

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220616

# 不同树龄雪岭云杉径向生长变化特征与模拟研究

侯天皓<sup>1,2</sup>, 姜盛夏<sup>2\*</sup>, 王勇辉<sup>1</sup>, 张同文<sup>2</sup>, 喻树龙<sup>2</sup>, 王兆鹏<sup>4</sup>,  
郭冬<sup>2</sup>, 如先古丽·阿不都热合曼<sup>1,2</sup>, 宋京徽<sup>2,3</sup>

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830054; 2. 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室, 新疆树木年轮生态实验室, 新疆乌鲁木齐 830002; 3. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆乌鲁木齐 830046; 4. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江哈尔滨 150025)

**摘要:** [目的] 利用天山北坡中段的雪岭云杉 (*Picea schrenkiana*) 资料, 建立上、下林线的树轮宽度年表, 并进行树木径向生长特征分析。[方法] 将下线雪岭云杉按树龄划分为幼龄组、中龄组与老龄组, 计算不同树龄雪岭云杉树木胸高断面面积增长量 (BAI), 以此建立 ARIMA 模型, 模拟分析雪岭云杉径向生长过程。[结果] 与上树线相比, 下树线的树轮宽度年表中蕴含着更多的气候信息。ARIMA 模型模拟的 3 个树龄组雪岭云杉 BAI 变化中, 中龄组观测值与模拟值拟合效果最优 ( $R^2 = 0.832$ )。因 ARIMA 模型基于单变量自身变化趋势进行建模, 故结合现有气象数据进行气候突变前后生长趋势变化分析, 发现幼龄雪岭云杉实测 BAI 总体上增长显著, 但增速逐渐减缓。[结论] 中、老龄雪岭云杉 BAI 在气温突变前呈减小趋势, 在气温突变后, 中龄云杉 BAI 趋于平稳, 老龄云杉 BAI 由减小趋势转变为增加趋势。

**关键词:** 雪岭云杉; 树木年轮; 年表特征; ARIMA 模型; 断面面积增长量 (BAI)

**中图分类号:** S718.42

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2023)03-0011-11

在树木的生命周期中, 随着年龄的增加, 树木的根系、枝干、胸径也会不断生长, 对水分的汲取及土壤中养分的吸收能力增强, 进而表现出不同树龄的树木在径向生长方面存在差异<sup>[1]</sup>。随着树木年代学研究的深入, 树龄对树木径向生长的不确定性受到了国内外学者的广泛关注。如 Hans 等<sup>[2]</sup> 研究加拿大的欧洲赤松 (*Pinus sylvestris* Linn.) 发现, 随树龄的增长, 赤松对气候的敏感程度逐渐增强。Ettl 等<sup>[3]</sup> 对不同树龄的毛果冷杉 (*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.) 展开研究, 发现老龄冷杉与幼龄冷杉对于气候的响应关系存在显著不同。宋来萍等<sup>[4]</sup> 研究呼伦贝尔沙地的樟子松 (*Pinus sylvestris*

*var. mongolica* Litvin.) 发现, 不同树龄的樟子松对气候的响应存在一定差异。但是, Colenutt 等<sup>[5]</sup> 通过研究发现落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) 的老龄树与幼龄树的径向生长对气候的响应差异不明显。Fritts<sup>[6]</sup> 对芒松 (*Pinus aristata* Engelm.) 的研究也表明树龄对树木径向生长与气候的响应结果影响较小。基于此, 有学者认为树龄对树木的生长和对气候的响应与树种有关, 认为树木的径向生长除受气候因素影响, 还与树木本身的年龄、生理结构、遗传性状等因素有关<sup>[6-8]</sup>。目前在天山山区已经开展了大量树轮径向生长对气候的响应及历史气候重建工作<sup>[9-16]</sup>, 但关于树龄效应的

收稿日期: 2022-12-30 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2021D01B116); 第二次青藏高原综合科学考察研究子专题 (2019QZKK010206); 国家自然科学基金 (41975095); 新疆维吾尔自治区自然科学基金杰出青年科学基金项目 (2022D01E105); 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所科技发展基金 (KJFZ202306)。

\* 通讯作者: 姜盛夏, 助理研究员。主要研究方向: 树木年轮理化研究。E-mail: jiangsx1989@163.com

分析相对有限,从不同树龄角度认识树木径向生长特征的研究还有待深入。

随着树木分析技术的发展和研究方法的更新,建立生长方程和生长模型已成为模拟和预测树木生长过程、发现树木生长规律的重要研究方法<sup>[17-19]</sup>。差分整合移动平均自回归模型 (ARIMA 模型) 是时间序列预测方法之一,可对时间序列数据进行分析 and 预测,广泛应用于经济学、数学等领域<sup>[20-21]</sup>。近年来,有学者将 ARIMA 模型引入树木年轮研究中,结果较为理想。史阿荣等<sup>[22]</sup>运用 ARIMA 模型研究太白红杉断面积增长量 (BAI) 与地形因子 (坡度、坡向、海拔) 的关系及 BAI 生长规律,结果显示太白红杉生长具有受海拔与坡度影响的范围限制,各树龄太白红杉生长趋势整体呈现平稳上升态势。张荷观<sup>[23]</sup>对马尾松、白桦等树种的生长量进行 ARIMA 模型模拟预测研究,结果显示 ARIMA 模型预测结果与实际情况相符。本研究拟建立雪岭云杉树轮宽度年表,分析森林上、下线年表特征参数,选取质量更好的年表进行年龄划分并计算断面积增长量,建立 ARIMA 模型,以分析研究区内树木径向生长趋势。为天山雪岭云杉径向生长特征及今后运用 ARIAM 模型在该区域进行树轮研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及样本采集

研究区位于天山北坡中段山区,属呼图壁县范围 (图 1)。该区域为温带大陆性气候,夏季炎热干燥,冬季漫长寒冷,昼夜温差大。植被自然分布类型主要是以雪岭云杉 (下文简称云杉) 为主的针叶林,另有少量的落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen)、密叶杨 (*Populus talassica* Kom)、桦树 (*Betula* L), 灌木有山柳 (*Salix pseudotangii* C. Wang et C. Y. Yu) 等。其中雪岭云杉垂直分布于海拔 1 500~2 800 m, 生长季为 4 至 10 月, 植被生长期 150~160 d<sup>[24]</sup>。山区土壤垂直带谱结构相对完整<sup>[25]</sup>, 土壤类型以山地黑钙土为主, 土壤养分含量高, 团粒结构好, 利于树木生长发育。

依据树木年代学基本原理<sup>[26]</sup>, 于 2021 年 8 月完成了森林上树线 (BYG1) 和下树线 (BYG2) 雪岭云杉共 2 个采样点的树轮样本采集工作。分别围绕森林上树线与下树线海拔 50 m 范围内较少受人类活动影响的原始森林, 进行样品采集。选取区

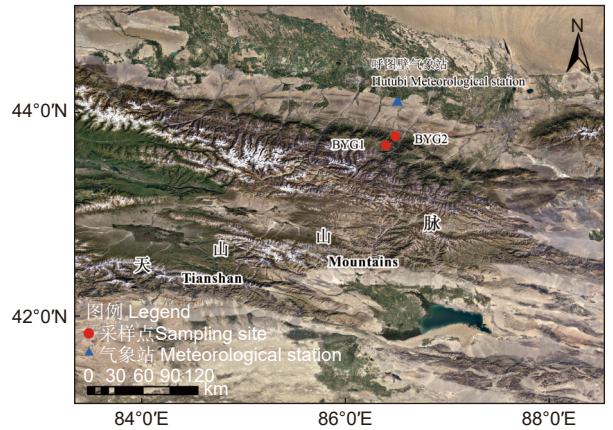


图 1 树轮采样点与气象站分布

Fig. 1 Map showing the tree-ring sampling sites and the meteorological station

域内未受病虫害影响、生长状况良好的健康立木, 使用生长锥 (口径为 10.00 mm) 于树木胸高处钻取样芯, 进钻前避开树枝、树疔和树疤, 取样时尽量与树干垂直且正对髓心。考虑到上树线森林郁闭度较低且年轮密集, 为便于交叉定年, 加大了上树线的样本量, 下树线 1 树 2 芯, 上树线 1 树 4 芯。采样点详细信息见表 1。

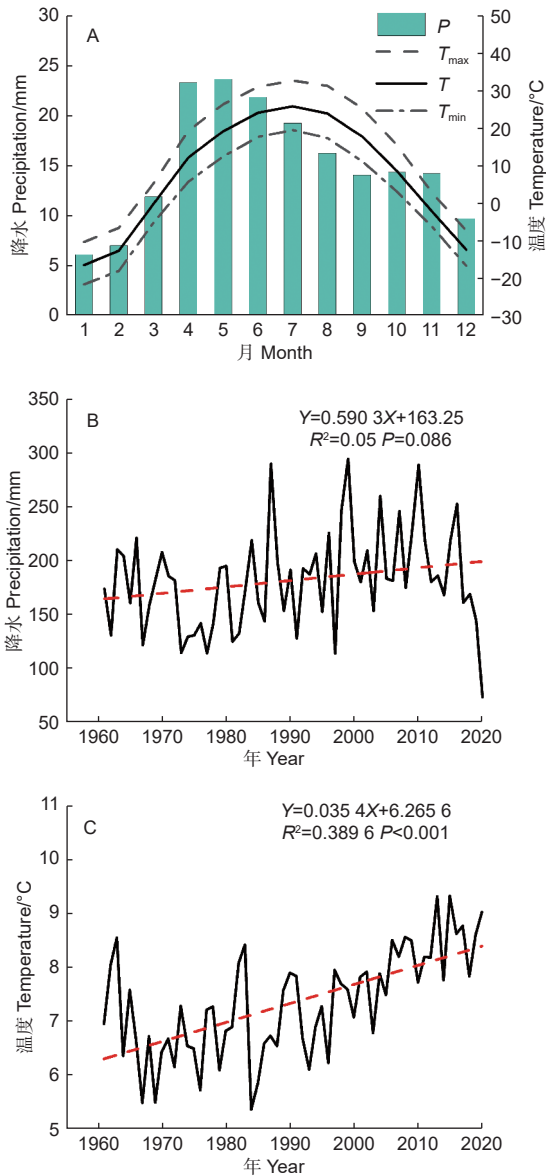
表 1 采样点信息

Table 1 Information on sampling sites

年表代号 Chronological code	BYG1	BYG2
纬度 Latitude	43.67° N	43.76° N
经度 Longitude	86.41° E	86.49° E
平均海拔 Mean altitude/m	2 600 ± 25	1 564 ± 25
坡向 Aspect	EN	N
坡度 Slope/(°)	40	25
郁闭度 Canopy density	0.2	0.4
采样时间 Sampling time	2021-08-21	2021-08-26
样本量 (芯/树) Sample size (Number of cores/Number of trees)	84/21	176/88

### 1.2 气象资料及 M-K 突变检验

本研究所选用的气象资料来自于国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>), 选取距离采样点最近的呼图壁气象站 1960—2020 年的月值气象数据, 以表征研究区域气候变化背景。所选气候要素为降水量 (P)、平均气温 (T) (图 2)。由图 2A 可见,



$P$ , 降水量;  $T$ , 气温;  $T_{\max}$ , 最高气温;  $T_{\min}$ , 最低气温

$P$ , precipitation;  $T$ , temperature;  $T_{\max}$ , maximum temperature;  $T_{\min}$ , minimum temperature

图2 1961—2020年研究区气候特征

Fig. 2 Climatic characteristics of the study area from 1961 to 2020.

气温峰值出现在7月(25.79℃), 降水峰值出现在3月(23.60 mm)。图2B与图2C显示, 自1960年以来, 研究区年降水量增幅较弱( $p=0.086$ ), 年平均气温则增加明显( $p<0.001$ )。对气象数据进行Mann-Kendall突变检验(图3), 发现研究区年降水量在1986年发生由少到多的突变, 平均气温在2003年发生了由低到高的突变。

### 1.3 树轮宽度年表建立

依照树木年轮分析基本流程<sup>[27]</sup>, 对样品进行干

燥、固定、打磨, 并在显微镜下进行目测定年。使用精度为0.001 mm的LINTAB5年轮宽度仪对样品进行树轮宽度测量, 利用PAST5软件对树轮宽度数据进行交叉定年, 结合COFECHA程序对交叉定年结果进行质量检验<sup>[28]</sup>。使用ARSTAN年表研制程序<sup>[29]</sup>中的负指数函数去趋势方法去除树木生长趋势, 运用双权重平均法进行标准化处理<sup>[6]</sup>, 最终研制出上、下林线的差值年表、标准化年表、自回归年表3种树轮宽度年表(树轮宽度指数序列)。其中, 标准化(STD)树轮宽度年表(图4)蕴含着丰富的高低频信息<sup>[30]</sup>, 因此选用标准化年表进行树木径向生长特征分析。树轮宽度指数计算公式如下:

$$I_i = \frac{w_i}{y_i} \quad (1)$$

式中:  $I_i$ 代表树轮宽度指数;  $w_i$ 代表年轮宽度序列实测宽度;  $y_i$ 代表生长趋势曲线预期值。

### 1.4 树龄组划分

由于BYG1多为老龄成年云杉, 年龄组成单一, 不适合进行不同树龄云杉径向生长分析。因此, 依据国家林业局公布的现行主要树龄级与龄组划分标准<sup>[31]</sup>及本次样品采集实际情况与宽度测量结果, 选取BYG2进行不同树龄分组并开展分析。共划分为3个年龄组: <60 a (A60)为幼龄组, 共30根样芯; 60~100 a (A60~100)为中龄组, 共计102根样芯; >100 a (A100)为老龄组, 共计44根样芯。用与前文相同的去趋势方法研制不同树龄组的树轮宽度标准化年表。运用高低通滤波器<sup>[13]</sup>将不同树龄雪岭云杉树轮宽度年表进行分解, 得到年表中的高频域信息与低频域信息, 并进行相关分析( $n=62$ , 1960—2021年)。不同树龄云杉年表间的相关性均达到了0.01的显著性水平(表2)。

### 1.5 树木断面积增长量(BAI)计算

树木断面积增长量(BAI)包含了更多生物意义去量化树木生长速度和趋势<sup>[32]</sup>, 本研究利用树轮宽度数据进行树木断面积增长量(BAI)的计算, 其计算公式如下:

$$BAI_n = BA_n - BA_{n-1} = \pi \times (R_n^2 - R_{n-1}^2) \quad (2)$$

$BA$ 代表连续的横截断面积;  $R_n$ 和 $R_{n-1}$ 分别代表从髓芯到第 $n$ 年和第 $n-1$ 年的树芯长度, 对未取到髓芯的样芯, 通过近似估计进行补全<sup>[33]</sup>。

将3个树龄组的BAI值分别进行运算, 得出

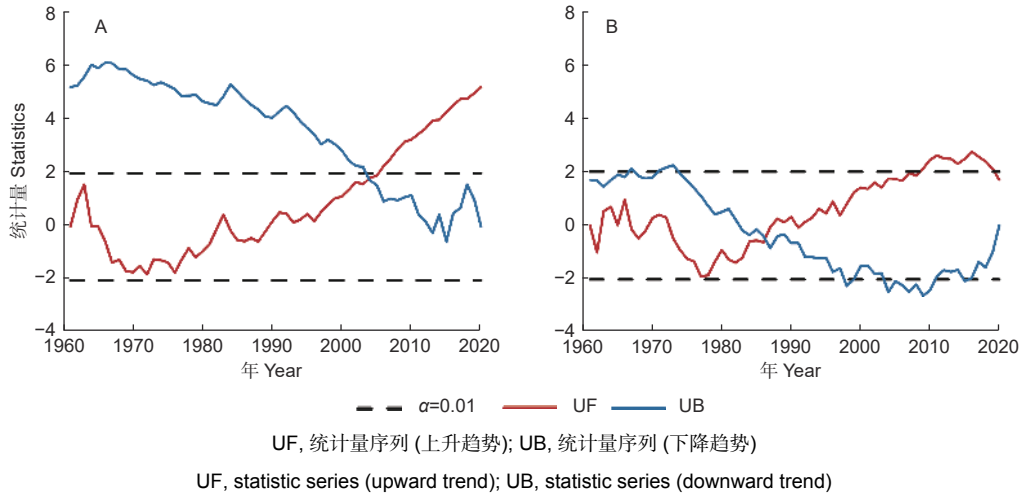


图 3 研究区平均气温 (A) 和降水量 (B) Mann-Kendall 检验结果 (1961—2020 年)

Fig. 3 Average temperature (A) and precipitation (B) Mann-Kendall test results in the study area (1961—2020)

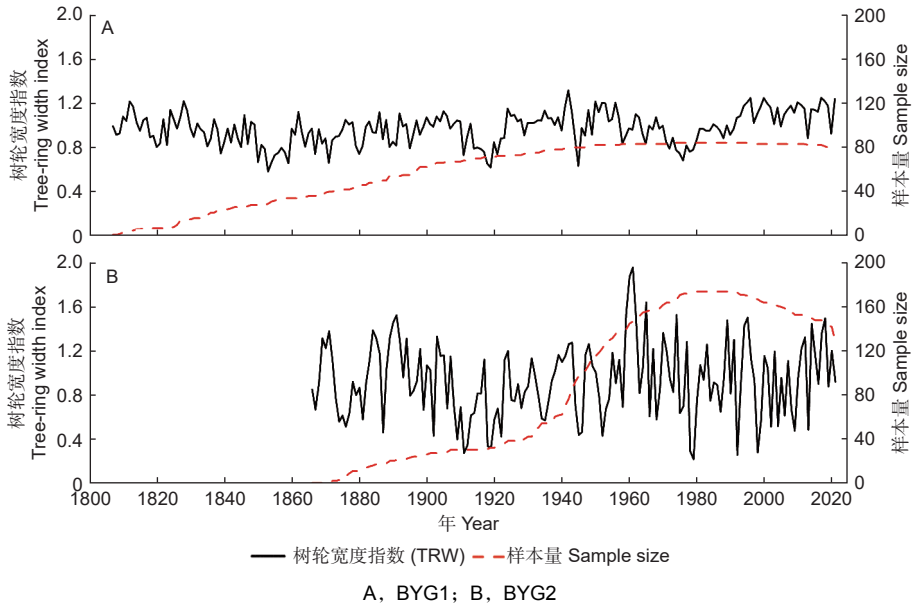


图 4 树轮宽度 STD 年表及样本量

Fig. 4 Standardized tree-ring width chronology and sample depth

表 2 下线不同树龄云杉树轮宽度年表在全频域、低频域和高频域的互相关系数

Table 2 Cross-correlation coefficients of tree-ring width chronologies of different tree ages in the full frequency domain, low frequency domain and high frequency domain

项目 Item	全频域 All-frequency domain			高频域 High-frequency domain			低频域 Low-frequency domain		
	A60	A60~100	A100	A60	A60~100	A100	A60	A60~100	A100
A60	1	—	—	1	—	—	1	—	—
A60~100	0.799**	1	—	0.894**	1	—	0.475**	1	—
A100	0.667**	0.437**	1	0.777**	0.806**	1	0.480**	0.437**	1

\*\*表示显著性水平达0.01。

\*\* Significant at  $p < 0.01$ .

各树龄组的平均 BAI，并以此作为进一步的建模数据。

### 1.6 建模步骤模拟

ARIMA 模型，由 R(自回归项)、I(差分项)和

MA(移动平均项)3部分组成。此模型适用于数据序列平稳且必须是单变量序列, 单变量序列是因为ARIMA利用过去的数值来预测未来的数值, 数据序列平稳代表方差与均值不应随时间而变化, 对于不平稳序列可通过差分使序列平稳。模型可表示为:

$$\left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i L^i\right) (1 - L)^d X_t = \left(1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i\right) \varepsilon_t \quad (3)$$

式中  $L$  为滞后算子 (Lag operator),  $d$ 、 $p$ 、 $q$  因子的说明见下文。

具体操作步骤如下: (1) 对序列进行平稳化 (ADF) 检验, 观察数据是否平稳, 非平稳数据则需进行  $d$  阶差分, 转化为平稳时间序列; (2) 根据所得平稳序列的自相关 (ACF) 图的拖尾判断  $q$  值, 偏自相关 (PACF) 图的截尾判断  $p$  值; (3) 拟合 ARIMA 模型 ( $p$ ,  $d$ ,  $q$ ), 将所得  $p$ 、 $d$ 、 $q$  值代入 ARIMA 模型拟合并进行参数检验, 得出模拟公式。

## 2 结果与分析

### 2.1 上、下林线树轮宽度年表特征分析

表3列出了BYG1和BYG2年表的特征参数。树轮宽度年表中, 标准差的大小反映着年表中所包含气候信息多少, 标准差越大意味着年表中蕴

含的气候信息越丰富<sup>[34]</sup>。BYG2年表标准差 (0.343) 明显高于上线年表标准差 (0.147), 说明下线年表中包含有更多的气候信息。平均敏感度表征年表序列对环境气候要素的敏感程度, 数值越大, 说明气候因子的限制作用越强<sup>[35]</sup>。研究区下树线树木径向生长对气候变化更为敏感。树间相关系数反映树木径向生长的一致性。BYG2年表树间相关系数为0.468, 说明下线树轮宽度年表中各样本间宽度变化较为同步。气候变化会对树木径向生长产生连续性影响, 一阶自相关系数 (AC1) 越大, 说明上年气候对当年树木径向生长的影响越大<sup>[36]</sup>。上树线年表 AC1 (0.572) 高于下树线年表 AC1 (0.311), 说明气候变化对上树线树木径向生长的滞后影响更强。通过将树轮年表进行方差分析, 可知总年表平均指数的方差贡献, 余下的则可认为是由非气候因素产生的噪音, 其比值则为“信噪比”<sup>[37]</sup>。信噪比越大, 年表中蕴含的气候信息越多, 下线年表信噪比远大于上线年表, 说明下线年表气候信息含量更多。在交叉定年过程中, 发现下线年表存在较高的缺轮率 (0.89%), 这可能与下线样本量较多有关。样品总代表性 (EPS) 值越大, 说明样品对总体的代表性越强<sup>[38]</sup>。上线年表为0.962, 下线年表高达0.990, 均超过0.85, 说明样品采集较成功, 适宜进行树轮研究。

表3 上、下林线树轮宽度标准化年表特征参数

Table 3 Main characteristic parameters of tree-ring width standardized chronology of forest upper and lower limits

采样点	标准差 (SD)	平均敏感度 (MS)	树间相关系数 (RBAR)	一阶自相关 (AC1)	信噪比 (SNR)	样品总代表性 (EPS)	SSS>0.85
BYG1	0.147	0.114	0.270	0.572	25.611	0.962	1827年
BYG2	0.343	0.372	0.468	0.311	103.087	0.990	1875年

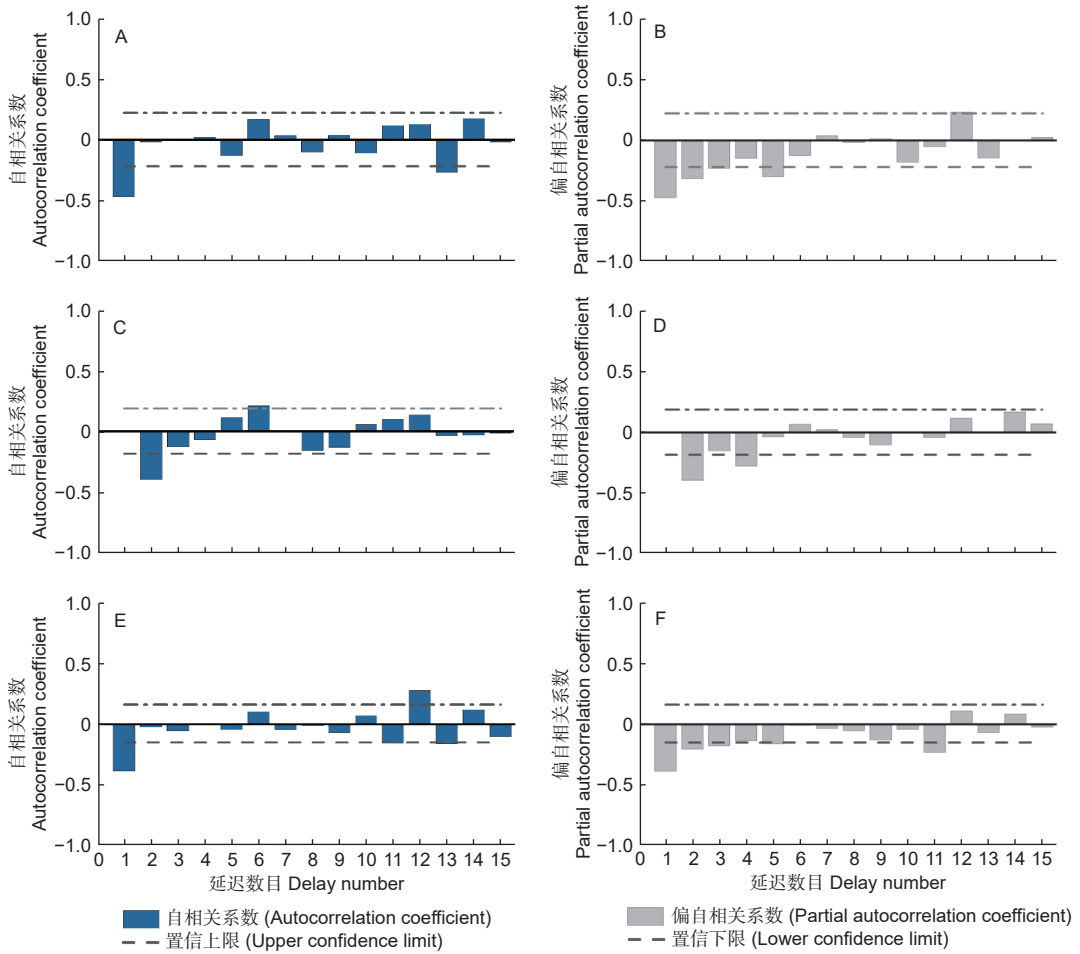
总的来说, 除一阶自相关系数外, BYG2年表的标准差、平均敏感度、树间相关系数、信噪比与样品总代表性均高于BYG1年表, 说明下树线树轮宽度年表的质量更好。且上树线多为老龄成年云杉, 年龄组成单一, 不适宜进行不同树龄云杉生长趋势分析。通过比较, 发现下线年表更适宜进行后续研究。

### 2.2 ARIMA模型模拟分析雪岭云杉BAI生长趋势

首先计算各树龄组的平均BAI, 以代表各组整体水平。而后对3组平均BAI序列进行平稳化检验。经检验后, 3组数据均为非平稳序列, 需进行

$d$ 阶差分 ( $d$ 代表差分阶数)。经一阶差分后, 3组数据均趋于稳定,  $d$ 值均为1。图5展示了自相关图 (ACF) 与偏自相关图 (PACF), 包括相关系数、置信上限和置信下限, 其横轴代表延迟数目, 纵轴代表自相关系数。并以此判断  $p$  值与  $q$  值。经过拟合, 建立 ARIMA 模型。

ARIMA模型参数统计结果见表4。根据各树龄组平均BAI, 利用衡量统计模型拟合优良性的AIC信息准则<sup>[39]</sup>寻找最优参数, 建立模型公式, 式中  $\varepsilon(t)$  代表随机扰动, 各树龄组建模结果见表5。



A, 幼龄组 (A60) 一阶差分自相关; B, 幼龄组 (A60) 一阶差分偏相关; C, 中龄组 (A60~100) 一阶差分自相关; D, 中龄组 (A60~100) 一阶差分偏相关; E, 老龄组 (A100) 一阶差分自相关; F, 老龄组 (A100) 一阶差分偏相关

A, the first-order difference autocorrelation of the young age group (A60); B, the first-order difference partial correlation of the young age group (A60); C, the first-order difference autocorrelation of the middle-age group (A60~100); D, the first-order difference partial correlation of the middle-age group (A60~100); E, the first-order difference autocorrelation of the old age group (A100); F, the first-order difference partial correlation of the old age group (A100).

图 5 雪岭云杉一阶差分自相关与偏相关

Fig. 5 First-order difference autocorrelation and partial correlation diagram of *Picea schrenkiana*

表 4 ARIMA 模型参数统计量

Table 4 ARIMA model parameter statistics

树龄组 Tree-age group		系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	t	P> t	0.025	0.975
A60	常数 (Constant)	3.296	0.906	3.637	0	1.52	5.072
	ma.L1.D.	-0.877	0.06	-14.502	0	-0.996	-0.759
A60~100	常数 (Constant)	3.137	3.2	0.98	0.327	-3.135	9.408
	ma.L1.D.	-0.076	0.08	-0.957	0.339	-0.232	0.08
	ma.L2.D.	-0.503	0.077	-6.56	0	-0.653	-0.353
A100	常数 (Constant)	3.463	2.237	1.548	0.122	-0.922	7.848
	ar.L1.D.	0.312	0.101	3.078	0.002	0.113	0.511
	ma.L1.D.	-0.867	0.057	-15.194	0	-0.979	-0.756

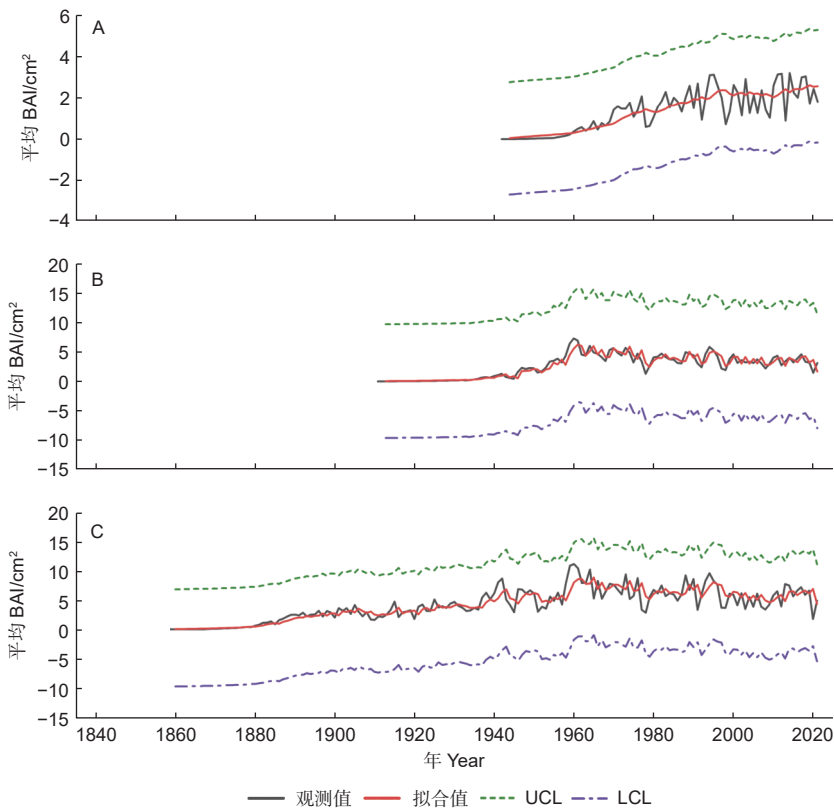
表5 雪岭云杉生长模拟公式统计

Table 5 Statistics of growth simulation formula of *Picea schrenkiana*

树龄组 Tree-age group	模型 model	模拟公式 Simulation formula
A60	ARIMA (0,1,1)	$y(t)=3.296-0.877*\epsilon(t-1)$
A60~100	ARIMA (0,1,2)	$y(t)=3.137-0.076*\epsilon(t-1)-0.503*\epsilon(t-2)$
A100	ARIMA (1,1,1)	$y(t)=3.463 + 0.312*y(t-1)-0.867*\epsilon(t-1)$

根据各组 ARIMA 建模结果, 绘制不同树龄雪岭云杉 BAI 生长模拟图 (图 6), 图中显示了各时间序列模型的原始数据、模型拟合值及置信区间。对比各组 ARIMA 模型的拟合优度 ( $R^2$ ) 及曲线波动变化情况可知, 幼龄组 ARIMA 模型  $R^2$  为

0.643, 模型拟合程度略差。老龄组  $R^2$  为 0.706, 模型表现与拟合程度均较好。中龄组观测值曲线与拟合值曲线拟合程度最高,  $R^2$  (0.832) 最大, 模型表现优秀。



A, 幼龄组 (A60); B, 中龄组 (A60~100); C, 老龄组 (A100)。

A, young age group (A60); B, middle age group (A60~100); C, old age group (A100).

图6 ARIMA 模型模拟不同树龄雪岭云杉 BAI 生长趋势

Fig. 6 ARIMA model simulates the BAI growth trend chart of *Picea schrenkiana* with different tree ages

### 2.3 树木径向生长变化特征

由于 ARIMA 模型建立过程中并未考虑环境气候因素, 为进一步分析不同树龄云杉在气温降水突变前后的生长趋势变化, 引入实测 BAI 值, 分别以降水突变点和气温突变点为时间节点, 划分为 3 个等长的时段, 分析不同树龄云杉树木径向生长变化趋势, 见图 7。

中龄组和老龄组平均 BAI 总体上呈减小趋势, 且减小趋势显著。幼龄云杉平均 BAI 年变化随降水与气温的突变产生波动, 但总体上呈上升趋势, 增长趋势显著 ( $p < 0.01$ )。降水发生突变前 (1961—1986 年), 中、老龄雪岭云杉 BAI 呈快速减小趋势 ( $p < 0.05$ )。在降水发生突变后至气温发生突变前 (1986—2003 年), 中龄组和老龄组

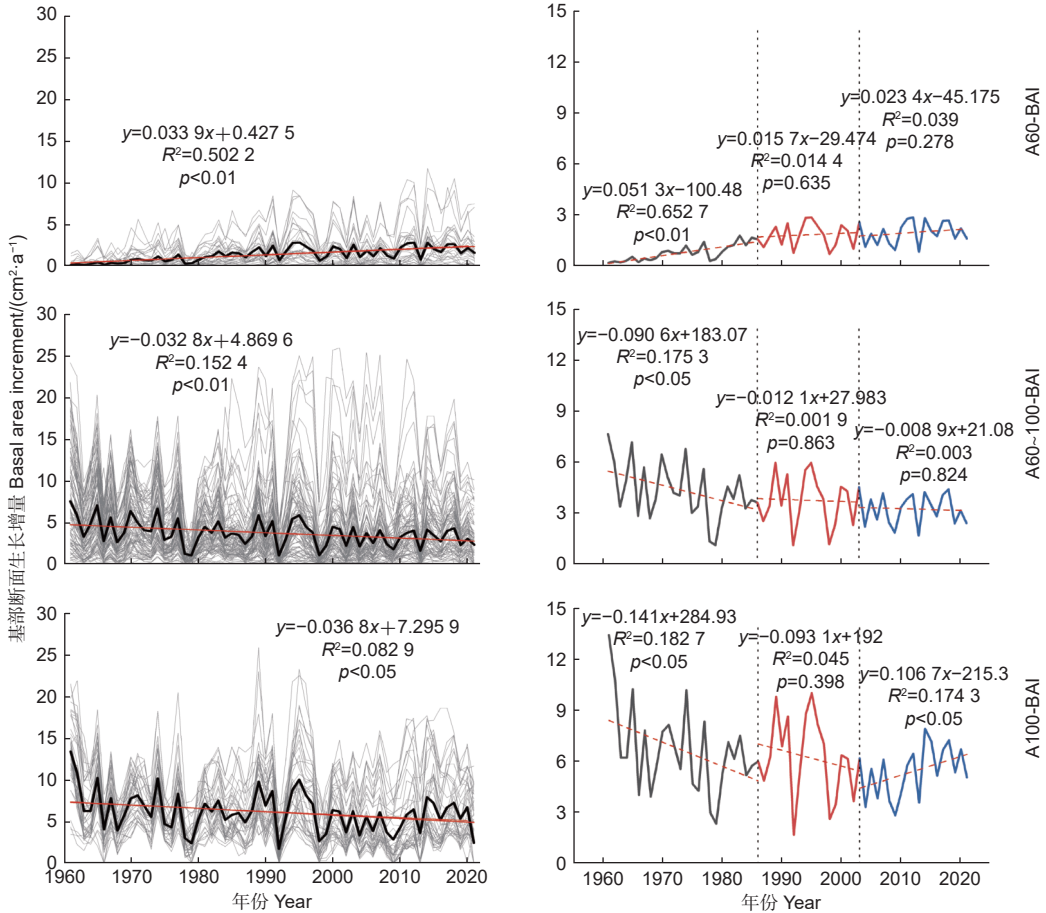


图 7 胸高断面面积增长量 (BAI) 生长趋势变化

Fig. 7 Changes in Growth Trend of Basal Area Increment (BAI)

BAI 减小趋势渐缓。气温突变后 (2003—2020 年), 中龄组 BAI 减小趋势进一步降低, 趋于平缓; 老龄组平均 BAI 则是由减少转变为增加, 且增长趋势显著 ( $p < 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 树轮异常轮成因分析

树轮的形成过程就是细胞生长分化的过程, 若环境气候因子异常, 则会对树木生长产生影响, 如缺轮、伪轮等现象<sup>[40]</sup>。其中, 缺轮是指生长在半干旱森林边缘的树木, 由于极端不利的环境条件导致形成层活动中断且相应部位树木径向生长缺失的现象<sup>[41]</sup>, 其相对位置可通过多条树轮序列交叉定年来确定<sup>[42]</sup>。在对样本交叉定年的过程中, 发现 BYG1 年表缺轮率为 0.04%, BYG2 年表缺轮严重, 缺轮率达 0.89%。BYG2 年表缺轮年份主要集中在 1979、1992、1998、2009 和 2013 年。结合中国气象灾害大典-新疆卷<sup>[43]</sup>中的灾害记录, 1978 年新疆全年

干旱少雨, 研究区内春旱严重, 较少的降水无法满足树木生长对水分的需求, 考虑到树木生长对气候因子的响应具有滞后性, 所以产生了较多的缺轮, 并体现在 1979 年。并且, 1979 年 1 至 4 月寒潮频发, 也对雪岭云杉当年早材的生长产生不良影响。同理, 1991 年新疆特大干旱, 1992 年 9 月、11 月强冷空气入侵, 天山北坡降温严重。1997 年全疆干旱, 气象记录显示, 1997 年降水量仅为 113.30 mm, 为有气象数据记录以来最低值, 1998 年 3 月中旬, 全疆出现大风天气, 北疆各地区普遍降温 10 °C 以上。以上极端气候事件的发生都对树木的径向生长产生影响, 并在相应年份形成缺轮。

#### 3.2 不同树龄雪岭云杉生长趋势的生理解释

自然界中物种的生存总处于不断变化的环境中, 物种在发展生存的策略即生态对策, 一般按照 K 对策和 r 对策进行划分和归类<sup>[44]</sup>。幼龄云杉的生长速度随着树龄的增加逐渐减缓, 可能是由于植



物的庇荫反应<sup>[45]</sup>与K选择对策<sup>[46]</sup>的结果。树木在幼苗生长过程中,为躲避周围高大树木的遮挡,其叶柄与枝干会快速的生长伸长,以占据更多的空间,来提升弱光环境下的光截获能力<sup>[47]</sup>。根据K选择对策,幼龄雪岭云杉生存能力较强,外加成林的保护关系<sup>[48]</sup>,使幼龄雪岭云杉BAI持续增长。但随着雪岭云杉树龄的增长,幼龄树逐渐成长为中龄树,其种内关系逐渐由保护转变为竞争。当树木的年龄超过平均年龄较多,年轮开始出现变窄、生长量减小的现象,甚至出现缺轮、断轮等现象,这也是树木衰老后的自然现象。对新疆巩留县雪岭云杉径向生长量的研究发现,树龄在20~40 a间生长量迅速增加,之后生长趋势开始下降,当树龄达到100 a,树木的径向生长明显减少<sup>[49]</sup>。在树木的生命周期中,幼龄期处于生长旺盛时期,随着树木年龄的增长,树木的胸径与高度也随之增加,根系从土壤中吸收的水分输送到叶片的路径变长,可能导致水力输送减弱,气孔导度和光合速率降低,进而影响树木生产力,使得中、老龄树木径向生长趋势减缓<sup>[50]</sup>。另外,随着树龄的增加,叶片表皮细胞表面及细胞间蜡质明显增多。虽然所有龄期叶片的气孔前室都被蜡质堵塞,但年轻林分叶片堵塞气孔前室的蜡质是蜡板,而老林分的蜡质通常是无定形的,在某些情况下完全堵塞了气孔,进而影响老龄树的光合作用,致使径向生长减缓<sup>[51]</sup>。在李艳菊<sup>[52]</sup>关于天山北坡植被覆盖度对干旱的响应研究中,发现2001—2015年天山北坡中部的呼图壁县呈轻度干旱状态。据气象数据分析,1961—2020年间,研究区年降水量增幅较小,气温显著升高,由温度升高引起的蒸发加剧可能成为干旱的原因。Lucas-Borja Manuel Esteban<sup>[53]</sup>等研究发现在干旱期间,老龄树生长量的减幅大于幼龄树,即老龄树在面对干旱时抵抗能力较低。因此,呼图壁县的干旱也可能导致中、老龄树出现生长量下降的现象。

## 4 结论

分析研究区森林上、下树线雪岭云杉树轮宽度年表特征参数,发现下树线年表质量更好。利用下树线不同树龄BAI数据进行ARIMA模型建立,结果显示中龄组观测值曲线与拟合值曲线拟合程度最高,中龄组模型表现优于老龄组与幼龄组。因

ARIMA模型基于单变量自身变化趋势进行建模,结合现有气象数据进行气候突变前后生长趋势变化分析,发现幼龄雪岭云杉BAI总体上增长显著,随降水与气温相继发生突变,其增速逐渐减缓。气温发生突变前,中、老龄雪岭云杉BAI变化始终呈减小趋势,气温突变后,中龄云杉BAI减小趋势进一步降低,趋于平稳。老龄云杉BAI由气温突变前的减小趋势转变为显著增加趋势。

## 参考文献:

- [1] Vieira J, Campelo F, Nabais C. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate[J]. *Trees Structure and Function*, 2009, 23(2): 257-265.
- [2] Linderholm H W, Linderholm K. Age-dependent climate sensitivity of *Pinus sylvestris* L. in the central Scandinavian Mountains[J]. *Boreal Environment Research*, 2004, 9(4): 307-317.
- [3] Ettl G J, Peterson D L. Extreme climate and variation in tree growth: individualistic response in subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) [J]. *Global Change Biology*, 2010, 1(3): 231-241.
- [4] 宋来萍, 刘礴霏, 王玉华, 等. 呼伦贝尔沙地不同树龄樟子松对气候的响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(2): 159-164.
- [5] Colenutt M E, Luckman B H. The Dendrochronological characteristics of Alpine Larch[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 25(5): 777-789.
- [6] Fritts H C. *Tree Ring and Climate* [M]. London: Academic Press, 1976.
- [7] 肖德卿, 邓章文, 罗芊芊, 等. 幼龄红豆杉生长和形质性状家系变异分析[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(3): 152-157.
- [8] 韩斐扬, 周群英, 陈少雄, 等. 2种桉树不同林龄生物量与能量的研究[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(5): 690-696.
- [9] 姜盛夏, 张同文, 喻树龙, 等. 天山和阿尔泰山历史气候变化序列集成重建研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2022, 16(3): 102-111.
- [10] 石钦云, 徐鹏, 陶贞, 等. 天山中段地区树轮气候重建与冰川波动响应分析[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(2): 356-367.
- [11] 喻树龙, 袁玉江, 秦莉, 等. 天山北坡中部不同海拔高度雪岭云杉树轮宽度气候响应对比分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(3): 30-38.
- [12] 彭正兵, 李新建, 张瑞波, 等. 不同趋势方法的新疆东天山高低海拔雪岭云杉树轮宽度年表对气候的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1595-1604.
- [13] 张同文, 袁玉江, 魏文寿, 等. 开都河流域天山桦树轮宽度年表的建立及其气候响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 3034-3042.
- [14] 秦莉, 史玉光, 喻树龙, 等. 天山北坡三屯河流域树轮重建的146 a降水变化[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2014, 8(5): 23-28.
- [15] 尚华明, 尹仔锋, 陈志军, 等. 天山北坡精河1615—2007年径流量变化的树轮记录[J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 779-788.
- [16] 袁玉江, 魏文寿, 陈峰, 等. 天山北坡乌鲁木齐河年径流总量的

- 树轮重建[J]. 第四纪研究, 2013, 33 (3): 501-510.
- [17] 陈 兰. 基于Vaganov-Shashkin模型的秦岭林线树木径向生长对气候变化的响应[D]. 陕西: 西北大学, 2018.
- [18] Hughes M K. Dendrochronology in climatology-the state of the art[J]. Dendrochronologia, 2002, 20(1-2): 95-116.
- [19] Fritts H C, Shashkin A, Downes G M. A simulation model of conifer ring growth and cell structure[M]. CABI Publishing, 1999.
- [20] 姚金海, 邹家骏. CPI预测的SVM-ARIMA模型构建与数值模拟[J]. 统计与决策, 2022, 38 (21): 48-52.
- [21] 蒋 奇, 刘永文. 基于ARIMA模型的美元汇率预测[J]. 经济研究导刊, 2022 (20): 69-71.
- [22] 史阿荣, 李书恒, 侯 丽, 等. 基于树木年轮宽度的秦岭太白红杉(*Larix chinensis*)生长变化规律研究[J]. 四川林业科技, 2018, 39 (2): 1-6.
- [23] 张荷观. 时间序列的ARIMA模型在预测树木生长量中的应用[J]. 林业科学, 1986, 22 (1): 94-100.
- [24] 王 婷, 于瑞德, 杨美琳, 等. 天山中部山区不同胸径天山云杉对气候的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22 (4): 579-585.
- [25] 穆叶赛尔·吐地, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 天山北坡东西段林沿土壤有机质含量特征对比分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20 (1): 70-75.
- [26] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating[M]. University of Arizona Press, 1968.
- [27] Speer J H. Fundamentals of Tree-Ring Research[M]. University of Arizona Press, 2010.
- [28] Holmes R L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement[J]. Tree-Ring Bulletin. 1983.
- [29] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization[M]. Tucson: The University of Arizona. 1985.
- [30] 王 波, 陈 拓, 徐国保, 等. 祁连山中部祁连圆柏林线树木生长与积雪响应关系研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37 (2): 318-326.
- [31] 王红春, 李国春, 栾国军, 等. LY/T 2908-2017, 主要树种龄级与龄组划分[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017-10-27.
- [32] 刘 蕊, 王勇辉, 姜盛夏, 等. 哈萨克斯坦阿尔泰山树木径向生长及其对气候要素的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36 (3): 723-733.
- [33] Rozas V. A dendroecological reconstruction of age structure and past management in an old-growth pollarded parkland in northern Spain[J]. Forest Ecology & Management, 2004, 195(1-2): 205-219.
- [34] 孙振静, 赵慧颖, 朱良军, 等. 大兴安岭北部不同降水梯度下兴安落叶松生长对升温的响应差异[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41 (6): 1-14.
- [35] 陈 力, 吴绍洪, 戴尔阜. 长白山红松和落叶松树轮宽度年表特征[J]. 地理研究, 2011, 30 (06): 1147-1155.
- [36] 喻树龙, 李淑娟, 姜盛夏, 等. 天山北坡雪岭云杉树轮宽度年表梯度特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14 (2): 1-9.
- [37] 喻树龙, 袁玉江, 陈 峰, 等. 巩乃斯河源树木年轮密度年表特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4 (4): 6-11.
- [38] 王兆鹏, 张同文, 袁玉江, 等. 罗霄山南部4个针叶树种生长特征及其气候响应对比分析[J]. 植物生态学报, 2021, 45 (12): 1303-1313.
- [39] 夏 飞, 张玲芳, 杨艳华. AIC准则在数据融合中的应用[J]. 上海电力学院学报, 2007 (3): 261-264.
- [40] Dittmar C, Fricke W, Elling W. Impact of late frost events on radial growth of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southern Germany[J]. European Journal of Forest Research, 2006, 125(3): 249-259.
- [41] 王春松, 周非飞, 郑壮鹏, 等. 亚洲树轮缺轮率的空间分布特征及其影响因素[J]. 亚热带资源与环境学报, 2022, 17 (2): 45-51 + 59.
- [42] 李彩娟, 陈 拓, 王 波, 等. 树轮异常结构的研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38 (5): 1538-1550.
- [43] 温克刚, 史玉光. 中国气象灾害大典. 新疆卷[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [44] 曹光球, 林思祖, 曹子林, 等. 杉木及其主要混交树种生态对策[J]. 福建林学院学报, 2002 (2): 180-183.
- [45] 智西民, 何靖雯, 王梦颖, 等. 遮荫和土壤类型对青桐幼苗生长和养分含量的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39 (12): 3961-3970.
- [46] 吴佳斌, 陈玉平, 陈碧燕, 等. 杉木林表层和底层土壤微生物生长对策的研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2012, 7 (4): 78-81.
- [47] 龙嘉翼, 赵宇萌, 孔祥琦, 等. 观赏灌木小枝和叶性状在林下庇荫环境中的权衡关系[J]. 生态学杂志, 2018, 38 (22): 8022-8030.
- [48] 肖东耀, 廖超英, 杨晓娟, 等. 太白山北坡太白红杉(*Larix chinensis*)胸径生长规律研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27 (4): 194-198.
- [49] 李江风. 树木年轮水文学研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [50] Ryan M G, Yoder B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth[J]. BioScience, 1997, 47(4): 235-242.
- [51] England J R, Attiwill P M. Changes in leaf morphology and anatomy with tree age and height in the broadleaved evergreen species, *Eucalyptus regnans* F. Muell.[J]. Trees Structure and Function, 2006(1): 20.
- [52] 李艳菊, 丁建丽, 张钧泳, 等. 2001—2015年天山北坡植被覆盖对干旱的响应——基于土地利用/土地覆盖分析[J]. 生态学报, 2019, 39 (17): 6206-6217.
- [53] LucasBorja M E, Bose A K, Andivia E, et al. Assessing tree drought resistance and climate-growth relationships under different tree age classes in a *Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* forest[J]. Forests, 2021, 12(9): 1161-1161.

# Characteristics of Radial Growth of *Picea schrenkiana* at Different Ages and Their Simulation

HOU Tian-hao<sup>1,2</sup>, JIANG Sheng-xia<sup>2</sup>, WANG Yong-hui<sup>1</sup>, ZHANG Tong-wen<sup>2</sup>, YU Shu-long<sup>2</sup>,  
WANG Zhao-peng<sup>4</sup>, GUO Dong<sup>2</sup>, RUXIANGULI·Abudourehman<sup>1,2</sup>, SONG Jing-hu<sup>2,3</sup>

(1. School of Geographical Science and Tourism, Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Land, Xinjiang Normal University, Ürümqi 830054, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Xinjiang Laboratory for Tree Ring Ecology, Ürümqi 830002, Xinjiang, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Ürümqi 830046, Xinjiang, China; 4. College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, Heilongjiang, China)

**Abstract:** [Objective] In this study, we developed two tree-ring chronologies using samples of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) that were collected from the upper and lower treeline in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains, and analyzed the radial growth characteristics of trees. [Method] According to the tree ages, the lower treeline spruce was divided into young, middle-aged and old groups. The ARIMA model was established to simulate the radial growth of spruce at different ages based on basal area increment. [Results] The analysis results showed that the tree-ring width chronology of the lower treeline contains more climate information comparing with the upper treeline. Among the BAI changes of three tree age groups simulated by the ARIMA model, the model fitting the middle aged trees performed the best ( $R^2 = 0.832$ ). Considering the ARIMA model is modeled based on the univariate self-change trend, we analyzed the radial growth trend before and after the climate change, and found that the BAI of young spruce increased significantly overall, but the growth rate slowed down gradually. [Conclusion] The radial growth of middle-aged and old spruce showed a decreasing trend before the abrupt change of temperature. But after the abrupt change of temperature, the BAI of middle-aged spruce tends to be stable and the BAI of old spruce changes from a decreasing trend to an increasing trend.

**Keywords:** *Picea schrenkiana*; tree-ring; chronology characteristic; ARIMA model; basal area increment (BAI)

(责任编辑: 彭南轩)