northern China. Land Degradation & Development, 2019, 30(13): 1620-1631.
- [5] 郑春雅, 许中旗, 马长明, 底凯, 程月明, 孙守家, 闫腾飞. 冀西北坝上地区退化防护林的土壤性质. 水土保持学报, 2016, 30(1): 203-207.
- [6] Liu W H, Zhu J J, Jia Q Q, Zheng X, Li J S, Lou X D, Hu L L. Carbon sequestration effects of shrublands in Three-North shelterbelt forest region, China. Chinese Geographical Science, 2014, 24(4): 444-453.
- [7] Wang X M, Zhang C X, Hasi E, Dong Z B. Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China? Journal of Arid Environments, 2010, 74(1): 13-22.
- [8] 邢海富. 坝上杨树防护林死亡原因浅析. 河北林业科技, 2015, (1): 76-77.
- [9] 苗博, 孟平, 张劲松, 何方杰, 孙守家. 基于稳定同位素和热扩散技术的张北杨树水分关系差异. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2111-2118.
- [10] 张欢, 曹俊, 王化冰, 宋波, 贾国栋, 刘自强, 余新晓, 曾佳. 张北地区退化杨树防护林的水分利用特征. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1381-1388.
- [11] 杜海峰. 河北坝上杨树退化的原因及改造技术求索. 环境与发展, 2019, 31(7): 195-195, 197-197.
- [12] 程月明, 张愿, 崔硕, 马长明. 张北县杨树种群衰退原因初探——以盘城营为例. 林业资源管理, 2015, (1): 152-155, 167-167.
- [13] 孙守家, 李春友, 何春霞, 张劲松, 孟平. 基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2119-2127.
- [14] 李晓航, 刘晓龙. 干旱导致防护林衰退死亡研究进展. 防护林科技, 2016, (12): 59-60.
- [15] 郑春雅, 许中旗, 马长明, 孙守家, 闫腾飞. 冀西北坝上地区杨树防护林退化的影响因素. 林业资源管理, 2018, (1): 9-15, 147-147.
- [16] Fritts H C. Tree Rings and Climate. New York: Academic Press, 1976.
- [17] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [18] 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.
- [19] 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 吴新玲. 华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应. 生态学报, 2018, 38(3): 1028-1039.
- [20] Qi Z H, Liu H Y, Wu X C, Hao Q. Climate-driven speedup of alpine treeline forest growth in the Tianshan Mountains, Northwestern China. Global Change Biology, 2015, 21(2): 816-826.
- [21] 韩金生, 赵慧颖, 朱良军, 张远东, 李宗善, 王晓春. 小兴安岭蒙古栎和黄菠萝径向生长对气候变化的响应比较. 应用生态学报, 2019,

- 30(7): 2218-2230.
- [22] 石松林, 靳甜甜, 刘国华, 王东波, 王景升, 李魁. 气候变暖抑制西藏拉萨河大果圆柏树木生长. 生态学报, 2018, 38(24): 8964-8972.
- [23] 苑丹阳, 赵慧颖, 李宗善, 朱良军, 国森, 张远东, 王晓春. 伊春地区红松和红皮云杉径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(4): 1150-1160.
- [24] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree Ring Dating. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [25] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 51-67.
- [26] Bunn A G. A dendrochronology program library in R (dplR). Dendrochronologia, 2008, 26(2): 115-124.
- [27] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立. 地理学报, 1994, 61(2): 174-181.
- [28] 吴祥定, 邵雪梅. 中国秦岭地区树木年轮密度对气候响应的初步分析. 应用气象学报, 1994, 5(2): 253-256.
- [29] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers & Geosciences, 2004, 30(3): 303-311.
- [30] Harris I, Jones P D, Osborn T J, Lister D H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 623-642.
- [31] 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.
- [32] Bhuyan U, Zang C, Menzel A. Different responses of multispecies tree ring growth to various drought indices across Europe. Dendrochronologia, 2017, 44: 1-8.
- [33] 崔明星, 何兴元, 陈玮, 陈振举, 周长虹, 吴涛. 河北木兰围场油松年轮生态学的初步研究. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2339-2345.
- [34] 王亚军, 张永, 邵雪梅. 河北太行山南段树木年轮指示的 167 年来相对湿度变化研究. 生态学报, 2019, 39(12): 4570-4578.
- [35] 范慧涛, 陈立标, 陈忠震, 谷建才. 冀北山地油松、落叶松径向生长对气象因子的响应. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(1): 52-57.
- [36] Liu Y, Song H M, Sun C F, Song Y, Cai Q F, Liu R S, Lei Y, Li Q. The 600-mm precipitation isoline distinguishes tree-ring-width responses to climate in China. National Science Review, 2019, 6(2): 359-368.
- [37] 贺敏, 魏江生, 石亮, 周梅, 赵鹏武. 大兴安岭南段山杨径向生长和死亡对区域气候变化的响应. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3237-3244.
- [38] 张先亮, 崔明星, 马艳军, 吴涛, 陈振举, 丁玮航. 大兴安岭库都尔地区兴安落叶松年轮宽度年表及其与气候变化的关系. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2501-2507.
- [39] 常永兴, 陈振举, 张先亮, 白学平, 赵学鹏, 李俊霞, 陆旭. 气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应. 植物生态学报, 2017, 41(3): 279-289.
- [40] 王婷, 于丹, 李江风, 马克平. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. 植物生态学报, 2003, 27(1): 23-33.
- [41] 韦景树, 李宗善, 焦磊, 陈维梁, 伍星, 王晓春, 王帅. 黄土高原羊圈沟小流域人工物种和自然物种径向生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2018, 38(22): 8040-8050.
- [42] 王童, 孙玉军, 乔晶晶. 将乐林场马尾松树轮宽度对气候变化的响应. 北京林业大学学报, 2019, 41(9): 30-39.
- [43] 韦景树, 李宗善, 冯晓琦, 张园, 陈维梁, 伍星, 焦磊, 王晓春. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [44] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, Breshears D D, Cobb N, Kolb T, Plaut J, Sperry J, West A, Williams D G, Yezzer E A. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? New Phytologist, 2008, 178(4): 719-739.
- [45] 卫捷, 陶诗言, 张庆云. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用. 地理学报, 2003, 58(S1): 91-99.
- [46] Briffa K R, Schweingruber F H, Jones P D, Osborn T J, Shiyatov S G, Vaganov E A. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. Nature, 1998, 391(6668): 678-682.
- [47] Babst F, Bouriaud O, Poulter B, Trouet V, Girardin M P, Frank D C. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. Science Advances, 2019, 5(1): eaat4313, doi: 10.1126/sciadv.aat4313.
- [48] 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山过渡带红松和鱼鳞云杉径向生长对气候因子的响应. 植物生态学报, 2011, 35(1): 27-34.