

祁连山中部青海云杉年内径向生长季节变化及其对环境因子的响应

石建周¹, 刘贤德^{1,2}, 田青¹, 万艳芳³, 赵维俊²

(1.甘肃农业大学林学院,兰州 730070;2.甘肃省祁连山水源涵养林研究院,
甘肃 张掖 734000;3.中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,北京 100091)

摘要:以祁连山中段排露沟小流域青海云杉为研究对象,2018年5—10月应用带状树木径向生长记录仪对4株青海云杉径向生长过程进行测定,并同步测定气象因子和土壤温度、湿度,分析单株青海云杉径向生长的季节变化特征及其树木个体之间的差异,确定青海云杉在不同生长阶段的限制因子。结果表明:(1)4株青海云杉6月8日左右开始生长,7月28日左右结束生长,生长期约51天。(2)青海云杉径向生长季节变化特征在个体之间存在差异,胸径较小的树木($DBH=10.0\text{ cm}$ 和 11.0 cm) ,生长启动晚,结束早,生长期短,年累积生长量少,而胸径较大的树木($DBH=18.3\text{ cm}$ 和 21.0 cm)正好相反,生长期长,年累积生长量多。(3)青海云杉径向生长具有明显的季节变化模式,分为3个阶段,分别为启动生长阶段(5—6月初)、快速生长阶段(6月初至7月末)和结束生长阶段(8—10月),平均生长速率分别为 $0.35, 12.99, 0.54\mu\text{m/d}$ 。(4)青海云杉在不同的生长阶段限制因子不同,其中,启动生长阶段,降雨和土壤温度是限制生长的主要因子;快速生长阶段,降雨和土壤体积含水量是主要因子。因此,从整个生长季来看,土壤温度和水分是影响青海云杉年内径向生长的主要因子。

关键词:青海云杉;径向生长;季节动态;环境因子

中图分类号:P942; S791.18 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)02-0261-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.033

Seasonal Variation of Annual Radial Growth of *Picea crassifolia* and Its Response to Environmental Factors in the Central Qilian Mountains

SHI Jianzhou¹, LIU Xiande^{1,2}, TIAN Qing¹, WAN Yanfang³, ZHAO Weijun²

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2. Institute of Water Resources Conservation Forests in the Qilian Mountains, Zhangye, Gansu 734000;

3. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract: Took Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the small watershed of Pailugou in the central Qilian Mountains as the research object. From May to October 2018, the radial growth process of four strains of Qinghai spruce was measured using the belt tree radial growth recorder, and the meteorological factors were simultaneously measured. Based on the soil temperature and humidity, the seasonal variation characteristics of the radial growth of individual Qinghai spruce and the differences between trees were analyzed, and the limiting factors of Qinghai spruce in different growth stages were also determined. The results showed that: (1) The four Qinghai spruce plants began to grow on June 8 and ended on July 28, with a growth period of about 51 days. (2) The characteristics of the radial growth season of Qinghai spruce were different among individuals. The growth of trees with smaller DBH ($DBH=10.0\text{ cm}$ and 11.0 cm) started later and ended earlier, resulting in the shorter growing period and less annual cumulative growth, while trees with larger DBH ($DBH=18.3\text{ cm}$ and 21.0 cm) gave an opposite results, with a longer growing period and more annual cumulative growth. (3) The radial growth of Qinghai spruce had an obvious seasonal change pattern, which was divided into three stages: the initial growth stage (May to early June), the rapid growth stage (early

June to late July) and the end growth stage (August to October) with the average growth rates of $0.35 \mu\text{m/d}$, $12.99 \mu\text{m/d}$ and $0.54 \mu\text{m/d}$ respectively. (4) The limiting factors of Qinghai spruce growth were different among different growth stages: in the initial growth stage, rainfall and soil temperature were the main factors restricting growth, and during the rapid growth stage, rainfall and soil volumetric water content were the main factors. Therefore, from the perspective of the entire growing season, soil temperature and moisture were the main factors affecting the annual radial growth of Qinghai spruce.

Keywords: Qinghai spruce; radial growth; seasonal variation; environmental factors

随着全球气候变暖,干旱程度加剧^[1-2],树木生长受到不同程度的影响^[3-4],从而改变森林生态系统的生产力或碳储量^[5]。因此,在气候变化背景下,明确树木生长动态变化及其对环境因子的响应,有助于评估区域森林发展趋势,为森林保护和管理提供理论依据。

目前,许多学者主要集中于研究树木径向生长的年际变化,分析了年际尺度径向生长和气候因子的关系^[6-9],但这些研究都是基于年轮宽度与气候要素的统计分析,其研究尺度较长,缺乏短期高频树木径向生长过程的动态研究^[10]。树木径向生长记录仪能够连续监测树木年内径向生长变化,可以在较短的时间尺度上研究树木生长过程及其对环境因子的响应,可为年际尺度径向生长的研究提供解释和验证^[11]。近年来,国内外学者采用树木径向生长记录仪对不同区域、不同树种进行了研究。Kocher 等^[12]研究发现,在不同时间尺度提取的径向生长量和空气相对湿度的相关关系更加稳定;牛豪阁等^[13]发现,时间尺度延长能削弱青杆(*Picea wilsonii*)树干水分变化对径向生长量的干扰,但水分依然是青杆径向生长的限制因子;Liu 等^[14]发现,春季快速生长期和秋季最小生长期主要受降水和温度的影响,夏季持续收缩期受土壤水分的限制。

青海云杉(*Picea crassifolia*)是祁连山区主要的优势树种,分布面积占水源涵养林总面积的 24.7%,占乔木林总面积的 75.7%^[15],它对于防风固沙、调节区域气候、涵养水源等至关重要^[16-17]。目前,部分学者对青海云杉的生长特征进行了研究,主要集中在年轮宽度与气候要素的响应分析^[18-19]、直径结构对径向生长的影响^[20]以及不同径级间季节生长特征^[21],但针对单株青海云杉季节变化特征,以及在不同的季节生长阶段与环境因子的响应关系等方面尚不明确。因此,本文以祁连山排露沟小流域青海云杉为研究对象,对年内径向生长和环境因子进行同步观测,分析青海云杉径向生长的季节特征及其树木个体之间的差异,确定生长季不同生长阶段径向生长的限制因子,为研究青海云杉径向生长对未来气候变化的响应提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于祁连山中段排露沟小流域($38^{\circ}32' - 38^{\circ}33' \text{N}$, $100^{\circ}17' - 100^{\circ}18' \text{E}$),流域面积为 2.74 km^2 ,海拔 $2\,600 \sim 3\,800 \text{ m}$,地势较陡、地形破碎,属于典型的“V”地形,纵坡比降 $1:4.2$ ^[22]。该流域属大陆性高寒山地森林草原气候^[23]。基于祁连山西水生态定位站多年观测资料(1994—2013 年),该流域年平均气温为 $0.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温为 $28.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温为 $-36.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 374.1 mm ,主要集中分布在 5—9 月,年均相对湿度 60%,该流域土壤呈明显的垂直分异,土壤类型沿海拔从低到高依次为山地栗钙土、山地灰褐土、高山草甸土和高山荒漠土。

该流域主要的乔木树种为青海云杉和祁连圆柏(*Sabina przewalskii*),其中青海云杉呈斑块状或条状分布在海拔 $2\,700 \sim 3\,300 \text{ m}$ 的阴坡和半阴坡,多为中龄林和近成熟林,郁闭度为 0.6;灌丛主要分布有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)等;草本主要分布有马蔺(*Iris lactea*)、棘豆(*Oxytropis*)、针茅(*Stipa capillata*)和珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等^[20]。

2 研究方法

2.1 样地布设

在海拔 $2\,700 \text{ m}$ 处选取 1 块大小为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的藓类青海云杉林样地,其坡向为 350° ,位于坡面的下坡,平均坡度为 23° 。该林分密度为 $1\,125 \text{ 株}/\text{hm}^2$,林龄约为 86 年,郁闭度 0.55;平均树高为 $(11.7 \pm 4.7) \text{ m}$,平均胸径为 $(15.8 \pm 7.7) \text{ cm}$,平均冠幅为 $(3.5 \pm 1.2) \text{ m}$,平均枝下高为 $(3.6 \pm 1.8) \text{ m}$ 。林下灌木层主要有银露梅(*Potentilla glabra*),盖度约为 5%;草本层主要有披针苔草(*Koeleria cristata*)、棘豆(*Oxytropis*)、鲜生马先蒿(*Pedicularis muscicola*)等,盖度约为 37%。

2.2 径向生长的测定

为了描述整个样地青海云杉的径向生长状况,在样地内选取胸径、树高不同的 4 株健康、无病害的样树(表 1)。在样树胸径 1.3 m 处安装 DRL26 带状树

干径向变化记录仪(精度: $\pm 2 \mu\text{m}$),用于连续监测青海云杉的径向变化。具体安装方法:刮去垂直于地面1.3 m处树干的枯死树皮,安装传感器和磁带,调节电阻使得初始值为 2400Ω 。数据采集间隔为30 min。测定时间为2018年5—10月。

表1 样树基本特征

样树	胸径/cm	树高/m	枝下高/m	冠幅/m	树龄/a
1	10.0	6.1	2.1	3.7	65
2	11.0	14.2	4.8	2.4	68
3	18.3	14.0	3.2	4.8	94
4	21.0	13.5	1.7	5.0	111

2.3 径向生长量提取

树干的径向变化包括2部分:一部分是形成层细胞分裂、伸长以及细胞壁增厚等引起的不可逆的生长过程;另一部分是树体自身含水量变化引起的可逆过程。目前,树木径向生长量的提取方法有日平均值法^[13]、日最大值法^[24-25]和周期循环法^[26]。研究^[27]表明,3种方法提取的树干径向生长量序列无显著性差异。因此,本研究采用日平均值法提取青海云杉径向生长量,即用下一个时间段径向变化量的平均值减去当前径向变化量的平均值,当计算值为正值时则为径向生长量,当为负值时则视为没有增长,径向生长量记为零。

2.4 径向生长的拟合和阶段划分

Gompertz生长模型被广泛用于描述树木的季节生长模式^[21,24],本研究采用Gompertz生长模型拟合单株青海云杉5—10月树干半径的累积生长量:

$$Y = A \exp(-e^{\beta-kx}) \quad (1)$$

式中: Y 为树干半径累积生长量(μm); A 为累积生长量的上渐近线; β 为 x 轴位置参数; k 为变化率参数; t 为时间(d),以年积日表示。采用最小二乘法进行参数估计,通过计算拟合函数的一阶导数得到生长速率曲线。以 $4 \mu\text{m}/\text{d}$ 的生长速率作为青海云杉启动生长和结束生长的时间阈值^[26,28]。这一数值对应于径向生长监测仪的精度和累积径向生长的变化。

按青海云杉生长开始和停止的时间,累积径向生长量的季节变化(5—10月)可划分为3个阶段(图2):(1)启动生长阶段,从第120天到生长开始的时间,即日生长速率 $<4 \mu\text{m}/\text{d}$;(2)快速生长阶段,从生长开始到停止生长的时间,即日生长速率 $>4 \mu\text{m}/\text{d}$;(3)结束生长阶段,从停止生长到第303天的时间,即日生长速率 $<4 \mu\text{m}/\text{d}$ 。

2.5 环境因子测定

在距离样地50 m处布设美国Campbell公司生

产的CR3000自动气象站,用于连续监测空气温度(T_a , $^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度(RH ,%)、降水量(P ,mm)以及林内土壤体积含水量(M_s ,%)和土壤温度(T_s , $^{\circ}\text{C}$)等指标。根系层土壤含水量是树木生长的主要水分来源,研究区青海云杉根系层主要分布在0—60 cm土层。因此,分别在0—10,10—20,20—40,40—60 cm土层测定土壤体积含水量和土壤温度。数据采集时间间隔为10 min。

根据空气温度和空气相对湿度,计算饱和水汽压差(VPD,kPa):

$$VPD = 0.611 \times \exp\left(\frac{17.502 \times T_a}{T_a + 240.97}\right) \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (2)$$

式中: T_a 为空气温度($^{\circ}\text{C}$); RH 为空气相对湿度(%);VPD为饱和水汽压差(kPa)。

2.6 数据处理与分析

本文通过Microsoft Excel 2010进行数据统计,采用SPSS 19.0软件对不同生长阶段的4株青海云杉日均径向生长量和环境因子进行Pearson相关分析,使用Origin 2018软件进行绘图。

3 结果与分析

3.1 环境因子变化特征

2018年生长季(5—10月),排露沟小流域总降雨量为361.6 mm,总降雨事件72场,其中,降雨量 $<10 \text{ mm}$ 的降雨事件最多,为59场,占总降雨事件的81.9%;降雨量 $>15 \text{ mm}$ 的降雨事件仅有3场,占总降雨事件的4.1%,故研究区主要以降雨量 $<10 \text{ mm}$ 的小降雨事件为主(图1a)。5—10月生长季,该流域气温较高,空气相对湿度低。日平均气温为 9.9°C ,日最高气温和日最低气温分别为 $21.3, -2.5^{\circ}\text{C}$ (图1b)。空气相对湿度季节变化幅度较大,变化范围为18.5%~93.4%,平均值为59.9%(图1c)。饱和水汽压差的变化范围为0.03~1.65 kPa,平均值为0.52 kPa(图1d)。土壤温度随着生长季的进行呈先增大后减小的变化趋势,变化范围为 $0.42 \sim 10.19^{\circ}\text{C}$,平均值为 5.48°C (图1e)。受降雨的影响,0—60 cm土层土壤体积含水量波动较大,变化范围为 $0.13 \sim 0.36 \text{ m}^3/\text{m}^3$,平均值为 $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^3$,但6月土壤体积含水量较低,平均值为 $0.17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (图1f)。

3.2 单株青海云杉径向生长的季节变化特征

通过Gompertz函数对4株青海云杉平均径向生长序列进行拟合(图2a),拟合方程 R^2 均达到0.9以上,表明Gompertz函数能够较好地解释90%以上的径向生长变化。从表2可以看出,青海云杉平均径向生长开始时间为6月8日(第158天),结束生长时间为7

月 28 日(第 208 天),生长期为 51 天。整个生长季(5—10 月),青海云杉平均生长速率为 $3.90 \mu\text{m}/\text{d}$,平

均最大生长速率为 $20.89 \mu\text{m}/\text{d}$,出现于 6 月 25 日(第 175 天),平均累积径向生长量为 $714.2 \mu\text{m}$ 。

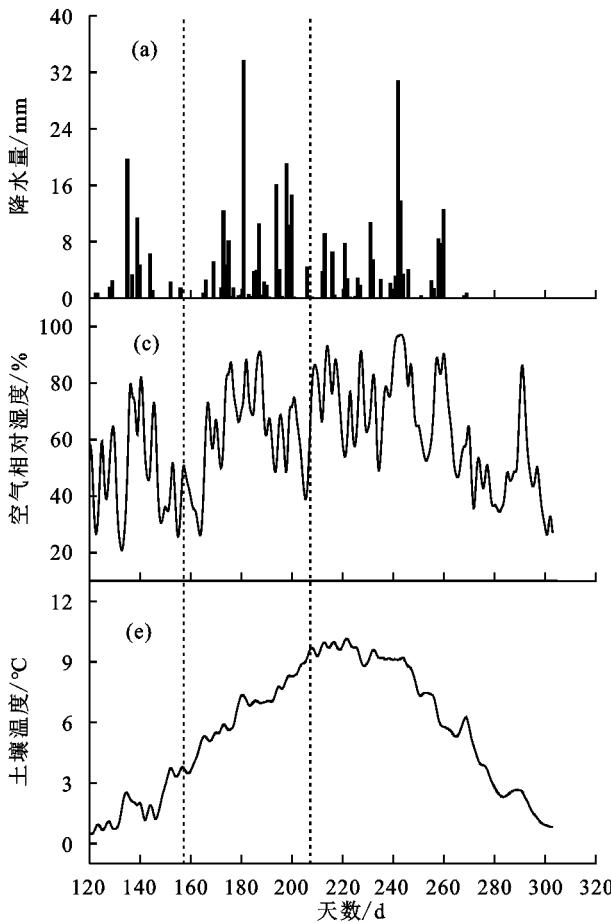


图 1 2018 年生长季主要环境因子特征

从图 2 可以看出,青海云杉径向生长季节变化在树木个体间存在明显的差异。从表 2 可以看出,胸径较小的样树 1(DBH=10.0 cm)和样树 2(DBH=11.0 cm)生长启动较迟,分别为 6 月 12 日(第 162 天)和 6 月 14 日(第 164 天),生长结束较早,分别为 7 月 14 日(第 194 天)和 7 月 18 日(第 198 天),最大生长速率分别为 $14.05, 18.16 \mu\text{m}/\text{d}$,累积生长量分别为 $359.0, 451.9 \mu\text{m}$;胸径较大的样树 3(DBH=18.3 cm)和样树 4(DBH=21.0 cm)生长启动较早,为 6 月 5 日(第 155 天),比样树 1 和 2 生长约提前了 9 天;生长结束晚,分别为 8 月 6 日(第 217 天)和 8 月 4 日(第 215 天);最大生长速率分别为 $27.55, 25.25 \mu\text{m}/\text{d}$,是样树 1 和 2 的 1.6 倍;累积径向生长量分别为 $1070.8, 981.1 \mu\text{m}$,是样树 1 和 2 的 2.5 倍。

以 $4 \mu\text{m}/\text{d}$ 的生长速率作为青海云杉生长启动和结束的时间阈值,可将青海云杉累积径向生长季节变化划分为 3 个阶段,即启动生长阶段、快速生长阶段和结束生长阶段(图 2a)。在启动生长阶段(5—6 月初),平均生长速率为 $0.35 \mu\text{m}/\text{d}$;在快速生长阶段(6 月初—7 月末),径向生长快速增加,平均生

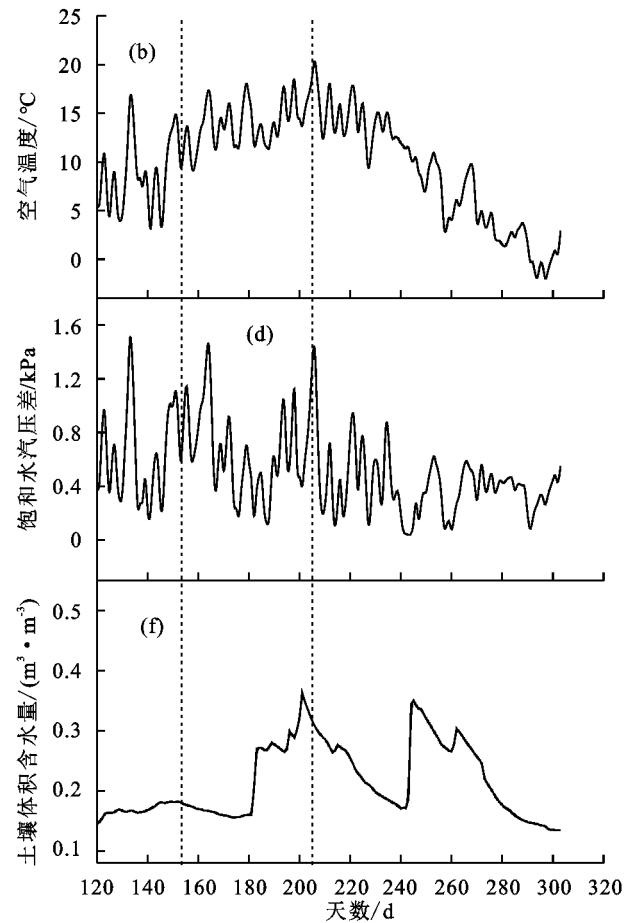


图 2 青海云杉累积径向生长量及生长速率

长速率为 $12.99 \mu\text{m}/\text{d}$,在结束生长阶段(8—10 月),径向生长趋于稳定,但出现轻微收缩,平均生长速率为 $0.54 \mu\text{m}/\text{d}$ 。

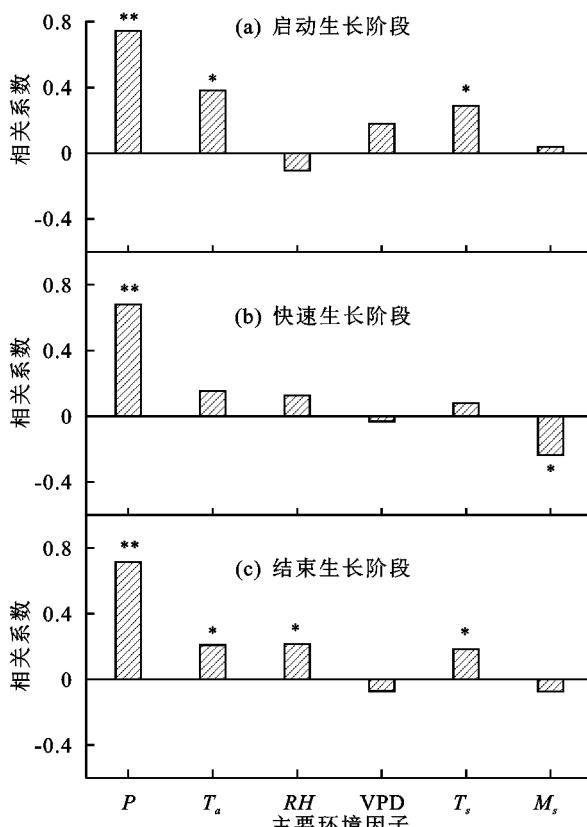
3.3 日均径向生长量与环境因子的相关性分析

从图3可以看出,启动和结束生长阶段,4株青海云杉日均径向生长量与降雨量(P)呈极显著正相关($p<0.01$),相关系数最大,分别为0.75和0.71,与空气温度(T_a)和土壤温度(T_s)呈显著正相关($p<0.05$)。但日均径向生长量与饱和水汽压差(VPD)、空气相对湿度(RH)和土壤体积含水量(M_s)呈负相关。

表2 青海云杉径向生长的季节特征

样树 编号	累积径向 生长量/ μm	启动生长 时间/d	结束生长 时间/d	生长期/d	最大生长速率/ ($\mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	最大生长速率 出现时间/d
1	359.0	162	194	33	14.05	174
2	451.9	164	198	35	18.16	176
3	1070.8	155	217	63	27.55	176
4	981.1	155	215	61	25.25	175
平均值	714.2	158	208	51	20.89	175

快速生长阶段,青海云杉日平均径向生长量与降雨量(P)呈极显著正相关($p<0.01$),相关系数最大,为0.68;与土壤体积含水量(M_s)呈显著负相关($p<0.05$),相关系数为-0.24;与饱和水汽压差(VPD)呈负相关,与空气温度(T)、空气相对湿度(RH)和土壤温度(T_s)呈正相关,相关系数较低,且不显著。



注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

图3 不同生长阶段日均径向生长量与环境因子的相关性分析

4 讨论

4.1 单株青海云杉季节生长模式

青海云杉径向生长具有明显的季节变化特征,当

(RH)和土壤体积含水量(M_s)的相关性在2个阶段正好相反。其中,启动生长阶段,日均径向生长量与饱和水汽压差(VPD)和土壤体积含水量(M_s)呈正相关,与空气相对湿度(RH)呈负相关,结束生长阶段,日均径向生长量与饱和水汽压差(VPD)和土壤体积含水量(M_s)呈负相关,与空气相对湿度(RH)呈显著正相关。

快速生长阶段,青海云杉启动生长(6 月 8 日左右), 7 月 28 日左右结束生长,生长期约 51 天。Tian等^[28]研究表明,祁连山中部青海云杉 5 月上旬开始生长, 7 月末到 8 月初结束生长,生长期较本研究中树种生长多 30 天左右,主要原因是树木生长差异受地形、树木年龄以及当年的降雨和温度影响。不同胸径青海云杉径向生长季节变化模式相同,但生长启动、结束和最大生长速率在树木个体之间存在差异。本研究发现,胸径较小的树木生长启动晚,结束早,生长期短,而胸径较大的树木正好相反,这可能是由于小径级的树木处于林冠下层,根系分布浅,容易受到温度和水分条件的限制,这与Wan等^[21]的研究结果基本一致。另外,本研究还发现,胸径较大的树木比胸径较小树木的生长速率更快,累积生长量更多,这可能是由于大径级的树木位于林分上层,对光热资源的竞争占优势,能够获得更多的光热资源,生长速率快,累积径向生长量多,容易形成宽年轮;而小径级的树木位于林分下层,对水热资源的竞争处于劣势,生长速率缓慢,累积径向生长量较少,容易形成窄年轮^[29],这与大多数学者^[20-21,30]对青海云杉的研究结果一致。

4.2 青海云杉径向生长对环境因子的响应

树木的径向生长主要受水分与温度的影响,但在不同的生长阶段主导的环境因子不同^[14,31]。Tian等^[28]研究发现,土壤温度是限制青海云杉开始生长的主导因子,当 40 cm深土壤温度 >0 ℃,青海云杉开始生长;李兴欢等^[24]研究发现,降雨和最低气温对小兴安岭红松(*Pinus koraiensis*)生长影响最大;管伟等^[32]研究发现,降雨和气温是影响六盘山华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)直径变化的主要因子。本研究发现,在整个生长季,青海云杉平均径向生长量与

降雨量和温度的相关性较高,表明降雨量和温度对青海云杉的径向生长影响较大。降雨通过增加土壤体积含水量,促进树干细胞生长,另外,树皮因吸水膨胀而导致的径向增长^[33]。土壤温度影响树木光合产物的形成、运输和积累,土壤温度过低会抑制根系对水分和养分的吸收,进而影响树木的径向生长过程^[34]。

青海云杉在不同的生长阶段主导的环境因子有所不同。启动生长阶段,青海云杉日均径向生长量和降雨量、空气温度、土壤温度呈显著正相关。在生长初期降雨增加使得土壤体积含水量升高,进而有利于夜间补水,导致形成层细胞增大^[35]。空气温度升高导致土壤温度上升,当土壤温度达到一定阈值,土壤开始解冻,树木根系恢复活力,进行养分和水分的吸收,树木开始生长。因此,降雨和土壤温度是影响青海云杉启动生长的主要因子。这与六盘山华北落叶松径向生长的研究^[32]结果一致。但 Wang 等^[36]发现,空气温度是限制青海云杉开始生长的主导因子,即当空气温度 $>5^{\circ}\text{C}$ 时,青海云杉开始生长,这可能与当年生长季初期的降雨量和温度有关,导致青海云杉生长开始的限制因子不同。

快速生长阶段,青海云杉日均径向生长量与降雨量呈正相关,与土壤体积含水量呈负相关,这与祁连山东部青杆的研究^[13]结果一致,但六盘山华北落叶松径向生长与降雨量和土壤体积含水量呈正相关^[14],这可能是由于该研究区 7 月份降雨比较集中(占生长季总降雨量的 35%),导致土壤体积含水量升高,土壤温度降低,进而影响树木根系对养分和水分的吸收。因此,降雨量和土壤体积含水量是限制青海云杉快速生长的主要因子。

结束生长阶段,日均径向生长量与降雨量、空气温度、相对湿度和土壤温度呈正相关。但在生长结束阶段,气温($>11^{\circ}\text{C}$)、土壤温度($>4^{\circ}\text{C}$)和水分条件均适宜树木生长,因此,限制青海云杉生长结束的并非环境因子,而是由树木内在的生理机制控制,这与 Tian 等^[28]关于青海云杉径向生长对环境因子的响应研究结果一致。

5 结论

(1) 4 株青海云杉 6 月 8 日左右开始生长,7 月 28 日左右结束生长,生长期约 51 天,6 月 25 日生长速率达到最大值,为 $20.89 \mu\text{m}/\text{d}$ 。

(2) 青海云杉径向生长季节变化特征在个体之间存在差异,胸径较大($\text{DBH}=18.3 \text{ cm}$)的树木,生长启动最早,结束最晚,最大生长速率最大,年累积生长量最多;其次是胸径最大($\text{DBH}=21.0 \text{ cm}$)的树木;

胸径较小($\text{DBH}=10.0 \text{ cm}$ 和 11.0 cm)的树木,生长启动较迟,结束时间较早,年累积生长量较少。

(3) 青海云杉径向生长的季节变化特征可分为启动生长阶段、快速生长阶段和结束生长阶段,但不同生长阶段的限制因子不同。其中,土壤温度和水分是影响青海云杉径向生长的主导环境因子。

参考文献:

- [1] Peng C H, Ma Z H, Lei X D, et al. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests[J]. Nature Climate Change, 2011, 1(9): 467-471.
- [2] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(2): 52-58.
- [3] Deslauriers A, Anfodillo T, Rossi S, et al. Using simple causal modeling to understand how water and temperature affect daily stem radial variation in trees[J]. Tree Physiology, 2007, 27(8): 1125-1136.
- [4] Boisvenue C, Running S W. Impacts of climate change on natural forest productivity-evidence since the middle of the 20th century[J]. Global Change Biology, 2010, 12(5): 862-882.
- [5] 范丹阳,赵慧颖,李宗善,等.伊春地区红松和红皮云杉径向生长对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(4): 1150-1160.
- [6] 康剑,蒋少伟,黄建国.阿尔泰山萨彦岭 4 种优势树种径向生长对气候因子的响应[J].生态学报,2020,40(17): 6135-6146.
- [7] 温晓示,陈彬杭,张树斌,等.不同林龄、树种落叶松人工林径向生长与气候变化的关系[J].植物生态学报,2019, 43(1): 27-36.
- [8] 张贊,尹定财,张卫国,等.普达措国家公园 2 个针叶树种径向生长对温度和降水的响应[J].生态学报,2018,38(15): 5383-5392.
- [9] 韩艳刚,周旺明,齐麟,等.长白山树木径向生长对气候因子的响应[J].应用生态学报,2019,30(5): 1513-1520.
- [10] Zhang Y, Bergeron Y, Gao L S, et al. Tree growth and regeneration dynamics at a mountain ecotone on Changbai Mountains, Northeastern China: Which factors control species distributions? [J] Ecoscience, 2014, 21(3/4): 387-404.
- [11] 董满宇,江源,杨浩春,等.芦芽山林线白杆生长季径向生长动态[J].植物生态学报,2012,36(9): 956-964.
- [12] Kocher P, Horna V, Leuschner C. Environmental control of daily stem growth patterns in five temperate broad-leaved tree species[J]. Tree Physiology, 2012, 32(8): 1021-1032.
- [13] 牛豪阁,张芬,于爱灵,等.祁连山东部青杆年内径向生

- 长动态对气候的响应[J].生态学报,2018,38(20):7412-7420.
- [14] Liu Z B, Wang Y H, Tian A, et al. Intra-annual variation of stem radius of *Larix principis-rupprechtii* and its response to environmental factors in Liupan Mountains of Northwest China[J/OL].Forests,2017,8(10):e382.
- [15] 王金叶,王艺林,金博文,等.干旱半干旱区山地森林的水分调节功能[J].林业科学,2001,37(5):120-125.
- [16] 拓锋,刘贤德,黄冬柳,等.祁连山大野口流域青海云杉种群数量动态[J].生态学报,2021,41(17):6871-6882.
- [17] 车宗玺,刘贤德,敬文茂,等.祁连山林区苔藓垂直分布特征与水文功能分析[J].水土保持学报,2006,20(6):71-74.
- [18] 王彬,于澎涛,于艺鹏,等.祁连山不同年龄青海云杉径向生长对气候变化的响应[J].林业科学,2021,57(3):1-8.
- [19] 王延芳,张永香,勾晓华,等.祁连山中部低海拔地区青海云杉径向生长的气候响应机制[J].生态学报,2020,40(1):161-169.
- [20] 李晓青,刘贤德,王立,等.祁连山青海云杉直径结构及其对径向生长的影响[J].干旱区研究,2017,34(5):1117-1123.
- [21] Wan Y F, Yu P T, Li X Q, et al. Seasonal pattern of stem diameter growth of *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains, Northwestern China[J].Forests,2020,11(5):e494.
- [22] 芦倩,李毅,刘贤德,等.祁连山排露沟流域土壤有机碳空间变异性研究[J].水土保持学报,2020,34(5):238-243.
- [23] 冯芳,冯起,刘贤德,等.祁连山排露沟流域降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源[J].中国沙漠,2017,37(5):997-1005.
- [24] 李兴欢,刘瑞鹏,毛子军,等.小兴安岭红松径向变化及其对气象因子的响应[J].生态学报,2014,34(7):1635-1644.
- [25] 季倩雯,郑成洋,张磊,等.河北塞罕坝樟子松径向生长动态变化及其与气象因子的关系[J].植物生态学报,2020,44(3):257-265.
- [26] Ma J, Guo J B, Wang Y H, et al. Variations in stem radii of *Larix principis-rupprechtii* to environmental factors at two slope locations in the Liupan Mountains, Northwest China[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32(2):513-527.
- [27] Deslauriers A, Rossi S, Anfodillo T. Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? [J].Dendrochronologia,2008,25(2):113-124.
- [28] Tian Q Y, He Z B, Xiao S C, et al. Response of stem radial growth of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) to environmental factors in the Qilian Mountains of China [J].Dendrochronologia,2017,44:76-83.
- [29] 王梅,达光文,王英成,等.祁连山青海云杉天然林林分径级结构空间分布格局分析[J].林业资源管理,2013(6):127-132,147.
- [30] 肖生春,肖洪浪,司建华,等.胡杨径向生长日变化特征分析[J].冰川冻土,2010,32(4):816-822.
- [31] Silva R P D, Santos J D, Tribuzi E S, et al. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in Central Amazon, Brazil[J].Forest Ecology and Management,2002,166(1/3):295-301.
- [32] 管伟,熊伟,王彦辉,等.六盘山北侧华北落叶松树干直径生长变化及其对环境因子的响应[J].林业科学,2007,43(9):1-6.
- [33] 谭红朝,李秧秧.树干直径变化与其水分传输和贮存关系研究进展[J].西北林学院学报,2007,22(6):51-55.
- [34] Körner C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation[J].Oecologia,1998,115(4):445-459.
- [35] Zweifel R, Zimmermann L, Newbery Z D M. Intra-annual radial growth and water relations of trees: Implications towards a growth mechanism[J].Journal of Experimental Botany,2006,57(6):1445-1459.
- [36] Wang B, Chen T, Xu G B, et al. Alpine timberline population dynamics under climate change: A comparison between Qilian juniper and Qinghai spruce tree species in the middle Qilian Mountains of northeast Tibetan Plateau[J].Boreas,2016,45(3):411-422.