

秦莉,尚华明,喻树龙,等.全球变化背景下天山西部雪岭云杉径向生长和水分利用效率对气候要素的响应[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):1-9.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.03.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 全球变化背景下天山西部雪岭云杉径向生长和水分利用效率对气候要素的响应

秦莉,尚华明,喻树龙,张合理,姜盛夏,张同文,刘可祥,苟晓霞,张瑞波\*

(中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,中国气象局树轮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)

**摘要:**全球气候变暖和大气 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>a</sub>)急剧上升已成为不争的事实,并对森林生态系统有着深远的影响,全面理解森林生态系统对全球变化的响应至关重要。中亚干旱区特有树种雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey)树轮稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )和水分利用效率(i<sub>WUE</sub>)对气候变暖和大气 CO<sub>2</sub> 浓度急剧上升的响应缺乏研究。本研究利用天山西部伊犁河流域的雪岭云杉树轮样本,使用树木年代学方法和树轮稳定碳同位素技术,建立树轮宽度年表、稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )以及内禀水分利用效率(i<sub>WUE</sub>)序列,分析了树轮  $\delta^{13}\text{C}$  和 i<sub>WUE</sub> 的长期变化特征,探讨了树轮  $\delta^{13}\text{C}$  和 i<sub>WUE</sub> 对气候的响应规律以及 i<sub>WUE</sub> 与树轮宽度的关系。结果表明,主要的气候因子并没有强烈地限制树木径向生长;夏季平均气温对树轮  $\delta^{13}\text{C}$  分馏有重要影响,i<sub>WUE</sub> 的长期变化受到全球 C<sub>a</sub> 增加和升温趋势影响,但直接影响 i<sub>WUE</sub> 年际变化的主要因素是饱和水汽压亏缺(VPD)。全球升温和 C<sub>a</sub> 增加导致了 i<sub>WUE</sub> 的持续升高,但并没有导致雪岭云杉树木径向生长的明显增加。

**关键词:**树木年轮;稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ );水分利用效率;雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey);天山;气候变化

中图分类号:P468

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)03-0001-09

过去百年间,全球平均气温上升了 0.85 °C,大气 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>a</sub>)也从 1920 年的 303 μmol/mol 上升至 2011 年的 391 μmol/mol<sup>[1-2]</sup>。全球变暖和 CO<sub>2</sub> 浓度的增加对森林生长有深远的影响。控制植物生长和生产力的光合作用受到温度和大气 CO<sub>2</sub> 浓度的强烈影响<sup>[3]</sup>。当大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升,理论上提高了 C<sub>3</sub> 植物的光合速率,直接导致植物生长速率增加,并间接地降低蒸腾作用<sup>[4-5]</sup>。然而,树木在长时间内可能适

应高 CO<sub>2</sub> 浓度环境,因此对 CO<sub>2</sub> 浓度的增长不敏感<sup>[6]</sup>。相反,在 CO<sub>2</sub> 倍增的情况下,由于温度上升,导致干旱胁迫加剧,从而不利于树木生长<sup>[7]</sup>。气候、CO<sub>2</sub> 浓度和森林生长之间的相互作用因区域而异。这在很大程度上是因为全球温度和 CO<sub>2</sub> 浓度的增加导致不同的水文模式发生不同程度的变化,从而导致不同程度的水分胁迫变化<sup>[8-9]</sup>。因此,不仅要了解它们对环境变化的短期响应,而且要研究它们对环境胁迫的长期适应能力。

树木年轮提供了一个从更长时间尺度来检验 CO<sub>2</sub> 浓度增加对树木径向生长影响的天然载体<sup>[10]</sup>,已经被广泛用于森林生长对气候变化的响应研究<sup>[11]</sup>。树轮稳定同位素分析以其精确度高、连续性强及对环境波动响应敏感等优势,在研究过去环境变化<sup>[2]</sup>

收稿日期:2020-05-17;修回日期:2020-08-10

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2018D01A40)

作者简介:秦莉(1985—),女(蒙古族),副研究员,主要从事树木年轮气候研究。E-mail:qinhappy@sina.com

通信作者:张瑞波(1983—),男,研究员,主要从事气候变化与环境演变、树木年轮气候、森林生态气象研究。E-mail:river0511@163.com

及全球碳循环方面<sup>[1]</sup>具有重要意义。树轮稳定碳同位素比率 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 可以用来推断水分利用效率 (Intrinsic Water Use Efficiency; 本文简称为  $i_{\text{WUE}}$ ) 变化<sup>[2]</sup>, 追踪  $\text{CO}_2$  浓度上升对水分利用效率和树木生长的长期、综合作用<sup>[3]</sup>。树轮  $\delta^{13}\text{C}$  已被普遍用于  $i_{\text{WUE}}$  变化及其与树木生长和环境因素之间的关系研究<sup>[4-15]</sup>。树轮稳定碳同位素对气候要素的响应是一个复杂的过程, 而且不同地区, 不同树种的年轮  $\delta^{13}\text{C}$  对气候要素的响应也不同<sup>[4]</sup>。在全球范围内, 已利用很多针叶树和阔叶树的年轮稳定碳同位素作为反映气候与环境变化指标进行了气候响应分析, 并对古气候进行了可靠的重建<sup>[16-19]</sup>。

新疆天山位于中国西部内陆、亚欧大陆中心, 全长 1700 多千米<sup>[20]</sup>。Shi 等<sup>[21]</sup>研究显示, 我国西北地区尤其是新疆气候自 20 世纪 80 年代以来由暖干向暖湿转型, 近几十年气候暖湿化明显。天山地区海拔 1 200~3 500 m 的中低山—亚高山的阴坡分布着大量的适合树木年代学研究的雪岭云杉 (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) 原始森林。雪岭云杉是天山地区最主要的地带性森林植被, 是构成天山森林生态系统的主体, 林分以纯林为主, 尤其是在天山西部伊犁地区分布广泛。雪岭云杉具有年轮清晰、分布广泛、年代长和对气候响应敏感等优势, 非常适用于树轮气候研究。20 世纪 70 年代以来, 各国研究人员在天山做了大量的树轮气候研究工作<sup>[22-28]</sup>。但对于气候变化和  $\text{CO}_2$  浓度增加对雪岭云杉径向生长、树轮稳定碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 和水分利用效率 ( $i_{\text{WUE}}$ ) 的综合影响研究较少<sup>[29-30]</sup>。本研究基于在天山西部伊犁地区采集树木年轮样本, 分别建立了树轮宽度序列、稳定碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 序列和水分利用效率 ( $i_{\text{WUE}}$ ) 序列, 通过对比雪岭云杉树轮宽度、 $\delta^{13}\text{C}$  和  $i_{\text{WUE}}$  变化特征, 分析大气  $\text{CO}_2$  浓度上升以及气候变化对雪岭云杉树轮宽度、 $\delta^{13}\text{C}$  和  $i_{\text{WUE}}$  的影响, 以期揭示气候暖湿化和大气  $\text{CO}_2$  浓度上升背景下, 雪岭云杉径向生长是否增加。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况和树轮采样

研究区位于中国天山西部的伊犁河上游。伊犁地区是一个向西开口、三面环山的山间盆地。在这一特殊的地形条件下, 来自大西洋的暖湿气流沿着天山北坡长驱直入, 给该地区带来了丰沛的降水, 同时阻挡了来自塔里木盆地和准噶尔盆地的干热气流, 以及西伯利亚的冷空气。与干旱的东天山相比, 伊犁

河谷以温带半干旱大陆性气候为主。2015 年在天山西部伊犁河上游的那拉提地区 (NLT,  $43^{\circ}15' \text{ N}$ ,  $84^{\circ}15' \text{ E}$ ) 利用直径为 10 mm 的生长锥采集了 27 棵树 54 根样芯。采样点平均海拔 2 000 m。该地区以雪岭云杉纯林为主, 郁闭度 0.4, 坡度较小 ( $<10^{\circ}$ )。

### 1.2 树轮宽度年表和 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的建立

按照标准的树轮气候学实验流程<sup>[31-33]</sup>, 将采集的树轮样本进行自然风干、打磨、抛光直至年轮清晰可辨, 在体式显微镜下进行初步定年, 然后利用精度为 0.001 mm 的树轮宽度仪 (Velmex system, Velmex Inc., Bloomfield, NY, USA) 进行宽度测量。利用 TT 程序参考 COFECHA 程序<sup>[31-32]</sup> 结果进行交叉定年, 确保每条序列的年代与实际日历年一致, 利用 ARSTAN 程序<sup>[34]</sup> 完成树轮宽度年表的建立。在这一过程中, 本研究采用样条函数法 (步长为 80) 去除树木自然的生长趋势, 选取标准化年表 (STD) 进行气候分析 (图 1), 确保年表含有更多的气候信号<sup>[35]</sup>。

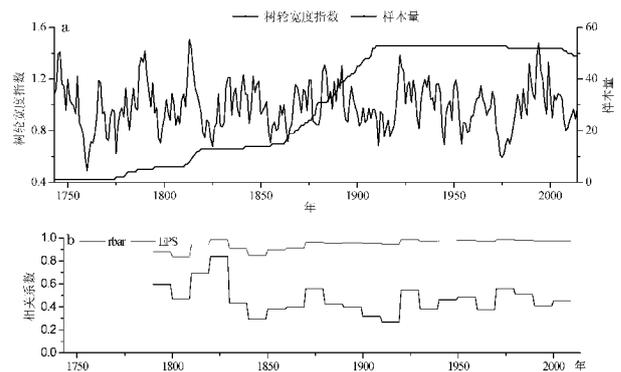


图 1 那拉提树轮标准化宽度年表

在采集的样本中, 选择 6 棵树的 12 根样芯用于树轮  $\delta^{13}\text{C}$  分析, 12 根芯无缺轮和明显异常生长, 而且与主序列一致性较好。为避免树轮  $\delta^{13}\text{C}$  的幼龄效应<sup>[36-37]</sup>, 对每根芯的髓心做 30 a 去除, 将样芯进行双面打磨并对照树轮宽度原始数据和年表进行目测定年, 然后用雕刻刀在双目体视显微镜下逐年剥离样本, 将所有样芯的同一年样本进行混合, 生成 1850—2014 年的复合样本。利用 MM400 球磨仪 (Retsch GmbH, 德国) 进行研磨并充分混合, 按照 Brendel 等<sup>[38]</sup> 的方法提取树轮中的  $\alpha$  纤维素。将每年的  $\alpha$  纤维素取 70~100  $\mu\text{g}$  包于锡杯中, 通过元素分析仪 (Flash EA 1112) 与稳定同位素质谱仪 (MAT253) 进行树轮稳定碳同位素的提取。每隔 7 个样本添加一个实验室标准进行仪器校准,  $\delta^{13}\text{C}$  测定精度  $<0.05\text{‰}$ 。根据公式<sup>[39-40]</sup>:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{VPDB}}} - 1 \right] \times 10^3 \text{‰} \quad (1)$$

最终建立了 Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) 标准的  $\delta^{13}\text{C}$  序列。

### 1.3 树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 和 $i_{\text{WUE}}$ 序列

工业革命以来由于化石燃料的大量使用,使大气中  $\text{CO}_2$  浓度持续升高<sup>[41]</sup>。树木在生长过程中通过光合作用不断吸收大气中的  $\text{CO}_2$ , 外界大气中  $\text{CO}_2$  含量的变化必然会影响树木年轮中  $\delta^{13}\text{C}$  值。而这种变化与气候无关,因此利用树木  $\delta^{13}\text{C}$  研究过去气候变化时,必须剔除大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的影响。本研究采用 McCarroll & Loader<sup>[41]</sup>的校正方法对原始  $\delta^{13}\text{C}$  进行校正。 $\text{C}_3$  植物中的校正碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ )可以表示为:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}} = \delta^{13}\text{C}_p - (\delta^{13}\text{C}_a + 6.4) \quad (2)$$

其中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$  是植物的校正碳同位素比率, $\delta^{13}\text{C}_a$  和  $\delta^{13}\text{C}_p$  分别是大气和植物纤维素的稳定碳同位素比率。

在植物光合作用过程中,叶片光合速率(A)与叶片对水汽的导度( $g_s$ )的比值被定义为内禀水分利用效率( $i_{\text{WUE}}$ )<sup>[42]</sup>,计算公式如下:

$$i_{\text{WUE}} = A/g_s = C_a \times [(1 - C_i/C_a)/1.6] \quad (3)$$

其中,A 是树木叶片对  $\text{CO}_2$  的吸收率,单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $g_s$  是叶片气孔导度,单位: $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ ;  $C_a$  是环境  $\text{CO}_2$  浓度, $C_i$  是胞间  $\text{CO}_2$  浓度。长期的  $i_{\text{WUE}}$  一般不能被直接计算,而是通过同位素法测得的稳定性碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  判别  $\Delta$  来进行表达。 $\text{C}_3$  植物的碳同位素分馏( $\Delta^{13}\text{C}$ )公式<sup>[43]</sup>为:

$$\Delta^{13}\text{C} = \frac{\delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C}_p}{1 + \delta^{13}\text{C}_p/1000} \quad (4)$$

其中, $\Delta^{13}\text{C}$  是植物的碳同位素分馏值, $\delta^{13}\text{C}_a$  和  $\delta^{13}\text{C}_p$  分别是大气和植物纤维素的稳定碳同位素值。 $\Delta^{13}\text{C}$

还可以通过以下方式计算,将碳同位素分馏与生理响应联系起来:

$$\Delta^{13}\text{C} = a + (b - a) \times (C_i \times C_a) \quad (5)$$

其中, $a$  ( $\approx 4.4\text{‰}$ ) 代表由大气中  $\text{CO}_2$  扩散进入细胞间而引起的同位素分馏, $b$  ( $\approx 27\text{‰}$ ) 代表由 RuBP 羧化酶针对  $^{13}\text{CO}_2$  的分馏引起的同位素分馏<sup>[41]</sup>, $C_i$  和  $C_a$  分别是叶片胞间和大气中的  $\text{CO}_2$  浓度。

根据以上公式,利用树轮  $\delta^{13}\text{C}$  可以计算出水分利用效率( $i_{\text{WUE}}$ ),从而建立伊犁地区 1850—2014 年的  $i_{\text{WUE}}$  序列。

### 1.4 气象数据

本研究采用距离采样点最近的新源气象站 ( $43^\circ 27' \text{ N}, 83^\circ 18' \text{ E}$ , 海拔高度为 929 m) 建站以来的逐月气候数据进行分析,时间段为 1956—2013 年,主要的气候要素包括平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量、相对湿度等。数据均来自中国气象数据共享服务系统 (<http://cdc.cma.gov.cn/>)。对气象数据分析表明,研究区降水量呈双峰结构,峰值出现在 5 和 10 月。而气温变化与中纬度大陆性气候基本一致,夏季最高(图 2a)。研究区年平均降水量为 505.8 mm,年平均气温为 8.8  $^\circ\text{C}$ ,年相对湿度为 62.58%。过去 60 a,平均气温、平均最高气温、平均最低气温和降水量均有一定的增加趋势,幅度分别为 0.48、0.23、0.73  $^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  和 16 mm /10 a (图 2b)。饱和水汽压亏缺( $V_{\text{PD}}$ )采用以下公式计算得出<sup>[44]</sup>:

$$V_{\text{PD}} = (1 - R_H) \times 0.6108 \times e^{(17.27T / (T + 273.3))} \quad (6)$$

其中  $V_{\text{PD}}$  为逐月的平均水分亏缺, $R_H$  为月平均相对湿度, $T$  为月平均气温。

### 1.5 统计方法

使用传统的树轮气候研究中的数理统计方法来分析数据<sup>[31]</sup>。树轮宽度和气候之间的相关性分析采

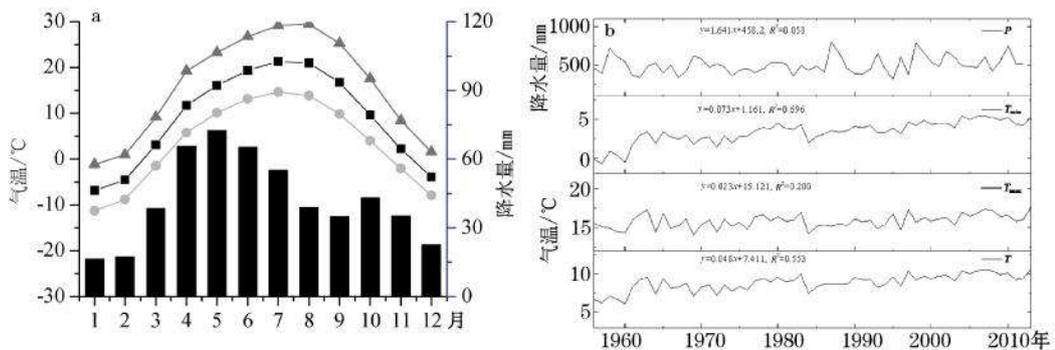


图 2 1956—2013 年新源气象站基本气候特征

(a 为新源气象站平均最高气温(灰色三角形)、平均气温(黑色正方形)、平均最低气温(浅灰色原形)以及降水量(柱状图)的月变化;b 为新源气象站 1956—2013 年平均气温(T)、平均最高气温( $T_{\text{max}}$ )、平均最低气温  $T_{\text{min}}$  和降水量变化趋势)

用 Pearson 相关。考虑到树木生长可能受生长季之前和生长季的气候条件的影响,结合雪岭云杉的生长季(5—9月),分析了上年10月到当年9月的逐月气候因子与树轮宽度之间的相关性以期提取季节尺度的气候信号。另外,采用一阶差相关方法理解气候因子和树轮宽度在高频变化上的相关性,利用30 a 滑动相关来获取树轮宽度和  $i_{WUE}$  的相关性随时间变化的趋势。

## 2 结果

### 2.1 树轮 $\delta^{13}C$ 和 $i_{WUE}$ 序列及特征

从建立的树轮  $\delta^{13}C$  (图3)和  $i_{WUE}$  序列及其统计特征表(表1)来看,1850—2014年伊犁地区雪岭云杉树轮  $\delta^{13}C$  变化范围为  $-24.19\text{‰}$ ~ $-21.03\text{‰}$ ,平均值为  $-22.11\text{‰}$ (表1)。 $\delta^{13}C$  变化呈显著下降趋势,年均下降  $0.012\text{‰}$ 。20世纪80年代以前, $\delta^{13}C$  下降趋势较为缓慢,近30 a 快速下降。目前,大气中的  $\delta^{13}C$  约为  $-8.2\text{‰}$ 。随着大量使用化石燃料( $\delta^{13}C$  非常低), $\delta^{13}C$  迅速下降。植物组织的  $\delta^{13}C$  值明显低于大气值, $C_3$  植物  $\delta^{13}C$  值通常在  $-20\text{‰}$ ~ $-35\text{‰}$ <sup>[1]</sup>,而位于干旱半干旱地区的  $C_3$  植物的  $\delta^{13}C$  相对较高。本研究获得的  $\delta^{13}C$  范围为  $-24.19\text{‰}$ ~ $-21.03\text{‰}$ ,与理论值(表1)一致。

1850—2014年伊犁地区雪岭云杉  $i_{WUE}$  呈显著增加趋势,并且与  $\delta^{13}C$  显著负相关。 $i_{WUE}$  的变化范围为  $88.38$ ~ $130.48 \mu\text{mol/mol}$ ,年均增长  $0.168 \mu\text{mol/mol}$ (表1)。 $i_{WUE}$  的最大值出现在2008年,最小值出现在1850年(图3)。与  $\delta^{13}C$  趋势相同, $i_{WUE}$  在20世纪80年代之前缓慢增加,伴随着20世纪80年代后新疆的暖湿化过程, $i_{WUE}$  迅速增加。

### 2.2 树轮 $\delta^{13}C$ 和 $i_{WUE}$ 对气候的响应

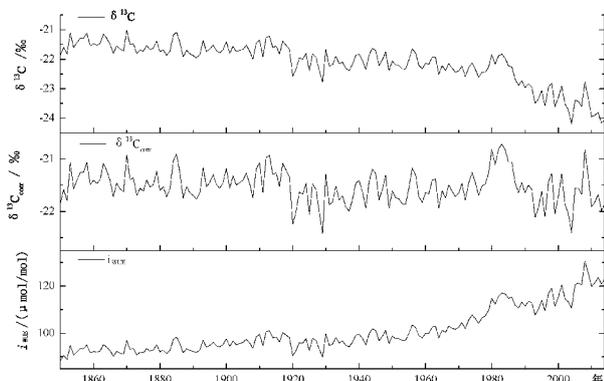


图3 那拉提树轮稳定碳同位素原始序列( $\delta^{13}C$ )、去趋势序列( $\delta^{13}C_{corr}$ )和内禀水分利用效率( $i_{WUE}$ )序列

表1 1850—2014年树轮  $\delta^{13}C$  和  $i_{WUE}$  的统计特征

	最大值	最小值	均值	标准差	方差	偏度	峰度
$\delta^{13}C$	$-21.03\text{‰}$	$-24.19\text{‰}$	$-22.11\text{‰}$	0.69	0.47	-1.14	0.93
$i_{WUE}$	130.48 $\mu\text{mol/mol}$	88.38 $\mu\text{mol/mol}$	100.79 $\mu\text{mol/mol}$	9.23	85.17	1.11	0.32

Pearson 相关分析结果表明(图4),伊犁河流域树轮宽度年表与气候因子之间的相关系数较低,均未通过0.01的显著性检验,因此,树轮宽度对气温和降水响应不敏感。而树轮  $\delta^{13}C_{corr}$  与7月( $r=0.388$ ,  $n=58$ ,  $P<0.01$ )和8月( $r=0.369$ ,  $n=58$ ,  $P<0.01$ )的最高气温呈正相关,与7月降水和相对湿度呈显著负相关( $r=0.419$ ,  $n=58$ ,  $P<0.01$ )(图4)。 $i_{WUE}$  与气温之间,尤其是夏季的平均气温和平均最低气温均存在显著的正相关。 $i_{WUE}$  与6、7、8月的平均气温相关系数分别高达0.599、0.666、0.597,同时, $i_{WUE}$  与夏季平均最低气温的相关系数超过0.7,7月最高达0.809(图4)。夏季气温可能对雪岭云杉水分利用效率的增加有重要影响。另外,虽然  $i_{WUE}$  与逐月的降水量没有显著相关性,但是与能代表水分变化的生长季  $V_{PD}$  和相对湿度有着显著的相关关系。

为了解  $C_a$  对  $i_{WUE}$  的影响,进一步分析了  $C_a$ 、年平均气温、年降水量和  $V_{PD}$  与  $i_{WUE}$  关系,结果表明, $C_a$ 、年平均气温和  $V_{PD}$  均与  $i_{WUE}$  显著相关, $i_{WUE}$  不受降水影响(图5)。一阶差相关分析表明, $i_{WUE}$  与  $V_{PD}$  显著正相关,相关系数为0.455( $P<0.01$ ,  $n=57$ ),而与  $C_a$  和平均气温在年际变化上没有关系。虽然  $i_{WUE}$  与  $CO_2$  浓度上升趋势一致,但是从年际变化上来看, $V_{PD}$  对  $i_{WUE}$  有重要影响。

进一步分析  $i_{WUE}$  与树轮宽度的关系,结果表明,那拉提  $i_{WUE}$  与树轮宽度原始序列(RAW)呈显著的负相关( $r=-0.383$ ,  $P<0.01$ ,  $n=165$ )。从 NLT 的去趋势序列来看(图1),1850—2014年间雪岭云杉径向生长整体上也并没有明显的增加;在阶段变化上,与  $i_{WUE}$  的持续增加过程不同,树轮宽度19世纪50—80年代持续增加,19世纪90年代—20世纪70年代持续减少,20世纪80—90年代增加,21世纪以来呈减少趋势。为进一步明确二者的关系,将两条序列进行滑动相关,结果表明,虽然  $i_{WUE}$  在20世纪初、20世纪30—60年代以及最近与树轮宽度呈显著的负相关,但在其他时段相关并不显著(图6)。而一阶差滑动相关进一步表明,过去165 a, $i_{WUE}$  与树轮宽度在高频变化上并没有显著的相关性(图6)。因此, $i_{WUE}$  与树

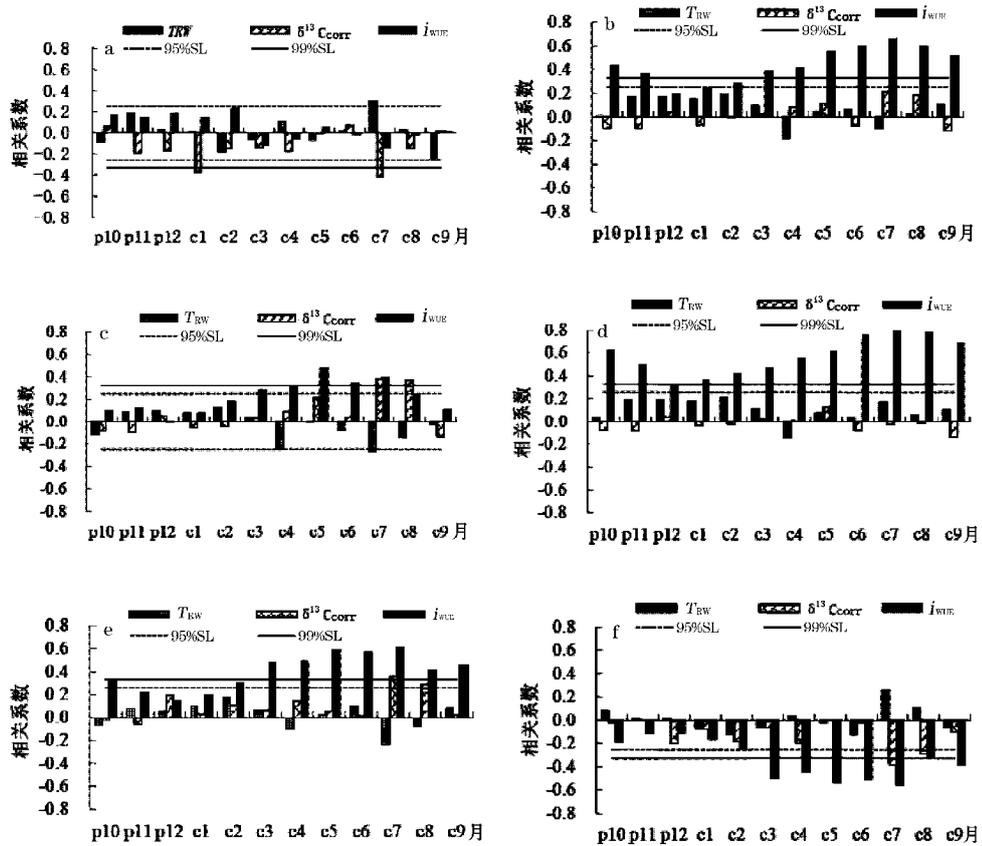


图4 树轮宽度(TRW)、稳定碳同位素( $\delta^{13}C_{corr}$ )和内禀水分利用效率( $i_{wUE}$ )序列与逐月的气象因子的关系(1956—2013年)  
(a、b、c、d、e、f分别代表新源气象站的平均气温T、降水量P、平均最高气温 $T_{max}$ 、平均最低气温 $T_{min}$ 、饱和水汽压亏缺 $V_{PD}$ 、相对湿度 $R_H$ )

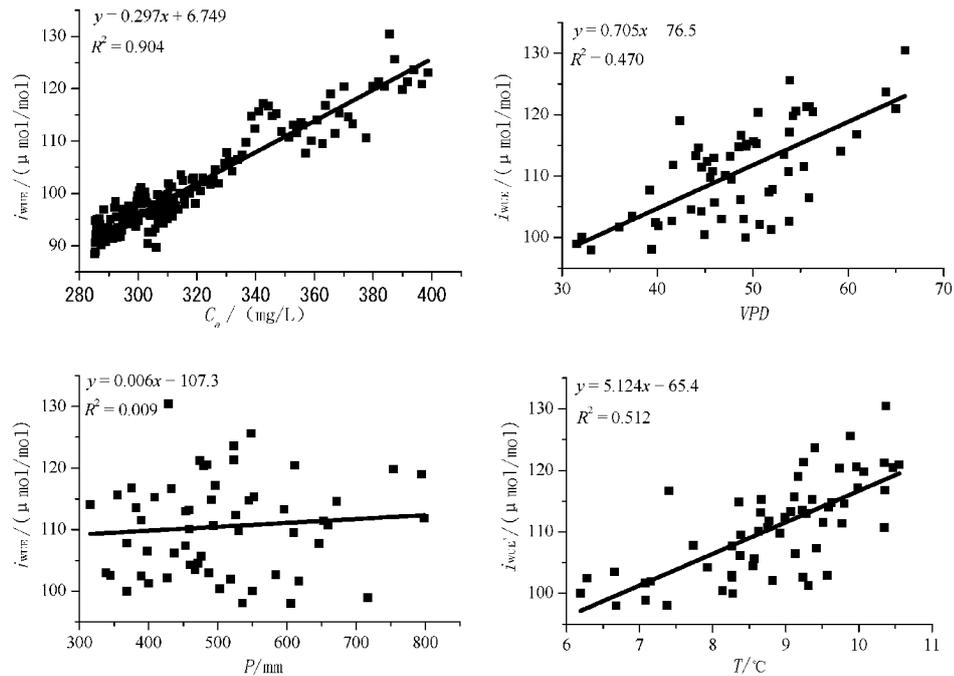


图5 内禀水分利用效率( $i_{wUE}$ )与主要环境因子的比较  
( $C_a$ 、 $T$ 、 $P$ 、 $V_{PD}$ 分别代表大气 $CO_2$ 浓度、年平均气温、年降水量、饱和年水汽压亏缺)

轮宽度之间没有直接关系,  $i_{WUE}$  的增加并没有导致树轮宽度的增加。

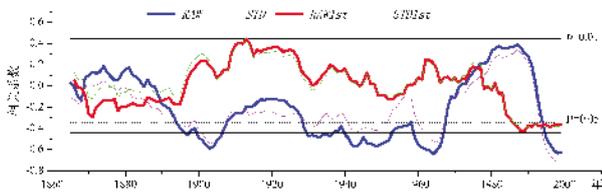


图6  $i_{WUE}$  和树轮宽度序列的 30 a 滑动相关 (1850—2014 年)

(RAW 代表树轮宽度的原始序列, STD 代表树轮标准化去趋势年表, RAW1st 代表原始序列的一阶差序列, 而 STD1st 代表标准化去趋势年表的一阶差序列)

### 3 讨论

天山被誉为“水塔”, 是中亚干旱区的主要水源地和生态屏障, 伊犁河流域成为天山(中国境内)及亚洲中部的降水中心<sup>[45]</sup>。研究区年平均降水量为 505.8 mm, 平均气温为 8.8 °C, 那拉提地区温度适宜、降水丰沛, 所以那拉提雪岭云杉径向生长受到温度和降水共同影响。

研究表明, 雪岭云杉的生长季为 5—9 月, 快速生长期在 6—7 月<sup>[26]</sup>。快速生长期温度的升高会导致土壤水分的减少, 从而形成干旱胁迫, 导致树木径向生长的减少<sup>[4, 46]</sup>, 而生长季的降水偏多有利于缓解干旱胁迫, 有助于形成宽轮。因此, 研究区树轮宽度年表与 7 月温度呈显著负相关, 而与降水呈显著正相关。但是总体而言, 在水热条件的综合作用下, 中海拔的雪岭云杉径向生长对气候要素响应不敏感。

树轮  $\delta^{13}C$  对气候的响应方面, 气候因子主要通过影响光合作用而影响到  $\delta^{13}C$  的分馏过程, 所以  $\delta^{13}C$  可以反映温度、湿度、大气  $CO_2$  浓度等的变化。许多研究表明,  $\delta^{13}C$  与夏季温度呈正相关, 而与降水和相对湿度呈负相关<sup>[28, 47-49]</sup>。伊犁地区树轮  $\delta^{13}C$  序列与生长季温度(尤其是平均最高气温)呈正相关, 与相对湿度呈显著负相关, 可以解释为植物在受到水分胁迫(相对湿度较低或降水偏少)或高温的影响时, 植物部分气孔关闭以避免过多水分散失, 因而降低了植物内部  $CO_2$  浓度, 导致植物对  $CO_2$  的识别降低<sup>[4]</sup>。在同属伊犁河流域的中亚哈萨克斯坦南部的雪岭云杉  $\delta^{13}C$  对气候的响应也表明, 雪岭云杉与夏季气温呈正相关, 与降水呈负相关<sup>[23]</sup>。

$i_{WUE}$  与气候的关系, 一般而言, 适宜的温度有助于光合作用, 从而提高水分利用效率。夏季气温可以同时影响到光合和蒸腾。在叶片尺度上, 温度对叶片

光合速率的影响一般表现为“钟形”曲线, 在温度较低的时候, 光合速率随温度的升高而增大, 超过最适温度, 由于高温使酶失去活性, 光合速率反而会减小。雪岭云杉生长季的平均气温和降水分别为 19.4 °C 和 231.9 mm, 根据干绝热直减率计算, 生长季(5—9 月)采样点的平均气温为 13 °C, 处于常绿针叶树光合作用最适温度 10~25 °C<sup>[50]</sup> 的最低位, 因此气温的升高有助于水分利用效率的提高。更重要的是, 温度的增大会导致  $V_{PD}$  的增加, 进而提高水分利用效率。 $i_{WUE}$  受光合作用、气孔导度和气候以及其他很多外在因素的综合影响。当雪岭云杉受到水分胁迫时气孔就会发生关闭, 并且关闭的气孔不会马上张开<sup>[51]</sup>, 这直接迫使雪岭云杉提高水分利用效率。

$i_{WUE}$  与大气  $CO_2$  浓度( $C_a$ )之间的高相关可能是由于  $C_a$  的增加可以提高光合作用速率并降低气孔导度, 两者都可以提高内在水分利用效率<sup>[6, 29, 52]</sup>。许多研究将植物  $i_{WUE}$  的增加归因于  $C_a$  的持续增加<sup>[4]</sup>。一些研究认为, 大气  $CO_2$  浓度的升高有利于提高树木生长速率和水分利用效率( $i_{WUE}$ )<sup>[53]</sup>。但是本研究的结果认为, 随着大气  $CO_2$  浓度的升高, 伊犁地区雪岭云杉的水分利用效率同步提高, 但是树木径向生长并没有明显增加。Wu 等<sup>[30]</sup> 也认为, 伊犁地区雪岭云杉水分利用效率的提高可能不会导致树木宽度的增加, 与气候变暖引起的干旱有关等其他因素可能会抵消  $CO_2$  的肥化效应。Xu 等<sup>[49]</sup> 研究表明, 中国北方干旱区森林树木  $i_{WUE}$  的增加不能抵消树木生长过程中的干旱胁迫作用。Giguere-Croteau 等<sup>[53]</sup> 也认为, 随着 1850 年以来  $C_a$  的增加, 生长在北美的树木也无法从  $i_{WUE}$  的增加中受益。

### 4 结论

虽然天山地处中亚干旱区, 但是天山西部伊犁地区气候相对较为暖湿。因此, 那拉提地区雪岭云杉树木径向生长虽然受 7 月平均最高气温和降水影响, 但是总体而言, 主要的气候因子并没有强烈地限制树木径向生长。夏季温度(尤其是平均最高气温)和相对湿度对雪岭云杉树轮  $\delta^{13}C$  分馏有重要影响, 这是因为雪岭云杉受到水分胁迫(相对湿度较低或降水偏少)或高温的影响时, 部分气孔关闭以避免过多水分散失, 降低了树木内部  $CO_2$  浓度, 导致植物对  $CO_2$  的识别降低。大气  $CO_2$  浓度的增加和升温导致了雪岭云杉内禀水分利用效率( $i_{WUE}$ )持续增加, 同时, 水分胁迫对  $i_{WUE}$  的年际变化有重要影响。 $i_{WUE}$  与雪岭云杉径向生长之间没有直接关系,  $i_{WUE}$  的增加并没

有导致树木径向生长的增加。大气 CO<sub>2</sub> 浓度的增加和升温促使了  $i_{WUE}$  的持续增加,但对雪岭云杉径向生长没有贡献。本研究针对那拉提中海拔的雪岭云杉进行了分析,可能采样点的代表性不足,以后还需要进一步扩展研究范围,以期获得更好的结论。

#### 参考文献:

- [1] McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7-8): 771-801.
- [2] Stocker T F, Qin D H, Plattner G -K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [C]//IPCC. Summary for policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.
- [3] Hughes L. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15: 56-61.
- [4] Andreu -Hayles L, Planells O, Gutierrez E, et al. Long tree-ring chronologies reveal 20th century increases in water-use efficiency but no enhancement of tree growth at five Iberian pine forests [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 2095-2112.
- [5] Morgan J, Pataki D, Körner C, et al. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Oecologia*, 2004, 140: 11-25.
- [6] HUANG J G, Bergeron Y, Denneler B, et al. Response of forest trees to increased atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2007, 26(5-6): 265-283.
- [7] 王庆贵. 谷地云冷杉林对全球气候变化的响应[M].北京: 科学出版社, 2009.
- [8] Frank D C, Poulter B, Saurer M, et al. Water-use efficiency and transpiration across European forests during the Anthropocene [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 579-583.
- [9] Sleen P V D, Groenendijk P, Vlam M, et al. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO<sub>2</sub> fertilization but water-use efficiency increased[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(1): 5221-5230.
- [10] Babst F, Alexander M R, Szejner P, et al. A tree-ring perspective on the terrestrial carbon cycle [J]. *Oecologia*, 2014, 176(2): 307-322.
- [11] Fritts H C. Tree rings and climate [M]. New York: Academic Press, 1976.
- [12] Waterhouse J S, Switsur V R, Barker A C, et al. Northern European trees show a progressively diminishing response to increasing atmospheric carbon dioxide concentrations [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7-8): 803-810.
- [13] Peñuelas J, Canadell J G, Ogaya R. Increased water use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2011, 20: 597-608.
- [14] FENG X H. Trends in intrinsic water-use efficiency of natural trees for the past 100-200 years: a response to atmospheric CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(13-14): 1891-1903.
- [15] Saurer M, Siegwolf R T W, Schweingruber F H. Carbon isotope discrimination indicates improving water use efficiency of trees in northern Eurasia over the last 100 years [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(12): 2109-2120.
- [16] LIU Y, WU X, Leavitt S W, et al. Stable carbon isotope in tree ring from Huangling, China and climatic variation[J]. *Science in China: Series D*, 1996, 39(2): 152-160.
- [17] LIU Y, MA L M, CAI Q F, et al. Reconstruction of summer temperature (June-August) at Mt. Helan, China, from tree-ring stable carbon isotope values since AD 1890[J]. *Science in China: Series D*, 2002, 45(12): 1127-1136.
- [18] LIU X H, SHAO X M, WANG L L, et al. Climatic significance of the stable carbon isotope composition of tree-ring cellulose: Comparison of Chinese hemlock (*Tsuga chinensis* Pritz) and alpine pine (*Pinus densata* Mast) in a temperate-moist region of China[J]. *Science in China: Series D*, 2007, 50(7): 1076-1085.
- [19] QIAN J L, LV J, TU Q P, et al. Reconstruction of the climate in the Tianmu Mountain area, Zhejiang Province, in the last 160 years by  $\delta^{13}C$  sequence of tree ring  $\alpha$ -cellulose [J]. *Science in China: Series D*, 2002, 45(5): 409-419.
- [20] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 725-731.
- [21] SHI Y F, SHEN Y P, KANG E, et al. Recent and future climate change in Northwest, China [J]. *Climatic Change*, 2007, 80: 379-393.
- [22] 李江风. 新疆年轮气候年轮水文研究[M].北京: 气象出版社, 1989.
- [23] ZHANG R B, WEI W S, SHANG H M, et al. A tree ring-based record of annual mass balance changes for the TS. Tuyuksuyskiy Glacier and its linkages to climate change in the Tianshan Mountains [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 205: 10-21.
- [24] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区 235a 气候变化及降水趋势预测[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 803-808.
- [25] 袁玉江, 邵雪梅, 李江风, 等. 夏干萨特树轮年表中降水

- 信息的探讨与 326 年降水重建 [J]. 生态学报, 2002, 22 (12): 2048-2053.
- [26] ZHANG R B, YUAN Y J, GOU X X, et al. Intra-annual radial growth of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains [J]. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 36-42.
- [37] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山山区树轮气候研究若干进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 1-9.
- [28] XU G B, LIU X H, QIN D H, et al. Drought history inferred from tree ring  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in the central Tianshan Mountains of China and linkage with the North Atlantic Oscillation [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 113: 385-401.
- [29] WU G J, LIU X H, CHEN T, et al. Elevation-dependent variations of tree growth and intrinsic water-use efficiency in Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) in the western Tianshan Mountains, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 309.
- [30] WU G J, LIU X H, CHEN T, et al. Long-term variation of tree growth and intrinsic water-use efficiency in Schrenk spruce with increasing  $\text{CO}_2$  concentration and climate warming in the western Tianshan Mountains, China [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37: 150.
- [31] Speer J H. *Fundamentals of Tree-ring Research* [M]. The University of Arizona Press, Tucson, 2010, 333.
- [32] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43, 69-75.
- [33] 尚华明, 刘晓宏, 张瑞波, 等. 用于气候分析的树木年轮稳定同位素资料获取方法与质量控制[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 5(1): 60-65.
- [34] Cook E R. A Time series analysis approach to tree ring standardization (dendrochronology, forestry, dendroclimatology, autoregressive process) [D]. Laboratory of tree-ring research, University of Arizona, Tucson, 1985: 185.
- [35] Cook E R, Holmes R L. Users manual for program ARSTAN. In: Detecting dryness and wetness signals from tree-rings in Shenyang, Northeast China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 302: 301-310.
- [36] Gagen M, McCarroll D, Loader N J, et al. Exorcising the "segment length curse": summer temperature reconstruction since AD 1640 using non-detrended stable carbon isotope ratios from pine trees in northern Finland [J]. *The Holocene*, 2007, 17: 433-444.
- [37] LIU X H, WANG W Z, XU G B, et al. Tree growth and intrinsic water-use efficiency of inland riparian forests in northwestern China: evaluation via  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  analysis of tree rings [J]. *Tree Physiology*, 2014, 34 (9): 966-980.
- [38] Brendel O, Iannetta P P M, Stewart D. A rapid and simple method to isolate pure Alpha-cellulose [J]. *Phytochemical Analysis*, 2000, 11: 7-10.
- [39] Coplen T B. Discontinuance of snow and PDB [J]. *Nature*, 1995, 375 (6529): 285.
- [40] IAEA. Reference and intercomparison materials for stable isotopes of light elements [C]//In: Proceedings of a Consultants Meeting. TECDOC-825. December 1-3. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1995.
- [41] Leavitt S W, Lara A. South American tree rings show  $\delta^{13}\text{C}$  declining trend [J]. *Tellus* 1994, 46: 152-157.
- [42] Ehleringer J R. Carbon and water relations in desert plants: an isotopic perspective. In: Saugier B., Ehleringer J.R., Hall A. et al., stable isotopes and plant carbon-water relations [M]. San Diego: Academic Press, 1993: 155-172.
- [43] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [44] Campbell G S, Norman J M. *An introduction to environmental Biophysics* [M]. 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, USA, 1998.
- [45] 张军民. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究 [J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 1-4.
- [46] Linares J C, Camarero J J. From pattern to process: linking intrinsic water-use efficiency to drought-induced forest decline [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18: 1000-1015.
- [47] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 西伯利亚落叶松树轮稳定碳同位素对气候的响应 [J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 328-334.
- [48] Konter O, Holzkämper S, Helle G, et al. Climate sensitivity and parameter coherency in annually resolved  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  from *Pinus uncinata* tree-ring data in the Spanish Pyrenees [J]. *Chemical Geology*, 2014, 377: 12-19.
- [49] XU G B, LIU X H, Belmecheri S, et al. Disentangling contributions of  $\text{CO}_2$  concentration and climate to changes in intrinsic water-use efficiency in the arid boreal forest in China's Altay Mountains [J]. *Forests*, 2018, 9: 642.
- [50] 于贵瑞, 王秋风. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [51] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, 40: 36.

- [52] WANG Y,ZHANG Y,FANG O Y,et al. Long-term changes in the tree radial growth and intrinsic water-use efficiency of Chuanxi spruce (*Picea likiangensis* var. *balfouriana*) in southwestern China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(6): 833-844.
- [53] Giguere-Croteau C, Boucher E, Bergeron Y, et al. North America's oldest boreal trees are more efficient water users due to increased  $[CO_2]$ , but do not grow faster [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 10: 1073.

## Response of Tree-ring Growth and Intrinsic Water-use Efficiency to Climate Elements in the Western Tianshan Mountains under Global Change

QIN Li, SHANG Huaming, YU Shulong, ZHANG Heli, JIANG Shengxia, ZHANG Tongwen,  
LIU Kexiang, GOU Xiaoxia, ZHANG Ruibo\*

(Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration / Key Laboratory of Tree-ring Ecology of Xinjiang Uigur Autonomous Region, Key Laboratory of Tree-ring / Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract** Global warming and the sharp rise in atmospheric  $CO_2$  concentration have become an indisputable fact and have a profound impact on forest ecosystem. A comprehensive understanding on the responses of forest ecosystem to global change is essential. The growth response of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey), an endemic tree species in the Central Asian arid region, to the climate change and the rising in atmospheric  $CO_2$  concentration are lacking. In this study, the Schrenk spruce tree-ring samples from the Ili River Basin were used to establish the tree ring width chronology, stable carbon isotope ( $\delta^{13}C$ ) series and intrinsic water-use efficiency series ( $i_{WUE}$ ). The long-term changes of the  $\delta^{13}C$  and  $i_{WUE}$  and their responses to climate change were analyzed. Meanwhile, the relationship between  $i_{WUE}$  and the radial growth of trees was discussed. The results showed that the long-term changes of the  $i_{WUE}$  were affected by atmospheric  $CO_2$  concentration ( $C_a$ ) increase and warming trends, but the main factor that directly affected the inter-annual changes of  $i_{WUE}$  was vapor pressure deficit ( $V_{PD}$ ). The increase of the  $i_{WUE}$  had no direct effect on the radial growth of trees. Global warming and  $C_a$  increase led to a continuous increase in intrinsic water use efficiency series, but didn't cause obvious increase on the radial growth of Schrenk spruce.

**Key words** tree rings; stable carbon isotope; intrinsic water-use efficiency; Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey); Tianshan Mountains; climate change