DOI: 10.5846/stxb202104170996

张晓,吴梦婉,SeMyung Kwon,潘磊磊,韩辉,杨晓晖,刘艳书,时忠杰.不同林龄樟子松人工林径向生长对气候及地下水位变化的响应.生态学报, 2022,42(16):6827-6837.

Zhang X, Wu M W, Semyung Kwon, Pan L L, Han H, Yang X H, Liu Y S, Shi Z J.Radial growth responses of Mongolian pine (*pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantations at different ages to climate and groundwater level changes. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16):6827-6837.

不同林龄樟子松人工林径向生长对气候及地下水位变 化的响应

张 晓^{1,2},吴梦婉³,SeMyung Kwon⁴,潘磊磊⁴,韩 辉⁵,杨晓晖^{1,2},刘艳书^{1,2},时忠杰^{1,2,*}

1 中国林业科学研究院荒漠化研究所,北京 100091

2 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所,北京 100093

3 北京林业大学水土保持学院,北京 100083

4 Institute of Ecological Restoration, Kongju National University, Chungcheongnam-do 32439

5 辽宁省沙地治理与利用研究所, 阜新 123000

摘要:全球气候变化导致森林生态系统的结构与功能发生改变,甚至出现树木死亡与林分衰退的现象,研究林分生长对气候变 化尤其是干旱事件的响应有助于预测未来气候变化下生态系统的稳定性。以辽宁章古台5个林龄的樟子松人工林为研究对 象,分析了树木径向生长对气候因子与地下水位的响应,结果表明:秋季气温,尤其是最低气温显著影响樟子松林的生长(44年 生林分除外);低林龄樟子松林(36、39年)生长与当年夏季及生长季内的降水显著正相关,而高林龄樟子松林(52年)生长则与 当年春季尤其是当年2月与5月降水显著正相关;36、39、52年生樟子松人工林年表与当年夏季的Palmer干旱指数(PDSI)显著 正相关,44、58年生樟子松人工林年表则与地下水位显著正相关。应对早期干旱(即1997年)时,樟子松人工林表现为随林龄 增加,其抵抗力增加而恢复力降低;在随后的两个干旱事件中,高林龄樟子松林的抵抗力不再明显高于低林龄,可能是由于地下 水位显著降低影响根系吸水;受累积干旱的影响,所有林龄樟子松人工林对 2007—2008 干旱事件的弹性力均小于1,径向生长 量明显降低。地下水位是影响不同林龄樟子松人工林生长及对干旱抵抗力的重要因子,考虑地下水位有助于进一步提升森林 生态系统对气候变化响应研究的准确性。

关键词: 樟子松人工林,树木年轮,气候因子,地下水位,弹性

Radial growth responses of Mongolian pine (*pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantations at different ages to climate and groundwater level changes

ZHANG Xiao^{1,2}, WU Mengwan³, SEMYUNG Kwon⁴, PAN Leilei⁴, HAN Hui⁵, YANG Xiaohui^{1,2}, LIU Yanshu^{1,2}, SHI Zhongjie^{1,2,*}

1 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100093, China

3 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Institute of Ecological Restoration, Kongju National University, Chungcheongnam-do 32439, Korea

5 Liaoning Institute of Sandy Land Control and Utilization, Fuxin 123000, China

Abstract: Global climate change has caused changes in the structure and function of forest ecosystems, and even tree mortality and forest decline. Studying the response of forest growth to climate change, especially to extremely drought

收稿日期:2021-04-17; 网络出版日期:2022-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(32071558,41701249,32061123005);国家重点研发计划课题(2020YFF0305905))

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shijie1204@163.com

events, will help predict the stability of the ecosystem under future climate change. In this study, five Mongolian pine (pinus sylvestris var. mongolica) plantations of different ages were selected in Zhanggutai town, Liaoning Province. We analyzed the response of radial growth of trees to climate factors and groundwater level dynamics. The results showed that the autumn temperature, especially the minimum temperature, significantly affected the growth of Mongolian pine forests (except the 44-year-old stand); The growth of Mongolian pine forest with lower ages (i.e., 36 and 39 years) was significantly positively correlated with the precipitation in current summer or growing season, while that with greater ages (i. e., 52 years) was significantly positively correlated to the precipitation in current spring, especially in current February and current May; The chronologies of 36, 39 and 52 year-old Mongolian pine forests were significantly positively correlated to Palmer Drought Severity Index (PDSI) in current summer, while the chronologies of 44 and 58 year-old stands were significantly negatively correlated to groundwater level. In response to the early drought event occurred in 1997, the growth resistance of Mongolian pine increased with increasing stand age, while the recovery decreased. In the subsequent two drought events, the resistance of Mongolian pine forests with greater age was no longer significantly higher than that with lower age. It might due to the obvious decrease in groundwater level, which affected root the water absorption. Affected by cumulative drought, the resilience of Mongolian pine plantations with five ages to the 2007-2008 drought event was less than 1, and the radial growth was significantly reduced. Groundwater level is an important factor affecting the growth and drought resistance of Mongolian pine plantations at different ages. Considering the effect of groundwater level can further improve the accuracy of research on forest ecosystem response to climate change.

Key Words: pinus sylvestris var. mongolica; tree ring; climate factor; underground level; resilience

全球气候变化引起很多地区的气温升高及降水格局改变,并导致干旱的强度与频率增加^[1]。干旱引起的森林衰退及树木死亡也被广泛报道^[2-3],气候变化尤其是干旱导致了森林生态系统生产力及生态服务功能的下降。树木年轮能够忠实地记录树木在其一生中遭受的事件,是研究树木历史生长趋势及对过去气候变化响应的一种有价值的工具。国内外学者们利用树轮生态学方法开展了大量研究,如分析树木的气候生长关系^[4-6]、林分生产力^[7-8]及对极端干旱的生长弹性^[9-11]等,在上述研究中,树木年龄或者林龄均是重要的研究参数。

目前,由于树种和研究地环境等存在差异,有关年龄对树木生长与气候关系影响的结论也存在较大差异, 有研究表明年龄对树木生长与气候的关系没有明显影响,如黄土高原东部不同年龄的油松(Pinus tabulaeformis)^[12];而多数研究认为不同年龄的树木生长与气候关系存在差异,如斯堪的纳维亚幼龄樟子松 (Pinus sylvestris L.)(<100 a)对气候的敏感性高于老龄樟子松(100—250 a)^[13];辽东山区中龄落叶松(Larix olgensis 和 Larix kaempferi)人工林径向生长与气温正相关,而成熟落叶松人工林径向生长与气温呈负相关关 系^[14];不同林龄的祁连圆柏(Sabina przewalskii Kom.)在气候响应方面存在明显不同^[15];幼龄紫果云杉(Picea purpurea)对气候的敏感性高于老龄^[16];神农山幼龄白皮松(Pinus bungeana)与气温的相关性高,而中老龄树 则与降水的相关性更高^[17]。因此,年龄对树木的气候生长关系有重要影响。

樟子松(Pinus sylvestris var. mongolica)天然分布于我国大兴安岭北部、呼伦贝尔沙地以及俄罗斯和蒙古的部分地区^[18-19],也是三北地区的重要针叶树种,目前我国沙地樟子松人工林面积达到 4.17×10⁵ hm^{2[20]}。近几十年来,樟子松天然林与人工林均出现了衰退甚至死亡的问题^[21],针对这一问题,很多学者针对樟子松天然林开展了树木生长及其气候响应^[4-6],对极端干旱的生长弹性^[11],樟子松树轮稳定同位素分析^[22]等方面研究,然而,由于樟子松人工林年龄相对较短,目前研究多集中于不同水热梯度下樟子松人工林的生长及径向生长与空间气候响应方面^[23-24],而对不同林分年龄如何影响树木生长对气候的响应却不详。随着气候变化导致的干旱频率与强度增加,树木对干旱的生态弹性研究有助于未来气候变化下的森林预测与管理。Sun 等^[25]对比了不同密度樟子松人工林对干旱的弹性,发现高密度林的抵抗力和弹性最低,目前对年龄如何影响

樟子松生长应对极端干旱能力的认识也很匮乏。

本研究以辽宁省章古台镇不同林龄的樟子松人工林(36、39、44、52、58年)为研究对象,通过对比不同林 分年龄对樟子松人工林树木生长-气候响应关系及应对极端干旱能力差异,分析林分年龄对樟子松人工林生 长-气候关系的影响,为气候变暖背景下的樟子松人工林稳定性维持、适应性管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于辽宁彰武县章古台镇固沙造林研究所后坨子(122.48°E,42.71°N)和三家子(122.56°E, 42.68°N)试验区(图1)。研究区地处科尔沁沙地东南部,是典型的温带大陆性季风气候,近50年(1966— 2016年)的平均气温为7.6℃(图2),极端最高温度40.2℃,极端最低温度-34.1℃。年均降水量507.4mm,约 84.2%的降水集中在5—9月,年蒸发量约为降水量的3倍,平均相对湿度60.4%,年均风速3.3 m/s,无霜期 150—160 d。试验区于1953年开始樟子松引种育苗,1955年造林实验成功,建起了我国第一片樟子松引种固 沙人工林。樟子松人工林林下植被有马唐(Digitaria sanguinalis (L.) Scop.)、狗尾草(Setaria viridis (L.) Beauv.)、虎尾草(Chloris virgata Sw.)、糙隐子草(Cleistogenes squarrosa (Trin.) Keng)、画眉草(Eragrostis pilosa (L.) Beauv.)、老鹳草(Geranium wilfordii Maxim.)、披碱草(Elymus dahuricus Turcz.)、大戟(Euphorbia pekinensis Rupr.)、马齿苋(Portulaca oleracea L.)和轴藜(Axyris amaranthoides L.)等。



图1 研究地点、气象站、地下水位监测及干旱指数网格点位置图

2 研究方法

2.1 样本采集与年表建立

2017 年 8 月,在后坨子建立了 36、52、58 年生樟子 松人工林样地,在三家子建立了 39、44 年的樟子松人工 林样地,样地地形均较平坦,样地大小为 30 m×30 m,测 定样地内所有树木的胸径、树高、枝下高、冠幅等信息 (表 1)。然后,利用生长锥在胸高处(距离地面 1.3 m) 对所有树木采集树芯,每树钻取 2 芯。在室温下经自然 干燥、固定、打磨^[26-27]。在显微镜下利用骨架图法进 行目视交叉定年后,利用精度为 0.01 mm 的 Lintab 6[™] 年轮分析仪(Rintech, Heidelberg, Germany)和 TSAP 软



图 2 彰武 1966—2016 年月平均降水量及月平均气温



Fig.1 Locations of study sites, meteorological stations, groundwater level monitoring and drought index grid points PDSI: Palmer 干旱指数:58a,52a.....代表林龄

Table 1 Basic information of <i>Pinus sylvestris</i> var. mongolica plantations of different ages									
林龄/a	林分密度 Density/(株/hm ²)	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	平均冠幅 Average crown/m					
Stand age				东西 East-west	南北 South-north				
36	460	17.30	8.06	0.91	0.95				
39	780	17.41	10.60	1.00	1.00				
44	468	20.18	10.18	1.08	0.85				
52	312	23.68	11.08	1.01	1.05				
58	328	23.56	12.20	1.01	1.07				

表1 不同林龄樟子松人工林的林分基本信息

DBH: 胸径 Diameter at breast height

2.2 气候数据与统计分析

合生长曲线值的比值[24]。

气候数据来源于中国气象数据共享服务网(http://data.cma.cn/)彰武气象站的平均气温、平均最高气温、平均最低气温和降水量数据。地下水位数据来自于辽宁省章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测站监测数据^[29]。Palmer 干旱指数(PDSI)利用荷兰皇家气象研究所数据共享网(http://climexp.knmi.nl/)中的格点数据,该数据集为利用 CRU TS 3.26 计算而来的自校正 PDSI 数据(scPDSI,时长 1901—2017),经纬度的精度都为 0.5°,利用美国国家航空航天局(NASA)开发的 Panoply 4.11.1 软件(https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/)读取坐标为(42.75°N,122.25°E)的数据代表研究区的 PDSI 值。PDSI 综合考虑降水量、气温等因素的影响,是衡量植物生长可利用水分的重要指标。为分析不同林龄樟子松人工林生长对气候响应的差异,本文选取樟子松人工林生长的公共时间段进行生长-气候响应分析,即 1990—2016 年。

由于树木当年生长会受到前一年气候的影响(即滞后效应),选取前一年9月到当年11月的平均气温、 平均最高气温、平均最低气温、降水量、PDSI和地下水位,分别计算与标准化年表的相关系数,研究不同林龄 樟子松人工林对气候的响应。统计分析利用 SPSS 22 完成,绘图利用 Excel 2010 完成。

2.3 樟子松人工林应对干旱的弹性分析

根据 Lloret 等^[30]的计算方法,利用标准化年表计算樟子松人工林对干旱的抵抗力(R_i)、恢复力(R_c)和弹性力(R_i),计算公式如下:

$$R_t = G_d / G_{\text{prev}} \tag{1}$$

$$R_c = G_{\text{post}} / G_d \tag{2}$$

42 卷

$$R_s = G_{\text{post}} / G_{\text{prev}} \tag{3}$$

其中,G_d为干旱事件发生时的平均树轮宽度,G_{prev}和G_{post}为干旱事件发生前3年和后3年的平均树轮宽度。

由于当年夏季(即6—8月)PDSI 与樟子松人工林生长具有显著的相关关系(见3.3),本文以6—8月平均 PDSI 为标准确定了3个干旱事件,这3个干旱事件对应于樟子松人工林标准年表的3个低值(见3.2)。

3 结果与分析

3.1 研究区气候变化

在 1966—2016 年,研究区年平均气温显著升高(P<0.01),气候倾向率为 0.32℃/10a,1990—2016 年平均 气温的升高速度变缓,为 0.08℃/10a(图 3);年降水量变化趋势不明显,1966—2016 年降水变化趋势率为 -0.312 mm/a,1990—2016 年降水变化趋势率为 0.256 mm/a;PDSI 呈微弱降低趋势;地下水位显著降低(P<



0.01),由 1998年的 1.9 m 降为 2016年的 3.1 m。

1965

1975

1985

1995

2005

图 3 研究区 1966—2016 年的平均气温、年降水量、PDSI 和地下水位的变化趋势,右下方图为 1990—2016 年变化趋势 Fig.3 Change trend of mean air temperature, annual precipitation, PDSI and groundwater level in the study area from 1966 to 2016, with the graph at the lower right showing the trend from 1990 to 2016

年份 Year

1965

1975

1985

1995

2005

2015

2015



图 4 不同林龄樟子松人工林的年轮宽度标准年表与样本数量

Fig.4 Standard chronologies and sample numbers of Pinus sylvestris var. mongolica plantations of different ages

3.2 年表统计特征

图 4 为不同林龄樟子松人工林树轮宽度年表的变化。由图可见,在公共时段(1990—2016年)内不同林

42 卷

龄樟子松人工林生长趋势基本一致。对年表特征进行统计发现,5个年表的序列间平均相关系数在 0.321— 0.664之间,标准差在 0.173—0.263 之间,平均敏感度在 0.185—0.256 之间。随林龄增加,年表的平均敏感度 和标准差呈增加趋势,表明高林龄的樟子松人工林对气候变化的响应更敏感^[31-32]。样本总体代表性是所采 集的样本对整个区域的代表程度,通常样本总体代表性大于 0.85 的年表质量较高^[33],除 39 年生樟子松树轮 宽度年表的较低(0.836)外,其余均大于 0.85;低林龄的年表的信噪比值较小,样本对总体的代表性值较低,甚 至低于 0.85 的标准,表明低林龄树木生长可能更容易受非气候因素影响,如微环境、竞争等^[32]。

5个樟子松人工林年表互相关分析表明后坨子和三家子两个地点樟子松人工林生长存在一定的差异。 三家子试验区的 39年生和 44年生樟子松人工林树轮宽度年表之间呈显著正相关性(r=0.577, P<0.01),与 后坨子工区的 3个樟子松人工林年表间的相关性均不显著;后坨子试验区的 36、52和 58年生樟子松人工林 树轮宽度年表呈显著或极显著正相关,36年生与 52和 58年生樟子松人工林年表相关系数分别为 0.512(P<0.01)和 0.384(P<0.05),52和 58年生樟子松人工林年表的相关系数为 0.832(P<0.01)。

Table 2	2 Statistical charac	teristics of the tree-ri	ng width chronologies	of Pinus sylvestris	var. <i>mongolica</i> plantatio	ons at five ages
林龄 Ages/a	样芯/树 Number of cores	样芯长度 Length of series/a	平均轮宽 Mean	平均敏感度 Mean sensitivity	标准差 Standard deviation	一阶自相关系数 Autocorrelation order 1
36	66/33	1990—2016	0.985	0.185	0.219	0.330
39	83/42	1987—2016	0.990	0.206	0.173	-0.030
44	52/26	1982—2016	0.990	0.191	0.201	0.227
52	28/17	1974—2016	0.992	0.256	0.248	0.204
58	59/30	1967—2016	0.992	0.252	0.263	0.427
林龄 Ages/a	序列间平均 相关系数 Mean correlations among all radii	平均树内 相关系数 Mean correlations within trees	平均树间 相关系数 Mean correlations between trees	信噪比 Signal-to- noise ratio	样本总体代表性 Express population signal	第一主成分所 占方差量 PCA1/%
36	0.441	0.730	0.428	8.971	0.900	49.18
39	0.664	0.801	0.629	5.093	0.836	73.33
44	0.321	0.780	0.305	6.576	0.868	36.72
52	0.384	0.759	0.371	8.852	0.898	43.61
58	0.487	0.804	0.479	18.395	0.948	51.85

表 2 不同林龄樟子松人工林宽度年表的统计特征

PCA1:第一主成分所占方差量 Variance in the first principal component

3.3 樟子松人工林生长与气候及地下水位的关系

樟子松人工林径向生长与月平均气温、月平均最高气温和月平均最低气温间关系多不显著(图5),仅39 年生樟子松人工林年表与当年10月平均气温显著正相关(P<0.05),39、58年生樟子松人工林年表与当年10 月平均最高气温显著正相关(P<0.05),52年生樟子松人工林年表与当年5月平均值最高气温显著负相关,39 年生樟子松人工林年表与当年10月和11月平均最低气温显著正相关(P<0.05)。当年10月气温对39年生 和58年生樟子松人工林生长有重要影响。樟子松人工林年表与季节气温间的相关性结果也表明年表多与当 年秋季气温相关(图6),39年生与58年生樟子松人工林年表与当年秋季9—11月的平均气温与平均最高气 温显著正相关(P<0.05),36、39、52、58年生樟子松人工林年表与当年秋季9—11月的平均最低气温显著正相 关(P<0.05)。

不同林龄樟子松人工林年表对降水的响应不同,36年生樟子松人工林年表与当年11月降水显著正相关 (P<0.05)(图5),39年生樟子松人工林年表与上年9月与上年12月降水显著正相关(P<0.05),52年生樟子 松人工林年表与当年5月降水显著正相关(P<0.05),58年生樟子松人工林年表与当年2月与当年5月降水 显著正相关(P<0.05)。不同林龄樟子松人工林年表与季节与生长季降水量间的相关性也不同(图6),36年 生樟子松人工林年表与当年夏季降水量显著正相关(P<0.05),39年生樟子松人工林与生长季4—10月降水显著正相关(P<0.05),52年生樟子松人工林年表与当年春季降水显著正相关(P<0.05),44年生与58年生樟子松人工林年表与当年春季降水显著正相关(P<0.05),44年生与58年生樟子松人工林年表则与季节上降水量的相关性均不显著。

樟子松人工林年表多与当年夏季的 PDSI 显著相关(图 5—6),36 年生樟子松人工林年表与当年 7—8 月 PDSI 显著正相关(P<0.05),39 年生樟子松人工林年表与当年 7 月 PDSI 显著正相关(P<0.05),52 年生樟子 松人工林年表与当年 6—9 月 PDSI 显著正相关(P<0.05)。36、39 与 52 年生樟子松人工林年表均与当年夏季 PDSI 显著正相关(P<0.05),52 年生还与当年生长季(4—10 月)的 PDSI 显著正相关(P<0.05)。

低林龄樟子松人工林年表与地下水位间的相关性不显著,高林龄樟子松人工林年表与地下水位间相关关系显著(图 5—6)。44年生樟子松人工林年表与当年 8月地下水位显著负相关(P<0.05),58年生樟子松人工 林年表与当年 1—6月地下水位显著负相关(P<0.05)。58年生樟子松人工林年表与前一年冬季、当年春季与 夏季的地下水位显著负相关(P<0.05)。



图 5 不同林龄樟子松人工林的年轮宽度标准年表与逐月气候因子(平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量、PDSI 与地下水位)的 相关系数

Fig.5 The correlation coefficients between tree-ring width standard chronologies from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations of different ages and monthly climate factors (air temperature, maximum air temperature, minimum air temperature, precipitation, PDSI, and groundwater depth)

P9…P12表示前一年9月…12月;虚线表示在0.05水平上显著

3.4 樟子松人工林对极端干旱的弹性

由于樟子松人工林生长与当年夏季 6—8月 PDSI 显著正相关(P<0.05)(图 6),根据 6—8月的平均 PDSI 选出 3个干旱事件:1997年、2000—2003年、2007—2008年和 2014年,由于 2014年干旱后的年份不足 3年,故只计算前三次干旱时段樟子松人工林对极端干旱的弹性,1997年、2000—2003年及 2007—2008年6—8月的平均 PDSI 值分别为:-1.57、-3.55和-1.68。

利用树轮宽度标准指数,计算了不同林龄樟子松人工林对3个干旱事件的抵抗力、恢复力和弹性力

6834



图 6 不同林龄樟子松人工林的年轮宽度标准年表与季节气候因子(平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量、PDSI 与地下水位)的 相关系数

Fig.6 The correlation coefficients between tree-ring width standard chronologies from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations of different ages and seasonal climate factors (air temperature, maximum air temperature, minimum air temperature, precipitation, PDSI, and groundwater depth)





(图7)。在对 1997年干旱事件的响应中,樟子松人工林的抵抗力随林龄增加而增加,恢复力随林龄增加呈减 小趋势,弹性力大小在 1.08—1.27 之间,表明所有林龄樟子松人工林生长均在干旱后恢复到了干旱前水平。 应对 2000—2003年干旱事件时,36、39和44年生樟子松人工林的抵抗力随林龄增加而增加,但 52年生和 58 年生樟子松人工林的抵抗力不再增加,而是有所减小;与抵抗力变化相反,36、39、44年生樟子松人工林的恢 复力降低,52年生和 58年生樟子松人工林的恢复力较高。这时地下水位由 1997年的 1.73m降低至 2003年 的 2.93 m,应对 1997年干旱时,高林龄樟子松人工林可以通过其发达的根系利用地下水增强其抵抗力,而在 2000—2003年高林龄樟子松人工林利用地下水难度增加,加之其相对庞大的地上生物量导致其抵抗力降低。 在对 2007—2008年干旱的响应中,36年生樟子松人工林抵抗力最低,仅为 0.61,弹性力也最低为 0.66,所有 林龄樟子松人工林的弹性力均小于1,表明所有林龄樟子松人工林在干旱后3年均未能恢复到干旱前的水 平,随着干旱频率增加,所有林龄樟子松人工林对干旱的脆弱性增加。



图 8 不同林龄樟子松人工林生长对 3 个干旱事件(1997 年、2000—2003 年和 2007—2008 年)的抵抗力、恢复力和弹性力 Fig.8 Resistance, recovery and resilience of the growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations of different ages to three drought events (1997, 2000—2003 and 2007—2008)

4 讨论

4.1 林龄对樟子松人工林生长与气候及地下水位关系的影响

随林龄增加,樟子松人工林年表的平均敏感度和标准差呈增加趋势,表明老龄樟子松人工林具有更高的 气候敏感性;林龄对年表的信噪比与样本总体代表性影响不明显,但同一取样点年表的信噪比和样本总体代 表性更一致,36、52、58年樟子松人工林的信噪比和样本总体代表性大于 39年和44年樟子松人工林,表明前 者更适合于树轮气候学研究。林龄对平均敏感度和标准差的结果与过去有些研究结果一致,张芬等^[34]研究 发现祁连山东部老龄油松(≥120 a)的平均敏感度和标准差大于幼龄油松(≤70 a),但序列间平均相关系数、 第一主成分所占方差量、信噪比和样本总体代表性均为幼龄树大于老龄树;河南神农山老龄白皮松的敏感性 和标准差大于幼龄树,但幼龄树的信噪比和样本总体代表性大于老龄树^[17];秦岭老龄组太白红杉较中、幼龄 组太白红杉包含更多的气候信息^[35]。

气温对 5 个林龄樟子松人工林的影响多不显著,39 年生和 58 年生樟子松人工林年表与当年秋季某月及 秋季的平均气温与平均最高气温显著正相关,除 44 年生樟子松人工林外,其余林龄年表与秋季平均最低气温 显著正相关,表明秋季气温是影响樟子松人工林生长的一个主要因子。5 个林龄樟子松人工林年表与当年 7 月平均气温和平均最高气温呈负相关关系,虽不显著但相关系数也较大。低林龄樟子松人工林对当年降水的 响应不明显,高林龄(52 年生和 58 年生)樟子松人工林年表与当年 2 月及 5 月的降水量显著正相关。樟子松 人工林对气温与降水的响应结果与之前结果类似,李露露^[36]研究发现:章古台樟子松年表与气温相关性不显 著,但与生长季 5—7 月气温的负相关关系较强,年表与当年 2 月、5 月和 7 月降水相关系数最高,与本研究高 林龄樟子松人工林对降水的响应较一致。Song 等^[21]研究了章古台 1958 年种植的樟子松人工林的生长气候 关系,同样表明高龄林樟子松生长与当年 2 月和 5 月降水的相关性较高。不同林龄樟子松人工林对气温和降 水的响应与其生长发育阶段有关,当年 5 月份早材形成,枝条生长和干物质积累较快,需要较多的水分,老龄 树在蒸发速率增加的压力下,水阻力也增加,进而导致了比幼龄树更高的需水量^[17,37]。6—8 月份为樟子松生 长耗水高峰期,其中 7 月耗水量最大,因此 7 月高温会加快土壤蒸发和植物蒸腾,还导致水分在植物体内的传 输距离和高度增加,引起水分胁迫和气孔过早关闭,抑制树木生长^[30,38],这也导致了樟子松年表与 7 月气温 的负相关关系较大。

36年生、39年生和52年生樟子松人工林年表均与当年夏季6—8月的PDSI显著正相关,表明在生长高

峰期樟子松人工林生长受水热条件的综合影响。44 年生樟子松人工林年表与当年 8 月地下水位显著负相 关,58 年生樟子松人工林年表与上年冬季、当年春夏季的地下水位显著负相关,三家子和后坨子两个取样点 处低林龄樟子松人工林生长受水热条件综合影响,而高林龄樟子松人工林生长则与地下水位密切相关,表明 高林龄樟子松人工林生长对地下水的高度依赖性,基于稳定同位素的不同树龄樟子松水分来源也表明:在土 壤水分较低时,地下水是大树龄樟子松的主要水分来源,可提供 42 年生樟子松树木蒸腾的 60.2%^[39]。 4.2 樟子松人工林对干旱的抵抗力及与地下水位的关系

樟子松人工林对 1997 年干旱事件的抵抗力随林龄增加而增加,恢复力随林龄增加而降低,52 年生和 58 年生樟子松人工林对 2000—2003 年干旱事件的抵抗力则低于低林龄樟子松人工林的抵抗力,加之高林龄樟 子松人工林生长与地下水位存在显著负相关关系,推测高林龄樟子松人工林对 2000—2003 年干旱事件的抵 抗力降低是受到了地下水位下降的影响,地下水位由 1997 年的 1.73 m 降低至 2003 年的 2.93 m,樟子松属浅 根系植物,地下水位降低导致树木无法利用地下水,最终导致其对干旱的抵抗力有所下降。目前,年龄对树木 应对干旱抵抗力、恢复力与弹性力的结论并不一致,如 Zang 等^[40]发现相比于老龄树,幼龄赤松具有更高的气 候敏感性,对干旱的抵抗力更高,两者的恢复力无显著差异;张晓等^[11]也发现树龄会导致天然樟子松应对干 旱能力的差异,小树龄樟子松对干旱的抵抗力更弱,恢复力更强;Rubio-Cuadrado 等^[41]发现生长缓慢的人工 赤松对干旱的抵抗力最大,Sun 等^[25]发现高密度樟子松人工林的抵抗力和弹性力明显小于防护林,而恢复力 结果类似。地下水位影响可能是导致年龄对树木或林分应对干旱抵抗力的影响不一致的重要因素。

1997年干旱及 2000—2003年干旱后,所有林龄樟子松人工林的弹性力均大于 1,樟子松人工林生长均恢 复到了干旱发生前的水平,而在 2007—2008年干旱事件后,樟子松人工林在 3 年内均未能恢复到干旱前状态,且 2007—2008年的 PDSI为-1.68,远大于 2000—2003年的-3.55,2007—2008年樟子松人工林表现出的 弹性力降低是受到了干旱频率及干旱遗留效应的影响,树木对干旱事件表现出一定的生态生理记忆效 应^[25,42],这导致除干旱强度影响外,抵抗力和恢复力还与干旱事件发生的时间及累积有关。

5 结论

本研究建立了5个不同林龄的樟子松人工林树轮宽度年表,发现高林龄樟子松林具有更高的平均敏感度 和标准差,包含更多的气候信息;低林龄樟子松人工林的生长主要受水热因子综合影响,高林龄樟子松人工林 生长主要受地下水位影响。地下水位较浅时,樟子松人工林对干旱的抵抗力随林龄增加而增加,高林龄樟子 松人工林能够通过利用地下水维持较高的抵抗力,随着地下水位降低,高林龄樟子松人工林无法利用地下水, 进而导致其对干旱的抵抗力降低。地下水位对高林龄樟子松人工林生长及其对干旱的抵抗力有重要影响。 最后的干旱事件中樟子松人工林未能恢复到干旱前状态,表明了干旱频率对樟子松人工林的重要影响,即存 在干旱的遗留效应。

参考文献(References):

- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1535 pp.
- [2] Allen C D, Breshears D D, McDowell N G. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. Ecosphere, 2015, 6(78): 1-55.
- [3] Hartmann H, Moura C F, Anderegg W R L, Ruehr N K, Salmon Y, Allen C D, Arndt S K, Breshears D D, Davi H, Galbraith D, Ruthrof K X, Wunder J, Adams H D, Bloemen J, Cailleret M, Cobb R, Gessler A, Grams T E E, Jansen S, Kautz M, Lloret F, O'Brien M. Research frontiers for improving our understanding of drought-induced tree and forest mortality. New Phytologist, 2018, 218(1): 15-28.
- [4] 尚建勋,时忠杰,高吉喜,徐丽宏,吕世海,冯朝阳,王鲁秀.呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应.生态学报,2012,32 (4):1077-1084.
- [5] 李俊霞,白学平,张先亮,常永兴,陆旭,赵学鹏,陈振举.大兴安岭林区南、北部天然樟子松生长对气候变化的响应差异.生态学报, 2017, 37(21):7232-7241.
- [6] Zhang X L, Manzanedo R D, D'Orangeville L, Rademacher T T, Li J X, Bai X P, Hou M T, Chen Z J, Zou F H, Song F B, Pederson N. Snowmelt and early to mid-growing season water availability augment tree growth during rapid warming in southern Asian boreal forests. Global

Change Biology, 2019, 25(10): 3462-3471.

- [7] Xu K, Wang, X P, Liang P H, Wu Y L, An H L, Sun H, Wu P, Wu X, Li Q Y, Guo X, Wen X S, Han W, Liu C, Fan D Y. A new tree-ring sampling method to estimate forest productivity and its temporal variation accurately in natural forests. Forest Ecology and Management, 2019, 433: 217-227.
- [8] 刘立斌,许海洋,郭银明,梁辉,芦晓明,张慧,梁尔源,倪健.基于树木年轮定量重建过去50年贵州典型森林优势树种的地上生物量 与生产力变化.生态学报,2020,40(10):3441-3451.
- [9] Gazol A, Camarero J J, Anderegg W R L, Vicente-Serrano S M. Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26(2): 166-176.
- [10] Fang O Y, Zhang Q B. Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2019, 25(1): 245-253.
- [11] 张晓,潘磊磊, Kwon S, 刘艳书,杨晓晖,时忠杰. 沙地天然樟子松径向生长对干旱的响应. 北京林业大学学报, 2018, 40(7): 27-35.
- [12] Sun J Y, Liu Y. Age-independent climate-growth response of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carrière) in North China. Trees, 2015, 29(2): 397-406.
- [13] Linderholm H W, Linderholm K. Age-dependent climate sensitivity of *Pinus sylvestris* L. in the central Scandinavian Mountains. Boreal Environment Research, 2004, 9(4): 307-317.
- [14] 温晓示,陈彬杭,张树斌,徐凯,叶新宇,倪伟杰,王襄平.不同林龄、树种落叶松人工林径向生长与气候变化的关系.植物生态学报, 2019,43(1):27-36.
- [15] Yu G R, Liu Y B, Wang X C, Ma K P. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in Qilian juniper (Sabina przewalskii Kom.). Trees, 2008, 22(2): 197-204.
- [16] 赵志江,康东伟,李俊清.川西亚高山不同年龄紫果云杉径向生长对气候因子的响应.生态学报,2016,36(1):173-179.
- [17] 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.
- [18] Zhu J J, Kang H Z, Tan H, Xu M L. Effects of drought stresses induced by polyethylene glycol on germination of *Pinus sylvestris* var. mongolica seeds from natural and plantation forests on sandy land. Journal of Forest Research, 2006, 11(5): 319-328.
- [19] Song L N, Zhu J J, Li M C, Zhang J X, Zheng X, Wang K. Canopy transpiration of *Pinus sylvestris* var. mongolica in a sparse wood grassland in the semiarid sandy region of Northeast China. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 250-251; 192-201.
- [20] 宋立宁,朱教君,郑晓. 基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案. 生态学杂志, 2017, 36(11):3249-3256.
- [21] Shi Z J, Xu L H, Dong L S, Gao J X, Yang X H, Lü S H, Feng C Y, Shang J X, Song A Y, Guo H, Zhang X. Growth-climate response and drought reconstruction from tree-ring of Mongolian pine in Hulunbuir, northeast China. Journal of Plant Ecology, 2016, 9(1): 51-60.
- [22] Song L N, Li M C, Zhu J J, Zhang J X. Comparisons of radial growth and tree-ring cellulose d¹³C for *Pinus sylvestris* var. mongolica in natural and plantation forests on sandy lands. Journal of Forest Research, 2017, 22(3): 160-168.
- [23] 李露露,李丽光,陈振举,周永斌,张先亮,白学平,常永兴,肖建强.辽宁省人工林樟子松径向生长对水热梯度变化的响应.生态学报, 2015,35(13):4508-4517.
- [24] 陆旭. 吉林省人工林樟子松径向生长及其空间气候响应研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [25] Sun S J, Lei S, Jia H S, Li C Y, Zhang J S, Meng P. Tree-ring analysis reveals density-dependent vulnerability to drought in planted Mongolian pines. Forests, 2020, 11(1): 98.
- [26] Fritts H C. Tree rings and climate. Scientific American, 1976, 226(5): 95-99.
- [27] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-ring Dating. Arizona: University of Arizona Press, 1968: 1-73.
- [28] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization [D]. Tucson: University of Arizona, 1985: 1-171.
- [29] 于致龙,韩辉,宋鸽.章古台地下水位与降水量变化动态相关性分析.防护林科技,2018,(3):26-29.
- [30] Lloret F, Keeling E G, Sala A. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. Oikos, 2011, 120(12): 1909-1920.
- [31] Carrer M, Urbinati C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in Larix decidua and Pinus cembra. Ecology, 2004, 85(3): 730-740.
- [32] 陈诗音,赵思媛,和金福,胡善斌,方克艳.福州鼓山不同树龄马尾松记录的环境变化信息.亚热带资源与环境学报,2019,14(2): 19-27.
- [33] 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 Applied Meteorology and Climatology, 1984, 23(2): 201-213.
- [34] 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.
- [35] 闫伯前,林万众,刘琪璟,于健.秦岭不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应.北京林业大学学报,2017,39(9):58-65.
- [36] 李露露. 辽宁省人工林樟子松对气候变化响应的树木年轮学研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
- [37] Ryan M G, Yoder B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth. Bioscience, 1997, 47(4): 235-242.
- [38] Wang X C, Zhang M H, Ji Y, Li Z S, Li M, Zhang Y D. Temperature signals in tree-ring width and divergent growth of Korean pine response to recent climate warming in northeast Asia. Trees, 2017, 31(2): 415-427.
- [39] Song L N, Zhu J J, Li M C, Zhang J X. Water use patterns of *Pinus sylvestris* var. mongolica trees of different ages in a semiarid sandy lands of Northeast China. Environmental and Experimental Botany, 2016, 129: 94-107.
- [40] Zang C, Pretzsch H, Rothe A. Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. Trees, 2012, 26(2): 557-569.
- [41] Rubio-Cuadrado Á, Camarero J J, Aspizua R, Sánchez-González M, Gil L, Montes F. Abiotic factors modulate post-drought growth resilience of Scots pine plantations and rear-edge Scots pine and oak forests. Dendrochronologia, 2018, 51: 54-65.
- [42] Galiano L, Martínez-Vilalta J, Lloret F. Carbon reserves and canopy defoliation determine the recovery of Scots pine 4 yr after a drought episode. New Phytologist, 2011, 190(3): 750-759.