

DOI: 10.5846/stxb202008132108

秦莉, 尚华明, 张同文, 刘卫平, 张瑞波. 天山南北坡树轮稳定碳同位素对气候的响应差异. 生态学报, 2021, 41(14): 5713-5724.

Qin L, Shang H M, Zhang T W, Liu W P, Zhang R B. Response comparison of the tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ to climate on the southern and northern slopes of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5713-5724.

天山南北坡树轮稳定碳同位素对气候的响应差异

秦 莉¹, 尚华明¹, 张同文¹, 刘卫平², 张瑞波^{1,*}

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆维吾尔自治区树木年轮生态重点实验室, 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室, 乌鲁木齐 830002

2 新疆气象信息中心, 乌鲁木齐 830002

摘要: 利用采自天山南坡阿克苏河流域、天山北坡伊犁河流域和吉尔吉斯斯坦伊塞克湖流域的树木年轮样本, 按照树轮稳定碳同位素研究步骤, 分别建立了天山南坡和天山北坡各 2 条树轮稳定碳同位素去趋势序列($\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$)。采用相关函数和共线性分析揭示了天山南北坡树轮稳定碳同位素与各气候要素之间的关系。结果表明, 天山南坡树轮稳定碳同位素与生长季降水、相对湿度显著负相关, 而与温度没有明显的相关关系, 表明影响天山南坡树轮稳定碳同位素分馏的主要气候因子是生长季水分状况, 尤其是降水; 天山北坡树轮稳定碳同位素与生长季尤其是夏季的平均气温、平均最高气温和饱和水汽压亏缺显著正相关, 而与降水量、相对湿度显著负相关, 表明影响天山北坡树轮稳定碳同位素分馏的气候因子可能较为复杂。进一步分析表明, 夏季温度、降水和相对湿度共同调控着天山北坡雪岭云杉树轮稳定碳同位素分馏。

关键词: 天山; 雪岭云杉 (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey); 树木年轮; 稳定碳同位素; 气候响应

Response comparison of the tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ to climate on the southern and northern slopes of Tianshan Mountains

QIN Li¹, SHANG Huaming¹, ZHANG Tongwen¹, LIU Weiping², ZHANG RuiBo^{1,*}

1 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, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

2 Center of Xinjiang Meteorological Information, Urumqi 830002, China

Abstract: Global climate change has a profound impact on forest ecosystems. Stable isotopes in tree rings are an important tool in studies of tree response to environmental factors. In this study, four tree-ring stable carbon isotope de-trended series ($\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$) from southern and northern slopes of the Tianshan Mountains were established using tree ring samples collected from the Aksu River Basin on the southern slope of the Tianshan Mountains, the Ili River Basin and the Issyk-Kul Basin in Kyrgyzstan on the northern slopes of the Tianshan Mountains according to the stable carbon isotope methods. Analysis shows that the tree-ring stable carbon isotope values on the northern slope are lower but more stable than those on the southern slope of Tianshan Mountain. The tree-ring stable carbon isotope on the southern slope has shown an obvious negative trend, especially after the 1970s, while the northern slope is relatively stable over the past 160 years. Further, the difference in the response of tree-ring stable carbon isotopes to climate on the northern and southern slopes of Tianshan Mountains is discussed. Correlation function and collinearity analysis are used to reveal the relationship between the tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ and various climatic factors. The results show that the tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ on the southern slope of Tianshan Mountains is

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2019D04002); 国家自然科学基金(41805130, 41975110); 新疆维吾尔自治区天山雪松计划(2019XS12)

收稿日期: 2020-08-13; 网络出版日期: 2021-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: River0511@163.com

significantly negatively correlated with precipitation and relative humidity during the growing season, but has no obvious correlation with temperature. It indicates that the main climatic factor affecting the stable isotope fractionation of tree rings on the southern slope of Tianshan Mountains is the moisture condition in the growing season, especially precipitation. The tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ on the northern slope of Tianshan Mountain is significantly positively correlated with the mean temperature, mean maximum temperature and vapor pressure deficit in the growing season, especially in summer, and negatively correlated with precipitation and relative humidity. These results indicating that the influencing climate factors of tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ may be more complicated on the northern slope of Tianshan Mountain. Further analysis shows that summer temperature, precipitation and relative humidity jointly regulate the tree-ring stable isotope fractionation on the northern slope of Tianshan Mountains. Overall, the climate factors which influence tree-ring stable carbon isotope fractionation on the southern slope is more than that on the northern slope of Tianshan Mountain. The main limiting factors affecting the tree-ring stable carbon isotope fractionation on the southern slope are precipitation during the growing season and the synergistic effect of precipitation and relative humidity. While the process of tree-ring stable isotope fractionation on the northern slope of Tianshan Mountain is synergistic effect by the summer mean maximum temperature, precipitation and relative humidity.

Key Words: Tianshan Mountains; Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey); tree rings; stable carbon isotope; climate response

全球气候变化对森林生态系统有着深远的影响^[1],不同区域不同气候背景下气候变化对森林生态系统影响有所不同。树轮稳定同位素分析作为一种高分辨率方法,以其精确度高,连续性强及年轮对环境波动的敏感性强等优势,在研究过去环境变化及全球碳循环方面具有重要意义^[2-4]。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,不同树种的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候要素的响应也不同^[5]。在全球范围内,已利用很多针叶树和阔叶树的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候进行了响应分析,并对古气候进行了可靠的重建^[6-15]。我国稳定碳同位素研究主要集中在西北干旱半干旱和青藏高原周围地区,但树轮对气候的响应区域差异较大^[16-22]。新疆也有一些关于树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候响应分析和气候重建的研究成果^[23-27]。天山作为亚洲内陆干旱区最大的山系南北坡气候环境迥异,天山南坡属于暖温带大陆性气候,由于身居内陆,并位于印度洋水汽和大西洋水汽输送的背风坡,而太平洋水汽无法深入,导致该地区以大陆性极端干旱气候为主,大部分区域年降水量不足 100 mm。而天山西部北坡的伊犁河流域由于大西洋水汽通过西风环流输送至天山北坡借助地形抬升作用形成地形降水,使虽然同样身居内陆干旱区的伊犁河流域成为干旱区的“湿岛”,大部分区域年降水量大于 400 mm^[28]。温度方面,由于纬度原因,属于暖温带大陆性气候的天山南坡平均气温高于属于中温带大陆性气候的天山北坡。而暖干的天山南坡和冷湿的天山北坡同时生长着天山山区特有的建群树种—雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey)。在不同气候背景下,温度和降水如何影响雪岭云杉树轮稳定碳同位素分馏?这一问题前人研究很少涉及。本研究分别在天山南坡的阿克苏河流域和天山北坡的伊犁河流域以及伊塞克湖流域采集树轮样本,分别建立了 2 条天山南坡树轮稳定碳同位素序列和天山北坡 2 条树轮稳定碳同位素序列,结合气象数据,试图探讨气候变化背景下,天山南北坡雪岭云杉树轮稳定碳同位素对气候的响应差异。

1 资料和方法

1.1 研究区概况及样本采集

天山位于亚洲大陆中部,从西向东横跨乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦以及中国新疆中部,全长约 2400 多 km^[28],研究区位于整个天山中西部,研究团队选取天山南坡阿克苏河流域和天山北坡的伊犁河流域和伊塞克湖流域进行树轮采样,采样树种均为雪岭云杉,雪岭云杉是天山山区中海拔主要的先锋树种。该区域的降水主要来源于大西洋的西风气流,由于山地的抬升作用,天山北坡山区降水较为丰富,而天山南坡

雨影区降水较少。2015 年 6—9 月,研究团队分别在阿克苏河流域的平台子(PTZ)、伊犁河流域那拉提(NLT)和伊塞克湖流域的 Kok-Jayyk(KJK)采集了 3 个采样点的树轮样本,2018 年在天山南坡阿克苏河流域的博孜墩(BZD)进行了补充采样。所有 4 个采样点的均用 10 mm 生长锥在胸高处采集 20—25 棵树的 40 个不同方位 40 cm 以上的样芯,采样点详细信息见表 1。

表 1 天山南北坡采样点基本信息								
Table 1 Basic information of sampling sites on the northern and southern slopes of Tianshan Mountains								
	采点名 Sampling sites	代号 Codename	纬度 Latitude/N	经度 Longitude/E	平均海拔 Elevation/m	坡向 Aspect	坡度 Slope angle	郁闭度 Canopy closure
天山南坡 Southern slope	平台子	PTZ	41°44′	80°23′	2450	N	20°	0.4
	博孜墩	BZD	41°49′	80°38′	2550	N	15°	0.2
天山北坡 Northern slope	那拉提	NLT	43°15′	84°14′	1995	NW	10°	0.6
	考克杰克	KJK	42°42′	78°56′	2350	N	10°	0.2

1.2 树轮稳定碳同位素序列的建立

按照树木年轮学基本原理和方法,对所有样芯进行干燥、固定、打磨、交叉定年,用精度为 0.001 mm 的轮宽测量仪和 MeasureJ2X 程序进行轮宽测量;用国际年轮库的 COFECHA 定年质量控制程序进行交叉定年的检验^[29],确保每一生长年轮具有准确的日历年龄;最后,采用 ARSTAN 年表研制程序完成树轮宽度年表的建立^[30]。在交叉定年的基础上,选择没有缺轮、且没有明显损伤或异常、与主序列相关较高、年轮边界清晰的树芯作为树轮稳定碳同位素研究对象。依据以上标准,每个样点最终挑选了 4—10 棵树的样芯经过双面打磨和目测定年。为了避免幼龄效应^[31-32],去除髓心至少 30 年,其余用手术刀在显微镜下进行样本逐年剥离,剥离时严格对照交叉定年的宽度数据,将同一年历年的样芯混合。利用混合球磨机(MM400, Retsch GmbH, Germany)对每一年的样本研磨粉碎并充分混合,该方法已应用于天山树轮稳定碳同位素研究^[33-34]。采用 Brendel 等^[35]的醋酸硝酸混合方法对所有样本进行逐年 α -纤维素的提取,同时增加 17% 的 NaOH 处理以去除木质素及非纤维素多糖^[36],该研究方法广泛应用于树轮稳定碳同位素研究中^[33-34,37]。将逐年的纤维素样本取 70—100 μg 用锡杯包裹为立方体或球形,在兰州大学西部环境教育部重点实验室的元素分析仪(Flash EA 1112; Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)和稳定同位素质谱仪(MAT253, Thermo Fisher Scientific Bremen GmbH, Germany)在线进行稳定碳同位素的测定。每测定 7 个样本同时测定一个实验室已知的石墨标准(-16.0‰)。同位素测量的分析误差(标准差)小于 0.05‰ 。稳定碳同位素表达采取相对丰度南卡罗莱纳白垩系皮狄组地层美洲箭石化石(Vienna Pee Dee Belemnite VPDB)标准^[38],其计算公式为:

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

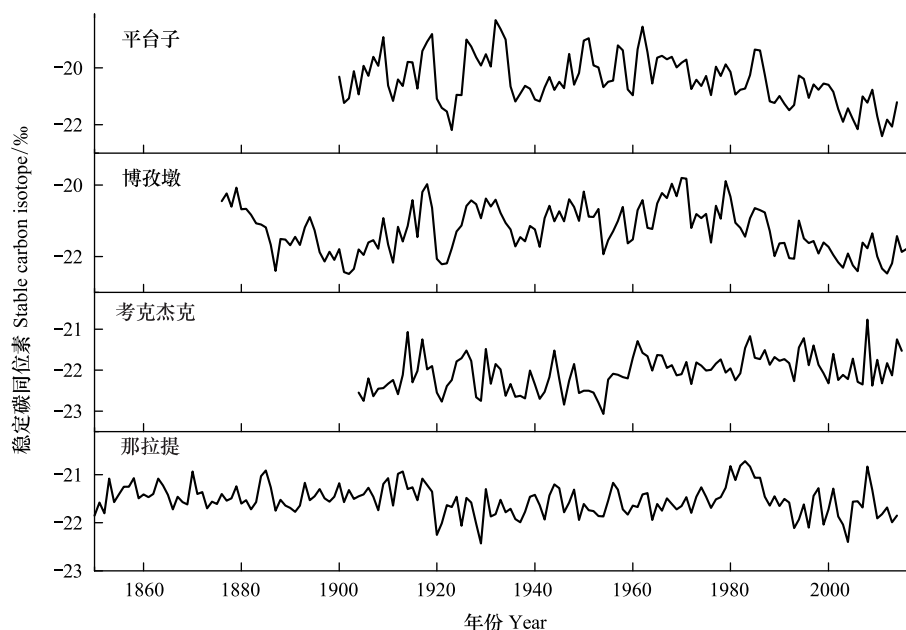
(1)

由此,得到了 4 条树轮稳定碳同位素序列。

研究表明,工业革命以来由于化石燃料的大量使用,使大气中 CO_2 浓度持续升高^[39]。树木在生长过程中通过光合作用不断吸收大气中的 CO_2 ,外界大气中 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 CO_2 浓度升高的影响。由于分馏的组合效应,同时光合作用产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与源水直接相联系,因此只需要简单在每轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值上加上每年大气 $\delta^{13}\text{C}$ 相对于标准值的差值,就可以校正大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化。通常我们把工业革命前大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值作为标准值,其值约为 -6.4‰ ,与小冰期前 1850 年的值较接近,本研究将树轮稳定碳同位素的实测值加上大气 $\delta^{13}\text{C}$ 相对于标准值的差值作为校正后的稳定碳同位素值,将其定义为树轮稳定碳同位素的去趋势序列($\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$)^[39-40](图 1),基于此序列分析雪岭云杉稳定碳同位素对区域气候的响应。

1.3 气象资料

本研究所选气象资料源自中国气象数据网(<http://cdc.cma.gov.cn>)和新疆维吾尔自治区气象信息中心,

图1 四条树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列Fig.1 The four tree-ring stable carbon isotope series ($\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$)

质量严格把控,数据真实可靠。选取天山南坡与采样点和海拔最接近的拜城气象站(经纬度:41°47'N,81°54'E,海拔:1230 m)1959—2016 年月气象数据和天山北坡的昭苏气象站(经纬度:43°09'N,81°08'E,海拔:1855 m)1956—2016 年月气象数据,选取平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量、相对湿度、日照时数共 7 种气候要素。另外,采用以下公式计算了逐月的饱和水汽压亏缺 (VPD)^[41]:

$$\text{VPD} = (1 - RH) \times 0.6108 \times e^{(17.27 T / (T + 273.3))} \quad (2)$$

式中,VPD 为逐月的饱和水汽压亏缺, RH 为月平均相对湿度, T 为月平均气温。

分析表明,天山南坡拜城气象站年平均气温 7.95℃,年降水量 118.9 mm,雨热同期,夏季高温多雨。过去 60 年,天山南坡拜城平均气温以 0.28℃/10a 的速率迅速上升,而降水量也呈显著增加趋势。位于天山北坡的昭苏气象站年平均气温 3.42℃,年降水量 510.3 mm,降水主要集中在 4—9 月。过去 60a,天山北坡昭苏以 0.32℃/10a 的速率显著升温,降水量增加不明显(图 2)。

1.4 研究方法

使用传统的树轮气候研究中的数理统计方法来分析数据^[42]。树轮参数和气候之间的相关性分析采用 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参数之间的相关性以期提取季节尺度的气候信号。另外,采用共线性分析方法探讨了各气候要素对树轮稳定碳同位素分馏的贡献。

2 结果

2.1 树轮稳定碳同位素序列统计分析

天山南坡 2 个样点树轮稳定碳同位素值分别变化于 -18.320‰—-22.400‰ (PTZ) 和 -19.794‰—-22.489‰ (BZD),平均值分别为 -20.419‰ (PTZ) 和 -21.245‰ (BZD),变异系数为 -0.042 (PTZ) 和 -0.031 (BZD)。相比较而言,天山北坡雪岭云杉树轮稳定碳同位素值相对较低,分别变化于 -20.770‰—-23.070‰ (KJK) 和 -20.720‰—-22.430‰ (NLT),平均值分别为 -22.050‰ (KJK) 和 -21.525‰ (NLT),变异系数也相对较小,分别为 -0.020 (KJK) 和 -0.014 (NLT) (表 2)。同时,从方差和标准差来看,天山南坡也大于天山北坡。

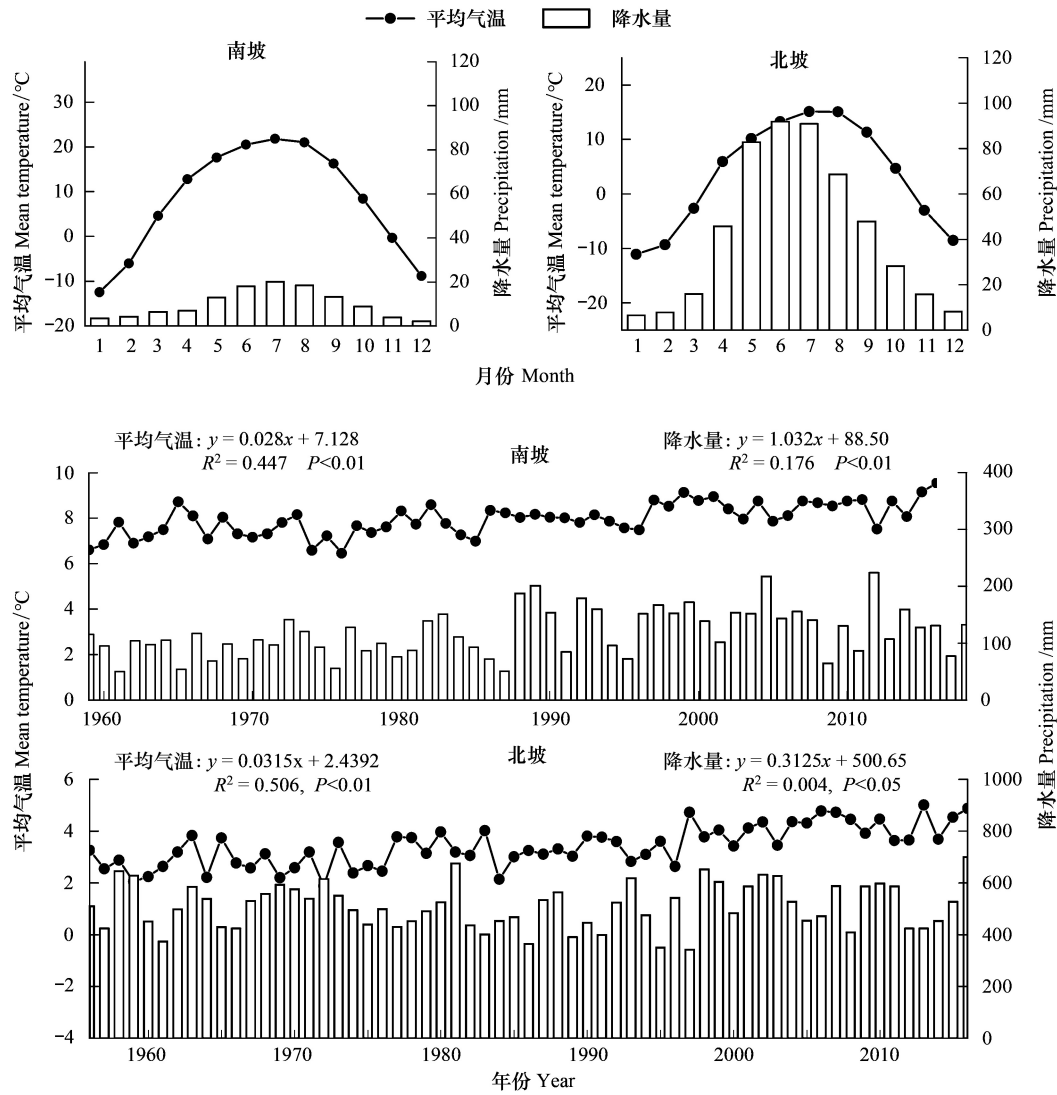


图 2 天山南北坡气候变化对比

Fig.2 Comparison of climate change between the northern and southern slopes of Tianshan Mountains

说明相对而言,天山北坡的雪岭云杉树轮稳定碳同位素在年际变化较天山南坡的稳定。另外,从长期变化来看,天山南坡树轮稳定碳同位素呈明显的偏负趋势,尤其是 1970 年代以后,而天山北坡相对较为稳定(图 1)。从四条序列之间的相关性来看,PTZ 与 BZD、NLT 与 KJK 均通过了 99%的显著性检验,相关系数分别为 0.761 ($n = 115, P < 0.001$) 和 0.390 ($n = 111, P < 0.001$),这说明同一流域间树轮稳定碳同位素的一致性更高。

表 2 天山南北坡雪岭云杉树轮稳定同位素序列的基本统计特征

Table 2 The statistics of tree-ring stable carbon isotope series

代号 Codename	年代 Years	一阶自相关 First-order autocorrelation	极大值 Maximum	极小值 Minimum	均值 Mean	方差 Variance	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Coefficient of variation
PTZ	1900—2014	0.636	-18.320‰	-22.400‰	-20.419‰	0.729	0.854	0.163	-0.336	-0.042
BZD	1876—2016	0.704	-19.794‰	-22.489‰	-21.245‰	0.435	0.660	0.108	-0.800	-0.031
KJK	1904—2015	0.354	-20.770‰	-23.070‰	-22.050‰	0.190	0.436	0.223	-0.180	-0.020
NLT	1850—2014	0.416	-20.720‰	-22.430‰	-21.525‰	0.096	0.310	0.026	0.360	-0.014

PTZ: 平台子, BZD: 博孜墩, KJK: 考克杰克, NLT: 那拉提

2.2 树轮稳定碳同位素对气候的响应

将天山南坡两个采样点的树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列与附近的拜城气象站上年 10 月到当年 9 月的逐月平均气温、平均最高气温、降水量、相对湿度和饱和水汽压亏缺等气象参数进行相关分析。结果表明,两个采点的树轮稳定碳同位素与生长季平均气温和平均最高气温没有显著的相关,而与前一年 10 月、11 月和当年 2—4 月均显著负相关,进一步进行一阶差相关分析显示,天山南坡两个采样点的树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列与拜城气象站上年 10 到当年 9 月的逐月平均气温的一阶差均未通过 95% 的显著性检验,因此,两条 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列与平均气温的相关性也仅仅表现为趋势相关;而两条树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列均与生长季降水呈显著的负相关关系,BZD 和 PTZ 序列与 6 月降水量相关系数分别高达 -0.418 ($n=56$, $P<0.01$) 和 -0.403 ($n=55$, $P<0.01$);同时,两条树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列与生长季相对湿度呈现显著的负相关关系,与生长季饱和水汽压亏缺(VPD)呈显著的正相关关系(图 3)。

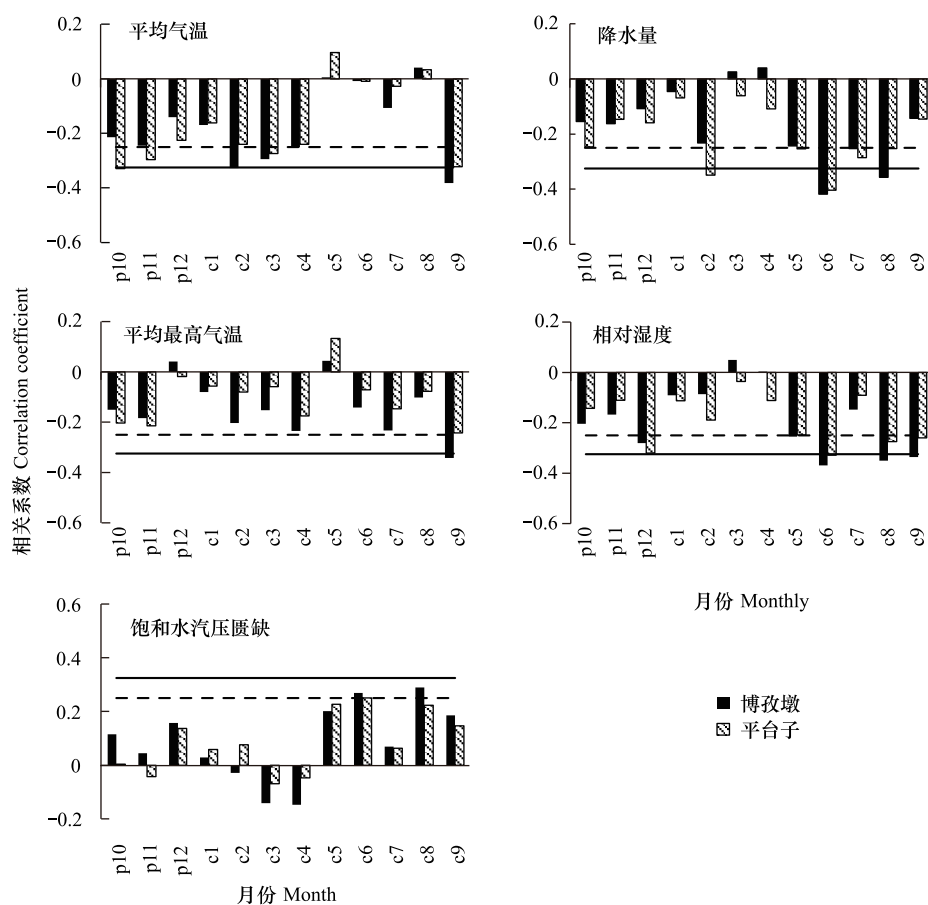


图 3 天山南坡树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 对气候的响应

Fig.3 The response comparison between the tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ and climate on the southern slopes of Tianshan Mountains

T:平均气温 Temperature;P:降水量 Precipitation; T_{max} :平均最高气温 Mean maximum temperature;RH:相对湿度 Relative humidity;VPD:饱和水汽压亏缺 Vapor pressure deficit;p10—p12 和 c1—c9 分别代表上年 10 月、11 月、12 月和当年的 1—9 月;横虚线和横实线分别代表相关系数超过 95% 和 99% 的显著性检验

将天山北坡两个采样点的树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 列与附近的昭苏气象站上年 10 到当年 9 月的逐月平均气温、平均最高气温、降水量、相对湿度和饱和水汽压亏缺(VPD)等气象参数进行相关分析,结果表明,两个采点的树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与生长季平均最高气温均呈显著的正相关关系,同时与生长季的降水和相对湿度呈显著的负相关关系,另外,还与生长季的 VPD 呈显著的正相关关系(图 4)。

进一步分析表明(表 3),天山南坡树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列 BZD 和 PTZ 分别与生长季内(5—9 月)的降水量以及

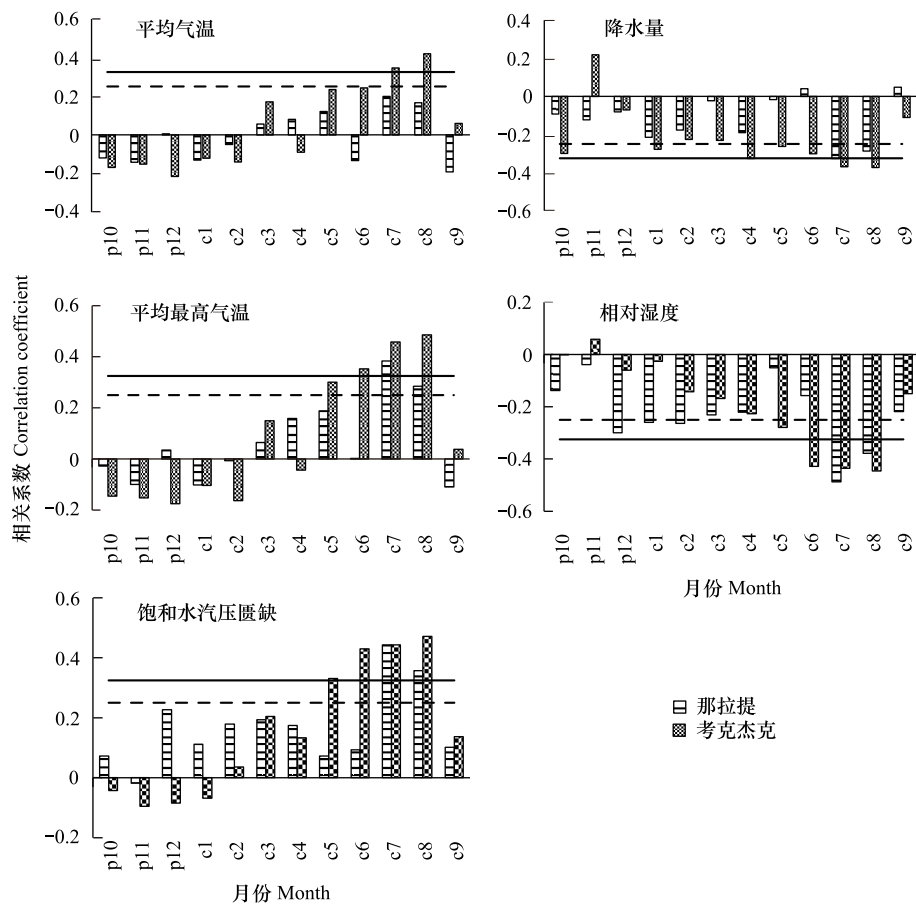


图 4 天山北坡树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 对气候的响应对比

Fig.4 The response comparison between the tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ and climate on the northern slopes of Tianshan Mountains

相对湿度显著负相关,其中,BZD 和 PTZ 与生长季降水量的相关系数分别达到 $-0.618(n=58, P<0.01)$ 和 $-0.591(n=56, P<0.01)$;另外,天山南坡的两条树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列与饱和水汽压亏缺(VPD)的相关系数也超过了 95%的显著性检验。以上无论是树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与降水和相对湿度的负相关,还是与 VPD 的正相关均表明了影响天山南坡树轮稳定碳同位素分馏的主控气候因子为生长季的水分,尤其是降水。

表 3 天山南北坡树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与气候参数相关

Table 3 The correlation coefficient between the tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ and climate parameters on the northern and southern slopes of Tianshan Mountains

	代号 Codename	T59	T _{max} 59	P59	RH59	VPD59	T68	T _{max} 68	P68	RH68	VPD68
天山南坡	BZD	-0.143	-0.277 *	-0.618 **	-0.420 **	0.318 *	-0.053	-0.251	-0.564 **	-0.383 **	0.299 *
Southern slope	PTZ	0.040	-0.112	-0.591 **	-0.350 **	0.284 *	-0.003	-0.149	-0.522 **	-0.309 *	0.253
天山北坡	NLT	0.043	0.224	-0.226	-0.358 **	0.314 *	0.101	0.299 *	-0.300 *	-0.427 **	0.388 **
Northern slope	KJK	0.367 **	0.492 **	-0.553 **	-0.427 **	0.508 **	0.454 **	0.586 **	-0.536 **	-0.534 **	0.560 **

T59:5—9月平均气温 Mean Temperature from May to September; T_{max}59:5—9月平均最高气温 Mean maximum temperature from May to September; P59:5—9月降水量 Total precipitation from May to September; RH59:5—9月相对湿度 Mean relative humidity from May to September; VPD59:5—9月饱和水汽压亏缺 Vapor pressure deficit from May to September; T68:6—8月平均气温 Mean Temperature from July to August; T_{max}68:6—8月平均最高气温 Mean maximum temperature from July to August; P68:6—8月总降水量 Total precipitation from July to August; RH68:6—8月平均相对湿度 Mean relative humidity from July to August; VPD68:6—8月饱和水汽压亏缺 Vapor pressure deficit from July to August; * 和 ** 分别代表相超过 95%和 99%的显著性检验

而天山北坡雪岭云杉树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与生长季和夏季平均气温、平均最高气温和饱和水汽压亏缺 (VPD) 显著正相关, 而与降水量和相对湿度显著负相关。其中 KJK 采点树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与夏季平均最高气温和 VPD 相关系数分别高达 0.586 ($n=60$, $P<0.01$) 和 0.560 ($n=60$, $P<0.01$), 而与夏季降水量和相对湿度的相关系数分别相关高达 -0.536 ($n=60$, $P<0.01$) 和 -0.534 ($n=60$, $P<0.01$)。即天山北坡树轮稳定碳同位素分馏可能受到水热条件的共同控制。

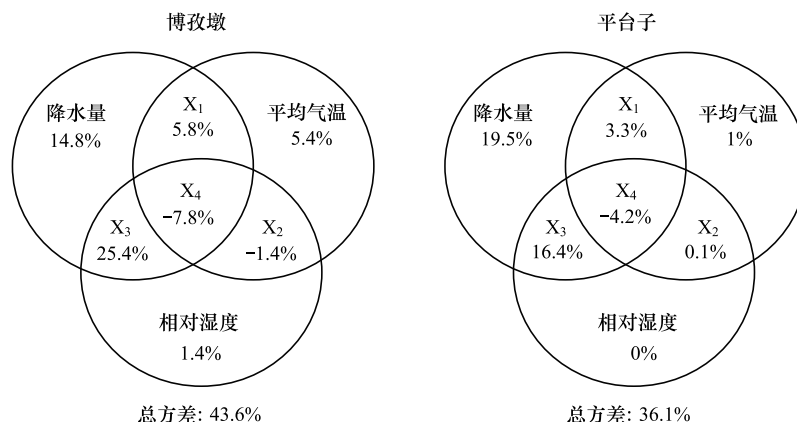


图 5 天山南坡树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与生长季 (5—9 月) 平均气温、降水量和相对湿度的共线性分析

Fig. 5 Collinearity analysis between the tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ and mean temperature, precipitation and relative humidity in growing season of trees (May—September) on the southern slopes of Tianshan Mountains

P、T 和 RH 分别为单一的降水、平均气温和平均相对湿度对稳定碳同位素的作用; X1 为平均气温和降水的综合影响, X2 为平均气温和相对湿度的综合影响, X3 为降水量与平均相对湿度的综合影响, X4 为三种气候因子共同影响。相应的百分比值表示参数的解释方差

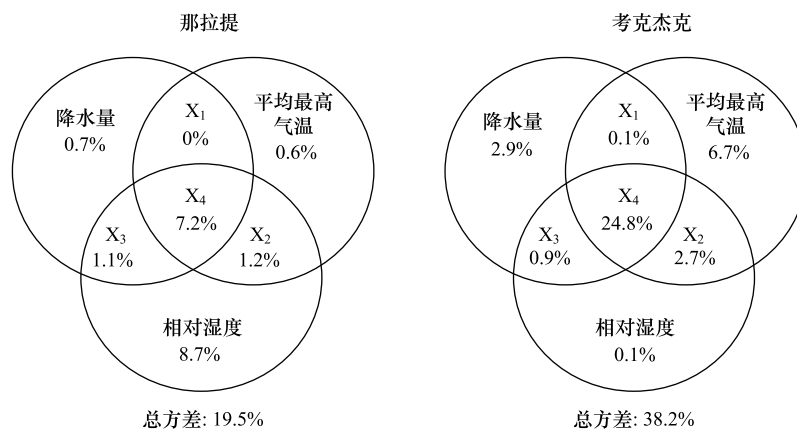


图 6 天山北坡树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与夏季 (6—8 月) 平均最高气温、降水量和相对湿度的共线性分析

Fig. 6 Collinearity analysis between the tree-ring $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ and summer mean maximum temperature, precipitation and relative humidity on the northern slopes of Tianshan Mountains

从单因素相关分析结果来看, 生长季降水和相对湿度与天山南坡树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列显著负相关, 而生长季温度、降水和相对湿度等气候因子对天山北坡树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列都有一定影响。但这些气候因子在影响树轮稳定碳同位素分馏时可能存在协同效应。因此进一步对主要气候因子与树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列进行共线性分析。从共线性分析可以看出, 生长季平均气温、降水量和相对湿度分别解释天山南坡 BZD 和 PTZ 树轮稳定碳同位素序列的 43.6% 和 36.1% 的方差; 而夏季平均最高气温、降水量和相对湿度解释天山北坡 KJK 序列 38.2% 的方差, 仅仅解释 NLT 19.5% 的方差。这表明, 总体而言, 气候因子对天山南坡树轮稳定碳同位素分馏的影响要大

于天山北坡。影响天山南坡树轮稳定碳同位素分馏的主要限制性因子为生长季的降水量以及降水和相对湿度的协同效应,他们可以解释树轮稳定碳同位素分馏 30% 以上的方差,而平均气温的贡献不大;天山北坡树轮稳定同位素分馏过程由夏季平均最高气温、降水量和相对湿度协同影响,任何一个单独气候因子对天山北坡树轮稳定碳同位素分馏都贡献不大(图 5,图 6)。

3 讨论

气候因子通过影响光合作用而影响到 $\delta^{13}\text{C}$,光合作用中 CO_2 的同化过程是一系列的酶促反应,对有机物合成影响较大的气候因子可以分为两类,空气相对湿度和降水为一类;温度和光强度为另一类^[43]。相对湿度和降水的变化造成湿度梯度和压力的改变,进而影响到气孔开度大小,进入细胞内的 CO_2 浓度发生改变,导致合成有机物中同位素组成发生改变;温度和光强主要影响光合作用酶的产量和活性,对光合作用的速率和效率产生影响,进一步影响合成有机物中同位素组成。另外,还会通过影响饱和水汽压而影响气孔导度(g)^[44]。植物对 CO_2 的吸收速率与叶片气孔导度通数的变化都会影响叶内胞间 CO_2 浓度(C_i)或叶内胞间 CO_2 浓度与大气 CO_2 浓度(C_i/C_a)之比,从而导致植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化。温度、湿度、光照等气候因子都是通过影响气孔和光合羧化酶对碳同位素的分布效应 a (CO_2 扩散分馏系数)和 b (羧化生化分馏系数)、细胞间 CO_2 浓度影响 $\delta^{13}\text{C}$ ^[17]。

天山南坡雪岭云杉树轮稳定碳同位素值、方差和标准差均大于天山北坡可能与天山南北气候差异有关,位于天山南坡的阿克苏河流域相对天山北坡的伊犁河流域和伊塞克湖流域而言,气温相对较高,降水相对较少,导致气候更为干旱,并且极端气候事件较为频繁,导致了天山南坡稳定同位素值相对较高,同位素分馏相对不稳定。但是,总体而言,是符合 C3 植物碳同位素的理论值^[43]。目前,大气中的 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 -8.2‰ 。随着大量使用化石燃料($\delta^{13}\text{C}$ 非常低), $\delta^{13}\text{C}$ 迅速下降。植物组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于大气。C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 通常在 -20‰ 至 -35‰ 之间,在干旱地区相对较高^[43]。

稳定碳同位素记录了光合速率和气孔导度之间的平衡,在干旱地区,降水、相对湿度和土壤水分状况占主导地位,在湿润地区,夏季辐照度和温度占主导地位^[43]。大量研究表明,干旱区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受叶片气孔导度(g)控制,与降水、土壤湿度和空气相对湿度等因子负相关^[8, 11, 44-46]。天山南坡拜城气象站生长季平均气温为 19.4°C ,夏季为 21.1°C ,而夏季平均最高气温为 30.4°C ,按照干绝热直减率计算,采样点位置的生长季平均气温为 11.5°C (PTZ) 和 10.8°C (BZD),夏季平均气温为 13.2°C (PTZ) 和 12.5°C (BZD),平均最高气温为 22.5°C (PTZ) 和 21.8°C (BZD)。一般而言,常绿针叶树净光合作用最适温度为 $10-25^\circ\text{C}$ ^[47],雪岭云杉生长最快的时期为夏季^[48],无论是雪岭云杉生长季还是生长最快时期的温度都适宜树木生长和光合作用,因此天山南坡生长季温度不是树木生长和稳定碳同位素分馏的限制因子。相对而言,拜城气象站的整个生长季降水量仅有 56.5 mm ,属于典型的干旱区,采样点虽然海拔相对较高,但是高海拔降水也远远不能满足树木径向生长和稳定碳同位素分馏。因此,这一时期的水分状况可能是限制树轮稳定同位素分馏的气候因子。Saurer 等^[12]对最近 50 年不同水分条件下的法国山毛榉树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候要素的关系研究发现 5—7 月的降水量是其主要控制因子,且干燥地区比湿润地区更明显。Hemming 等^[7]发现,山毛榉树、橡树及松树的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的高频变化与 6—9 月的平均湿度呈显著负相关,这些研究结果与本文生长季降水和相对湿度与树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 显著负相关的结果一致。由于空气相对湿度对气孔开放的直接影响,在生长季相对湿度和树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著的负相关关系^[49]。天山南坡由于气候干旱少雨,相对湿度较低,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与生长季降水和相对湿度显著负相关可以解释为植物在受到水分胁迫(降水偏少或相对湿度较低)的影响时,为了减少植物蒸腾作用导致的水分损失,气孔开孔较小,导致叶片内部和环境的 CO_2 浓度梯度增大,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^[5], $\delta^{13}\text{C}$ 偏正。

McCarroll & Loader^[43]提出,在水分胁迫较少的区域,控制树轮稳定碳同位素分馏的主要因素可能是光合速率。在寒冷、潮湿和高海拔山区,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 主要与光合作用速率(A)有关,并与夏季温度和光照等因素呈正

相关关系^[44-46]。天山北坡昭苏气象站生长季平均气温为 13.0℃,夏季为 14.5℃,生长季降水为 382mm。按照干绝热直减率计算,采样点 KJK 的生长季平均气温仅 9.8℃,低于光合作用最适温度,因此,KJK 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与温度之间的呈显著的正相关关系。其生理意义可解释为:相比于天山南坡和天山北坡 NLT 采样点,KJK 采样点的降水多,水分不能成为树轮稳定碳同位素的主要限制性因子,而该区域海拔更高,生长季和夏季气温很低,甚至低于有效光合作用最适温度。尤其是雪岭云杉快速生长的夏季温度的增加增强了光合作用酶的产量和活性,提高光合作用速率,导致叶片内部 CO_2 浓度降低。高温还伴随着蒸发加剧,为了减少水分损失,叶片气孔开口减小,都会造成树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正。

但是,天山北坡树轮稳定同位素不仅与夏季平均最高气温显著正相关,而且与降水和相对湿度也显著负相关,这表示气孔导度也对天山北坡树轮稳定同位素分馏有重要影响^[50]。天山北坡树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 可能反映了气孔导度和光合速率之间的平衡,这一区域树轮稳定同位素分馏的气候因素可能更为复杂。与夏季平均最高气温显著正相关是由于温度偏高导致较低的气孔导度或较高的光合速率,或两个要素共同作用导致,进入叶片细胞内的 CO_2 浓度的降低,反映在 $\delta^{13}\text{C}$ 值为偏大。从共线性分析结果可以看出,天山北坡树轮稳定同位素受夏季平均最高气温、降水和相对湿度的协同影响。在生长期(尤其是夏季),天山北坡雪岭云杉树木碳同位素分馏受光合速率(温度)和气孔导度(降水和相对湿度)共同调控。Alexander 等^[11]发现位于西伯利亚东部的落叶松树轮稳定碳同位素与该地区 6—7 月的平均最高气温显著正相关,与 7 月降水量显著负相关,该研究结果和本文的研究结果完全一致。Konter et al^[51]也指出,西班牙比利牛斯山脉松林树年轮数据中的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与夏季降水呈负相关,与夏季温度呈正相关。前期关于新疆树轮稳定碳同位素对气候的响应研究认为,阿尔泰山树轮稳定碳同位素分馏可能受到温度和水分共同控制^[26],而中天山可能主要为水分^[27],这些研究结果与本研究一致。树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与速生期温度(尤其是平均最高气温)和相对湿度相关显著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^[5]。

4 结论

天山北坡雪岭云杉树轮稳定碳同位素值、变异系数、方差和标准差均低于天山南坡。天山北坡的雪岭云杉树轮稳定碳同位素在年际变化较天山南坡的稳定。从长期变化来看,天山南坡树轮稳定碳同位素呈明显的偏负趋势,尤其是 1970 年代以后,而天山北坡相对较为稳定。

天山南坡两条树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 序列均与生长季降水、相对湿度呈显著的负相关关系,与生长季饱和水汽压亏缺(VPD)呈显著的正相关关系。而天山北坡两个采点的树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 与生长季平均气温、平均最高气温以及饱和水汽压亏缺(VPD)呈显著的正相关关系,同时与生长季的降水和相对湿度呈显著的负相关关系。天山南坡树轮稳定碳同位素分馏的主控气候因子为生长季的水分,尤其是降水,而天山北坡树轮稳定碳同位素分馏可能受到水热条件的共同控制。

总体而言,气候因子对天山南坡树轮稳定碳同位素分馏的影响要大于天山北坡。影响天山南坡树轮稳定碳同位素分馏的主要限制性因子为生长季的降水以及降水和相对湿度的协同效应,平均气温的贡献不大;而天山北坡树轮稳定同位素分馏过程由夏季平均最高气温、降水量和相对湿度协同影响。

参考文献(References):

- [1] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [2] Robertson I, Switsur V R, Carter A H C, Barker A C, Waterhouse J S, Briffa K R, Jones P D. Signal strength and climate relationships in $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of tree ring cellulose from oak in east England. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D16): 19507-19516.
- [3] Leavitt S W, Lone A. Seasonal stable-carbon isotope variability in tree rings: Possible paleoenvironmental signals. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1991, 87(1): 59-70.
- [4] Wilson A T, Grinsted M J. $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ in cellulose and lignin as palaeothermometers. *Nature*, 1977, 265(5590): 133-135.

- [5] Francey R J, Farquhar G D. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings. *Nature*, 1982, 297(5861): 28-31.
- [6] Saurer M, Siegenthaler U, Schweingruber F. The climate-carbon isotope relationship in tree rings and the significance of site conditions. *Tellus B*, 1995, 47(3): 320-330.
- [7] Hemming D I, Switsur V R, Waterhouse J S, Heaton T H E, Carter A H C. Climate variation and the stable carbon isotope composition of tree ring Cellulose: an intercomparison of *Quercus robur*, *Fagus sylvatica* and *Pinus silvestris*. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1998, 50(1): 25-33.
- [8] Barber V A, Juday G P, Finney B P, Wilmking M. Reconstruction of Summer temperatures in interior Alaska from tree-ring proxies: evidence for changing synoptic climate regimes. *Climatic Change*, 2004, 63(1/2): 91-120.
- [9] Hafner P, Levanič T. Stable carbon isotopes in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) tree rings at two sites in Slovenia. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*, 2009, 88: 43-52.
- [10] Pawelczyk S, Pazdur A, Halas S. Stable carbon isotopic composition of tree rings from a Pine tree from Augustów Wilderness, Poland, as a temperature and local environment conditions indicator. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2004, 40(2): 145-154.
- [11] Kirdyanov A V, Treydte K S, Nikolaev A, Helle G, Schleser G H. Climate signals in tree-ring width, density and $\delta^{13}\text{C}$ from larches in eastern Siberia (Russia). *Chemical Geology*, 2008, 252(1/2): 31-41.
- [12] Saurer M, Siegenthaler U. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratios in trees are sensitive to relative humidity. *Dendrochronologia*, 1989, 7: 9-13.
- [13] Sonninen E, Jungner H. Stable carbon isotope in tree-rings of a Scots alpine pine (*Pinus sylvestris* L.) from northern Finland. *Paläoklimaforschung*, 1995, 15: 121-128.
- [14] Sheu D D, Kou P, Chiu C H, Chen M J. Variability of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ in Taiwan fir: growth effect and response to May-October temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(1): 171-177.
- [15] Saurer M, Borella S, Schweingruber F, Siegwolf R. Stable carbon isotopes in tree rings of beech: climatic versus site-related influences. *Trees*, 1997, 11(5): 291-297.
- [16] Liu Y, Wu X D, Leavitt S W, Hughes M K. Stable carbon isotope in tree rings from Huangling, China and climatic Variation. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 1996, 39(2): 152-160.
- [17] Liu X H, Shao X M, Wang L L, Zhao, L J, Wu, P, Chen T, Qin, D H, Ren J W. 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. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(7): 1076-1085.
- [18] Xu G B, Chen T, Liu X H, Jin L Y, An W L, Wang W Z. Summer temperature variations recorded in tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ values on the northeastern Tibetan Plateau. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 105(1/2): 51-63.
- [19] Wang W Z, Liu X H, Shao X M, Leavitt S, Xu, G B, An W L, Qin D H. A 200 year temperature record from tree ring $\delta^{13}\text{C}$ at the Qaidam Basin of the Tibetan Plateau after identifying the optimum method to correct for changing atmospheric CO_2 and $\delta^{13}\text{C}$. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G4): G04022.
- [20] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 陈拓, 任贾文. 西藏喜马拉雅冷杉年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候意义. *科学通报*, 2003, 48(11): 1209-1213.
- [21] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 任贾文, 王瑜. 西藏林芝冷杉树轮稳定碳同位素对气候的响应. *冰川冻土*, 2002, 24(5): 574-578.
- [22] 刘禹, 吴祥定, Leavitt S W, Hughes M K. 黄陵树木年轮稳定 C 同位素与气候变化. *中国科学(D)*, 1996, 26(2): 125-130.
- [23] 陈拓, 秦大河, 李江风, 任贾文, 刘晓宏, 孙维贞. 新疆昭苏云杉树轮纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候意义. *冰川冻土*, 2002, 22(4): 347-352.
- [24] 尚华明, 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 张同文, 陈峰, 秦莉. 胡杨树树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的艾比湖地区夏季最高温度变化. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(5): 7-13.
- [25] 张瑞波, 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 张同文, 范子昂, 陈峰, 秦莉. 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的阿勒泰地区近 160a 夏季气温变化. *沙漠与绿洲气象*, 2014, 8(2): 34-40.
- [26] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 尚华明, 喻树龙, 张同文, 陈峰, 范子昂, 秦莉. 西伯利亚落叶松树轮稳定碳同位素对气候的响应. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 328-334.
- [27] Xu G B, Liu X H, Qin D H, Chen T, Sun W Z, An W L, Wang W Z, Wu G J, Zeng X M, Ren J W. 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. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 116(3): 385-401.
- [28] 张瑞波. 基于树轮的中亚西天山干湿变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [29] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [30] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization[D]. Tucson: The University of Arizona, 1985.
- [31] Porté A, Loustau D. Seasonal and interannual variations in carbon isotope discrimination in a maritime pine (*Pinus pinaster*) stand assessed from the isotopic composition of cellulose in annual rings. *Tree Physiology*, 2001, 21(12/13): 861-868.

- [32] Gagen M, McCarroll D, Loader N J, Robertson I, Jalkanen R, Anchukaitis K J. Exorcising the 'segment length curse': summer temperature reconstruction since AD 1640 using non-detrended stable carbon isotope ratios from pine trees in northern Finland. *The Holocene*, 2007, 17(4): 435-446.
- [33] Zhang R B, Qin L, Shang H M, Yu S L, Gou X H, Mambetov B T, Bolatov K, Zheng W J, Ainur U, Bolatova A. Climatic change in southern Kazakhstan since 1850 C.E. inferred from tree rings. *International Journal of Biometeorology*, 2020, 64(5): 841-851.
- [34] Zhang R B, Wei W S, Shang H M, Yu S L, Gou X H, Qin L, Bolatov K, Mambetov B T. 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. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 205: 10-21.
- [35] Brendel O, Iannetta P P M, Stewart D. A rapid and simple method to isolate pure alpha-cellulose. *Phytochemical Analysis*, 2000, 11(1): 7-10.
- [36] Crampton E W, Maynard L A. The relation of cellulose and lignin content to the nutritive value of animal feeds. *The Journal of Nutrition*, 1938, 15(4): 383-395.
- [37] Evans M N, Reichert B K, Kaplan A, Anchukaitis K J, Vaganov E A, Hughes M K, Cane M A. A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(G3): G03008.
- [38] Coplen T B. Discontinuance of SMOW and PDB. *Nature*, 1995, 375(6529): 285-285.
- [39] Leavitt S W, Lara A. South American tree rings show declining $\mu^{13}\text{C}$ trend. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1994, 46(2): 152-157.
- [40] Keeling C D, Mook W M, Tans P P. Recent trends in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric carbon dioxide. *Nature*, 1979, 277(5692): 121-123.
- [41] Campbell G S, Norman J M. *An Introduction to Environmental Biophysics*. 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 1998.
- [42] Speer J H. *Fundamentals of Tree-ring Research*. Tucson: The University of Arizona Press, 2010: 333-333.
- [43] McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7/8): 771-801.
- [44] McCarroll D, Pawellek F. Stable carbon isotope ratios of *Pinus sylvestris* from northern Finland and the potential for extracting a climate signal from long Fennoscandian chronologies. *The Holocene*, 2001, 11(5): 517-526.
- [45] Haupt M, Weigl M, Grabner M, Boettger T. A 400-year reconstruction of July relative air humidity for the Vienna region (eastern Austria) based on carbon and oxygen stable isotope ratios in tree-ring latewood cellulose of oaks (*Quercus petraea* Matt. Liebl.). *Climatic Change*, 2011, 105(1/2): 243-262.
- [46] Gagen M, McCarroll D, Edouard J L. Latewood width, maximum density, and stable carbon isotope ratios of pine as climate indicators in a dry subalpine environment, French Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2004, 36(2): 166-171.
- [47] 于贵瑞, 王秋凤. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学. 北京: 科学出版社, 2010.
- [48] Zhang R B, Yuan Y J, Gou X H, Zhang T W, Zou C, Ji C R, Fan Z A, Qin L, Shang H M, Li X J. 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. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 36-42.
- [59] Lipp J, Trimborn P, Fritz P, Moser H, Becker B, Frenzel B. Stable isotopes in tree ring cellulose and climatic change. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1991, 43(3): 322-330.
- [50] Treydte K S, Frank D C, Saurer M, Helle G, Schleser G H, Esper J. Impact of climate and CO₂ on a millennium-long tree-ring carbon isotope record. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(16): 4635-4647.
- [51] Konter O, Holzkämper S, Helle G, Büntgen U, Saurer M, Esper J. 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. *Chemical Geology*, 2014, 377: 12-19.