



吉林老白山鱼鳞云杉树轮蓝光强度和轮宽指数与气候响应关系随海拔变化的对比

苑丹阳^{1,2} 朱良军^{1,2} 张远东³ 李宗善⁴ 赵慧颖⁵ 王晓春^{1,2*}

¹东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040; ²东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040; ³中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; ⁴中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; ⁵黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030

摘要 树轮数据是晚全新世古气候研究中最重要代用指标。树轮参数各具优缺点, 蓝光强度(*BI*)是一种获取成本低廉的最大晚材密度(*MXD*)的光学替代参数, 其蓝色光反射率或强度最小值(256-*BI*)与相应的*MXD*值高度相关, 被很多的学者认为是树轮气候学研究中一个具有重要潜能的新兴参数。该研究以吉林老白山3个海拔(900、1 200和1 500 m)的鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)为例, 分析鱼鳞云杉的*BI*及轮宽指数(*RWI*)与气候因子的响应差异, 以期*BI*参数在树轮气候学的进一步应用提供参考。结果表明: 不同海拔鱼鳞云杉*BI*或*RWI*对气候的响应趋势基本一致。*BI*与温度主要呈正相关关系, 而*RWI*与温度主要呈负相关关系, 其中*BI*与当年夏季及生长季最高温度显著正相关, 而*RWI* (低、中海拔)与全年平均气温、当年生长季和全年最低温度显著负相关。*BI*与当年夏季标准化降水蒸散指数(*SPEI*)显著负相关, *RWI*与夏季*SPEI*负相关关系较弱或为正相关; *BI*和*RWI*几乎相反的生长-气候关系可能是早、晚材权衡关系的体现。研究区域鱼鳞云杉的*BI*参数可能与年轮宽度记录不同的气候信号, 在空间尺度上对于当年夏季降水、最高温度以及*SPEI*的响应好于传统宽度指标。*BI*与主要气候因子相关关系的时间稳定性好于*RWI*, 因此, *BI*在树轮气候学的研究中具有一定的应用潜能。

关键词 树木年轮; 蓝光强度; 鱼鳞云杉; 海拔; 气候响应

苑丹阳, 朱良军, 张远东, 李宗善, 赵慧颖, 王晓春 (2019). 吉林老白山鱼鳞云杉树轮蓝光强度和轮宽指数与气候响应关系随海拔变化的对比. 植物生态学报, 43, 1061–1078. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0257

Comparison of elevational changes in relationships of blue intensity and ring width index in *Picea jezoensis* with climatic responses in Laobai Mountain of Jilin, China

YUAN Dan-Yang^{1,2}, ZHU Liang-Jun^{1,2}, ZHANG Yuan-Dong³, LI Zong-Shan⁴, ZHAO Hui-Ying⁵, and WANG Xiao-Chun^{1,2*}

¹Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ³Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; ⁴State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; and ⁵Heilongjiang Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China

Abstract

Aims We aim to compare the climatic representativeness of blue intensity (*BI*) and ring width index (*RWI*) in *Picea jezoensis*, and to provide guidance for the further application of *BI* parameters in dendrochronology.

Methods A total of 120 tree-ring cores were extracted from *P. jezoensis* trees in the Laobai Mountain of Jilin Province. Using the methods of the growth-climate response function analysis and moving correlation analysis, the differences in the responses of *BI* and *RWI* to climate change in *P. jezoensis* along an elevational gradient (namely 900, 1 200 and 1 500 m) were investigated.

Important findings The *BI* (or *RWI*) in *P. jezoensis* trees at the three elevations had similar responses to climate. *BI* was predominantly and positively correlated with temperature, while *RWI* was predominantly and negatively correlated with temperature. *BI* was positively correlated with the maximum temperature in summer and growing season. *RWI* at the low or medium elevations was significantly and negatively correlated with the annual minimum

收稿日期Received: 2019-09-27 接受日期Accepted: 2019-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(41877426)和中央高校基本科研业务费专项资金(2572017DG02和2572019CP15)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41877426), and the Special Funds for Fundamental Science Research Operating Expenses of Central Universities (2572017DG02 and 2572019CP15).

* 通信作者Corresponding author (wangx@nefu.edu.cn)

and mean temperatures and the minimum temperature in growing season. *BI* was negatively correlated with the *SPEI* in summer, while *RWI* was weakly or positively correlated with *SPEI* in summer. This almost inverse growth-climate relationships by *BI* and *RWI* may reflect the trade-off between earlywood and latewood. *BI* and *RWI* in *P. jezoensis* in the study area may infer different climate signals. On the spatial scale, the responses of *BI* to summer precipitation, maximum temperature and *SPEI* were better than the traditional *RWI*. The temporal stability of the correlation of *BI* with main climatic factors was better than that of *RWI*. Therefore, *BI* has some potential application in studies of dendroclimatology.

Key words tree rings; blue intensity; *Picea jezoensis*; elevation; climate response

Yuan DY, Zhu LJ, Zhang YD, Li ZS, Zhao HY, Wang XC (2019). Comparison of elevational changes in relationships of blue intensity and ring width index in *Picea jezoensis* with climatic responses in Laobai Mountain of Jilin, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 1061–1078. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0257

在晚全新世古气候研究中, 树木年轮因连续性强、容易获取、分辨率高且能准确记录生境周围气候变化等特点, 成为应用最广泛且可靠的古气候代用资料之一(Rydval *et al.*, 2014; 朱良军等, 2017; Buckley *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2018)。树木年轮重建古气候时有多个参数, 每个参数都具有其特定的优点及限制性, 不同参数可能提供不同的气候信息(Rydval *et al.*, 2014; 朱良军等, 2017)。相对传统树轮宽度而言, 树轮稳定同位素可用于揭示植物生理反应及与水循环相关的若干信号, 其所指代的气候信息更为具体, 但样本处理所需时间及成本均远高于宽度。年轮密度主要与生长轮内细胞大小以及细胞壁厚度有关, 很大程度上受生长环境和气候条件影响, 其年际波动也具有指示生长环境及气候变化的潜力, 尤其是在高纬度地区或冷湿地区(Rydval *et al.*, 2014)。年轮密度(包含早材最小密度、早材平均密度、晚材平均密度和晚材最大密度等多个指标)是较为常用的一类环境或气候代用指标。相比传统树轮宽度而言, 年轮密度受生长季前期气候条件的影响很小, 多指标的年轮密度数据往往能够提供更丰富或更强的气候和环境信息, 实际研究中常能挖掘出更为有效的气候重建(Luckman & Wilson, 2005; Buntgen *et al.*, 2006; Rydval *et al.*, 2014)。最大晚材密度(*MXD*)是最常用的一种年轮密度指标(朱良军等, 2017; Buckley *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2018), 能够很好地反映生长季或夏季的温度变化; 就捕捉过去气候的能力而言, 年轮宽度被认为在低频领域优于*MXD*, 而*MXD*可以更好地反映年际变化(Luckman & Wilson, 2005; Buntgen *et al.*, 2006; Esper *et al.*, 2012; Rydval *et al.*, 2014; Buckley *et al.*, 2018)。然而, 测量年轮密度(或最大晚材密度)与测量年轮宽度相比操作复杂、仪器昂贵、耗时长, 需要花费

较多的人力与财力。世界上仅有少数树木年轮实验室具备开展年轮密度研究的能力, 严重限制有关年轮密度方面的研究。寻求更经济的指标来替代年轮密度(最大晚材密度)指标对未来树木年代学研究有积极影响。

近年来, 蓝光强度(*BI*)正在成为树轮气候学研究中重要的新兴参数(Rydval *et al.*, 2014; 段建平, 2015; Wilson *et al.*, 2017)。*BI*中最小蓝光反射率(256-*BI*)或强度最小值与相应的*MXD*值高度相关(McCarroll *et al.*, 2002)且具有成本低的优点, 被很多学者用作最大晚材密度的光学替代指标(Rydval *et al.*, 2014; Björklund *et al.*, 2015; Buckley *et al.*, 2018; Kaczka *et al.*, 2018)。*BI*测量是利用反射光图像分析法与图像分析技术对树轮样芯反射的亮度进行分析来获得年轮密度数据, 即树轮样芯反射亮度越大指示年轮密度越小, 而亮度值越小则指示密度值越大。最小蓝色反射率及蓝光最小值的获取过程是一种基于图像分析的测量手段, 依赖于复合木质素比其他木材结构成分更容易吸收紫外线的特性。Lange (1954)最早基于该理论运用紫外显微成像测定 *Picea sitchensis* 中的木质素含量。Yanosky 和 Robinove (1986)尝试利用树木年轮的数字图像及分析解剖学特征识别反射可见光替代最大晚材密度, 并认识到光反射率具有代替*MXD*的潜力。这之后, 晚材表面的反射光开始逐渐被应用于树轮气候学研究并进行夏季温度重建(Sheppard *et al.*, 1996)。Gindl 等(2000)进一步证实紫外显微成像测定的针叶树木质素含量(密度)与夏末秋初温度显著正相关。此外, McCarroll等(2002)确认欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)的最小蓝光强度可在一定程度上替代*MXD*。

目前, 有关*BI*的研究主要涉及其对温度、降水等气候因子的响应(Campbell *et al.*, 2011)、其与*MXD*

气候代表性差异(Kaczka *et al.*, 2018)、气候重建(Björklund *et al.*, 2014; Linderholm *et al.*, 2015)以及伪轮识别(Björklund *et al.*, 2013)等方面。多数研究将针叶树MXD及BI数据与温度等气候变量的响应关系进行比较, 得出BI在古气候研究中对MXD具有一定的替代作用(Campbell *et al.*, 2007, 2011), 且BI对于夏季温度的响应更为理想(Björklund *et al.*, 2013)。此后, 有关BI对气候因子的响应及基于BI重建古气候的研究逐渐兴起, BI数据主要用于重建夏季及生长季温度(Björklund *et al.*, 2015; Fuentes *et al.*, 2017), 少数用于评估水分限制(Babst *et al.*, 2016)。近年来部分研究表明热带针叶树种BI数据也可用于气候重建(Brookhouse & Graham, 2016; Buckley *et al.*, 2018)。

尽管国外已有相关研究证实BI在年轮气候学中具有较高的应用潜能, 但国内对BI参数的报道较少。已有关于BI的研究多集中于气候重建(Heeter *et al.*, 2019; Wilson *et al.*, 2019), 对于BI与轮宽指数(RWI)对气候响应差异的比较还较少(Nagavciuc *et al.*, 2019)。同时, 不同海拔树木生长在应对气候变化时会产生一定分异(Fritts, 1976)。同一区域对于鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)径向生长的研究结果表明, 在高海拔地区, 温度对树木径向生长主要呈促进作用, 而与低、中海拔的树木的径向生长主要呈负相

关关系(Zhu *et al.*, 2018)。本研究在比较鱼鳞云杉BI和RWI与气候因子的响应关系时, 也考虑了海拔梯度对二者与气候关系的影响。因此, 本研究以吉林老白山3个海拔(900、1 200及1 500 m)的鱼鳞云杉为例, 揭示年轮蓝光强度与轮宽指数的气候代表性差异, 进一步强调蓝光强度在我国树轮年代学中的应用前景并为其开展BI研究提供借鉴。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究地点位于吉林老白山(44.13° N, 127.99° E)。该区域地处吉林省敦化市黄泥河自然保护区, 西北与黑龙江五常市交界(图1)。研究区内的土壤为深棕色森林土壤, 垂直植被景观带明显, 高海拔植被主要由兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)和偃松(*Pinus pumila*)构成、中高海拔以岳桦(*Betula ermanii*)和鱼鳞云杉为主, 中低海拔主要森林类型为红松(*Pinus koraiensis*)针阔混交林, 主要由以红松、鱼鳞云杉、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、硕桦(*Betula costata*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木槭(*Acer mono*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)及大青杨(*Populus ussuriensis*)等组成。

研究区气候属于典型的温带大陆性季风气候, 具有漫长寒冷的冬季和短暂多雨的夏季。年平均气

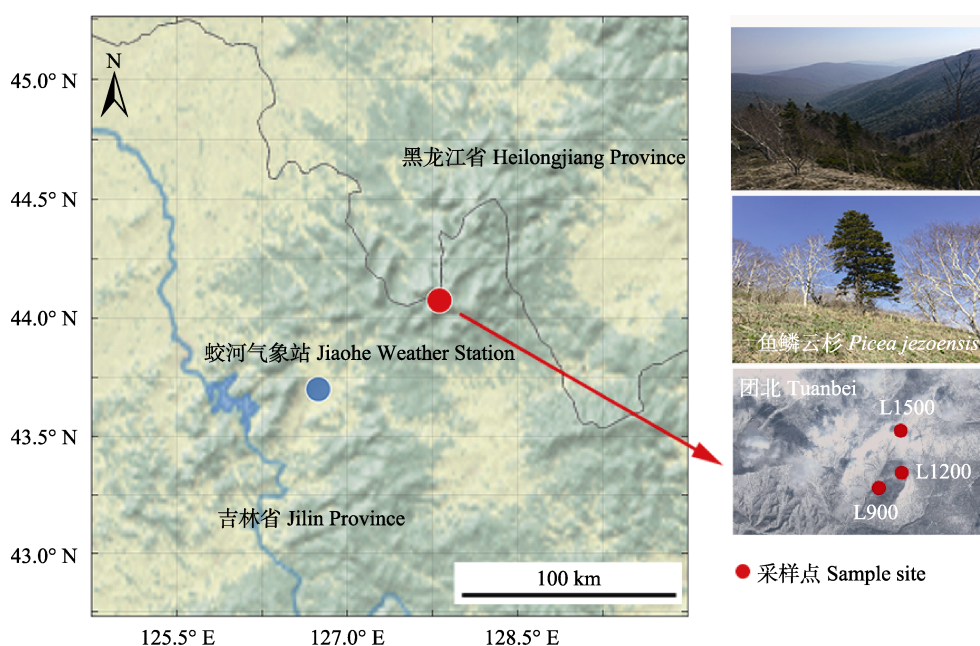


图1 老白山研究区采样点及气象站分布位置。L900, 低海拔; L1200, 中海拔; L1500, 高海拔。

Fig. 1 Locations of sampling sites and meteorological station in Laobai Mountain. L900, low elevation; L1200, middle elevation; L1500, high elevation.

温3.2℃左右, 年降水量623 mm, 1和7月分别是最冷和最温暖的月份, 80%以上的年降水量集中在5至9月(图2)。

1.2 样品采集及预处理

鱼鳞云杉是一种长寿、浅根且耐阴的树种, 本研究在老白山按海拔梯度设置采3个采样点, 低、中、高海拔分别设置为908 m、1 194 m和1 506 m, 相对应代码分别为L900、L1200和L1500。2016年7月, 在吉林老白山地区按预设海拔梯度选择人为干扰较小的区域进行树木年轮样品采集。挑选生长良好且径级较大的鱼鳞云杉作为取样目标, 利用生长锥(直径5.15 mm)于胸高处(距地面1.3 m)钻取树木年轮样芯。每个海拔共采集20株树, 每株树从南北两个方向采集2个样芯。将所取样芯放入塑料管内, 并

对样芯进行编号, 同时记录每株树的生境。研究区林型为红松阔叶混交林(900 m)和鱼鳞云杉暗针叶林(1 200和1 500 m)。采样点信息详见表1。

将采集的样品带回实验室, 利用不锈钢棒及细线固定样品, 避免样品出现弯曲及变形, 之后将固定后的样品完全浸泡于丙酮(>99.5%)溶液(置于封口的容器内, 防止丙醇挥发)中72 h (Österreicher *et al.*, 2015; Wilson *et al.*, 2017), 用以消除样本中杂质及心材与边材的颜色差异, 因为这两种因素可能改变样本的反射特性从而降低BI的数据质量(Shepard & Wiedenhoef, 2007; Björklund *et al.*, 2014)。然后, 将样品置于通风干燥的室内, 促进丙酮和水分自然挥发; 避免潮湿环境下真菌及霉菌的生长导致的样本变质, 进而影响后期BI数据测定的准确性。

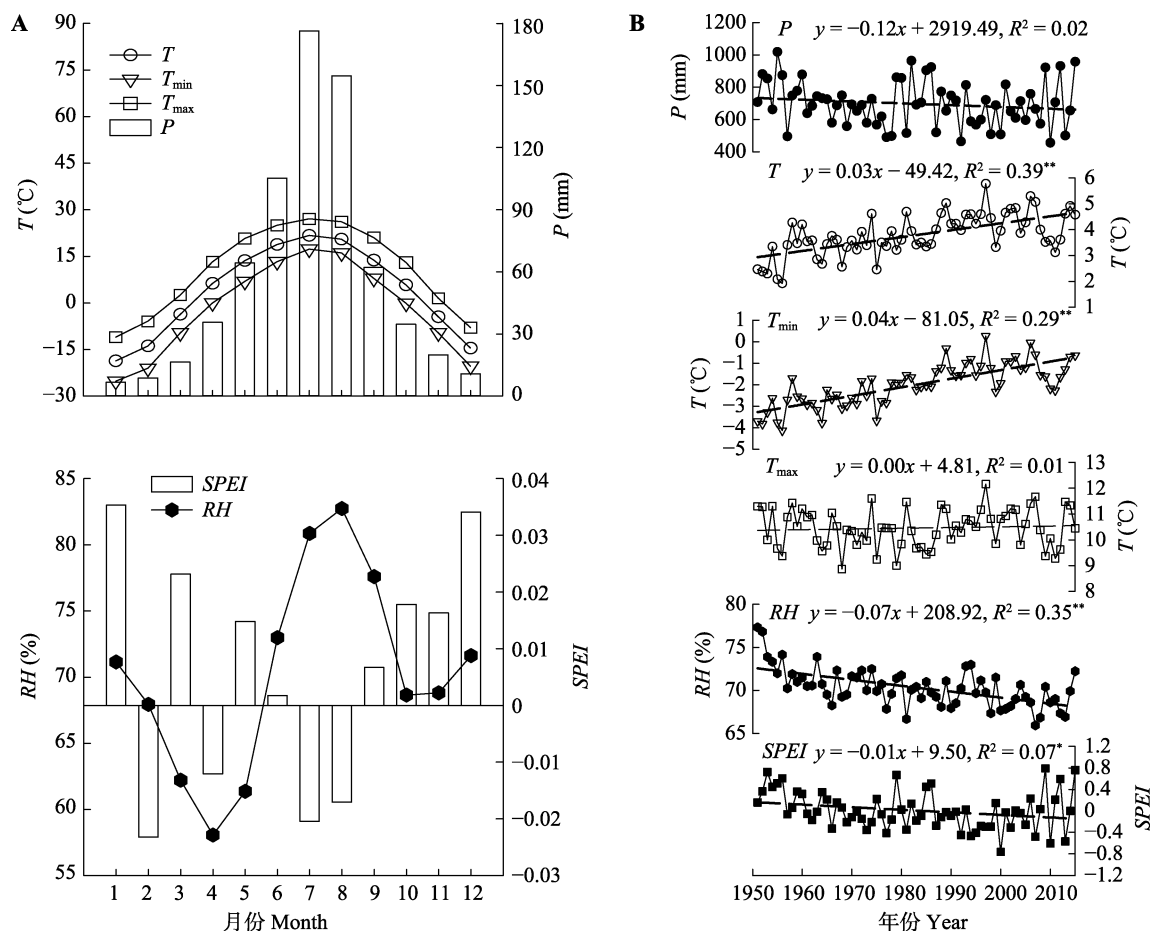


图2 蛟河1951–2015年月平均气温(T)、月平均最低气温(T_{\min})、月平均最高气温(T_{\max})、年降水量(P)、相对湿度(RH)和标准降水蒸腾指数($SPEI$)的变化趋势。**A**, 月变化趋势。**B**, 年际变化趋势。*代表在0.05的水平上显著相关; **代表在0.01的水平上显著相关。短划线为气象资料的分段线性拟合趋势线。

Fig. 2 Trend of changes in mean monthly temperature (T), mean monthly minimum temperature (T_{\min}), mean monthly maximum temperature (T_{\max}), total precipitation (P), relative humidity (RH) and standardized precipitation evapotranspiration index ($SPEI$) in Jiaohe meteorological station during 1951–2015. **A**, Trend of monthly change. **B**, Trend of annual change. *, correlation is significant at the 0.05 level; **, correlation is significant at the 0.01 level. Dash is piecewise fitted linear regression line of the meteorological data.

表1 老白山鱼鳞云杉树轮样点及年表基本信息

Table 1 Information of the sampling sites and chronologies in *Picea jezoensis* in Laobai Mountain

样点编码 Site code	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	海拔 Altitude (m)	样本数 Core number	年表长度 Chronology length
L900	44.08°	128.03°	908	40	1801–2015
L1200	44.10°	128.05°	1 194	40	1670–2015
L1500	44.10°	128.05°	1 506	40	1794–2015

接着,按照国际树木年轮学标准方法,完成鱼鳞云杉年轮样品的固定、干燥、打磨等预处理。打磨时按照砂纸目数由低到高的次序逐级打磨,直到在体视解剖镜下能够清晰地分辨出管胞与年轮界限为止,并使样品表面平整以确保扫描过程中不失焦。

采用骨架图法在解剖镜下对每个样品进行交叉定年处理(Stokes & Smiley, 1968)。运用COFECHA程序对交叉定年及测量质量进行检验(Holmes, 1983),将与主序列相关性差或难以交叉定年的样芯剔除。用Epson V600扫描仪对定年后保留的样品进行扫描,扫描图片分辨率设置为2 400 dpi (Rydval *et al.*, 2014; Heeter *et al.*, 2019)。扫描过程中应尽可能避免环境中光污染,扫描图片保存为“JPEG”格式。利用Photoshop软件对每张扫描图像进行裁剪、旋转及分割处理,最终得到以样品编号命名的各个样芯的图像资料。

1.3 *BI*和*RWI*的测量及年表建立

目前,年轮的*BI*数据主要可利用WinDENDRO (<http://www.regentstruments.com>)及CooRecorder (<http://www.cybis.se/>)两种软件测量获得(Campbell *et al.*, 2007, 2011; Rydval *et al.*, 2014; Björklund *et al.*, 2015)。本研究采用CooRecorder 9.1完成样品年轮宽度及晚材*BI*的测量及提取。该测量软件通过计算放置的连续点距离得出年轮宽度值(图3),之后利用相同位置点生成晚材中原始年轮蓝光强度数据。

$$BI = X_i \times 100 \quad (1)$$

$$X_i = 2.56 - \text{Color}/100 \quad (2)$$

式中, i 为年数, X_i 为暗晚材在所有反射蓝光中所占的比值。Color为暗晚材*BI*值,即原始年轮蓝光强度值。

程序能够根据可调参数在每个点周围放置一个窗口(年轮框)用于分析反射光的蓝色分量,用于生成*BI*数据的调节参数为像素宽度(w)、像素深度(d)、点偏移程度(f)等(图3)。每一年的原始年轮蓝光强度值等同于当年暗晚材的平均值。原始年轮蓝光强度值的范围为1至256,值越小表示蓝光反射率越小;

反之,值越大表示蓝光反射率越大,所有蓝光均被反射时显示256(最小木质素含量),缺失环显示0值;最终蓝光强度值(*BI*)显示为256与原始年轮蓝光强度值的差值,*BI*与*RWI*数据测量的可视化及结果输出均由CDendro 9.1程序进行(Rydval *et al.*, 2014; Babst *et al.*, 2016; Buckley *et al.*, 2018)。

采用保守的负指数函数进行去趋势,剔除树龄及其他非气候因素导致的趋势(Briffa & Melvin, 2010),对去除生长趋势的序列进行双权重平均法合成各海拔鱼鳞云杉的*BI*及*RWI*标准年表,年表建立由ARSTAN程序完成。各海拔*BI*与*RWI*年表长度与年份一致(表1),选取各年表的有效公共区间(1801–2015),最终建立3个海拔的*BI*及*RWI*的6个标准年表以用于后续分析(图4)。

1.4 气象资料与统计分析

气象数据由中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)及荷兰皇家气象研究所网站(<http://climexp.knmi.nl>)下载。本研究选取距离采样点最近的蛟河气象站(43.12° N, 127.55° E, 295 m)的气象资料用于年轮-气候分析。气候要素包含1951–2015年月平均气温(T)、月平均最高气温(T_{\max})、月平均最低气温(T_{\min})、月平均相对湿度(RH)和降水量(P)。另外,利用气象站的平均气温及降水数据计算标准化降水蒸散指数(*SPET*)(Vicent-Seerrano *et al.*, 2010)。

利用相关分析评估月与季节气候对鱼鳞云杉年轮蓝光强度及年轮宽度指数年轮宽度指数的影响,对比两者对气候因子的响应。考虑到上一年气候对鱼鳞云杉当年生长的影响,选择上一年9月到当年10月(共计14个月)作为相关分析窗口。将季节定义如下:春季(当年3–5月, SPR);夏季(当年6–8月, SUM);秋季(当年9–11月, AUT);当年生长季(当年5–10月, GS);全年(上一年9月至当年10月, AN)。采用滑动相关分析(窗口为20年,每次滑动1年),检测*BI*与*RWI*与主要季节各气候因子关系的时间稳定性,判断二者用作气候重建代用指标的可适性。基于荷

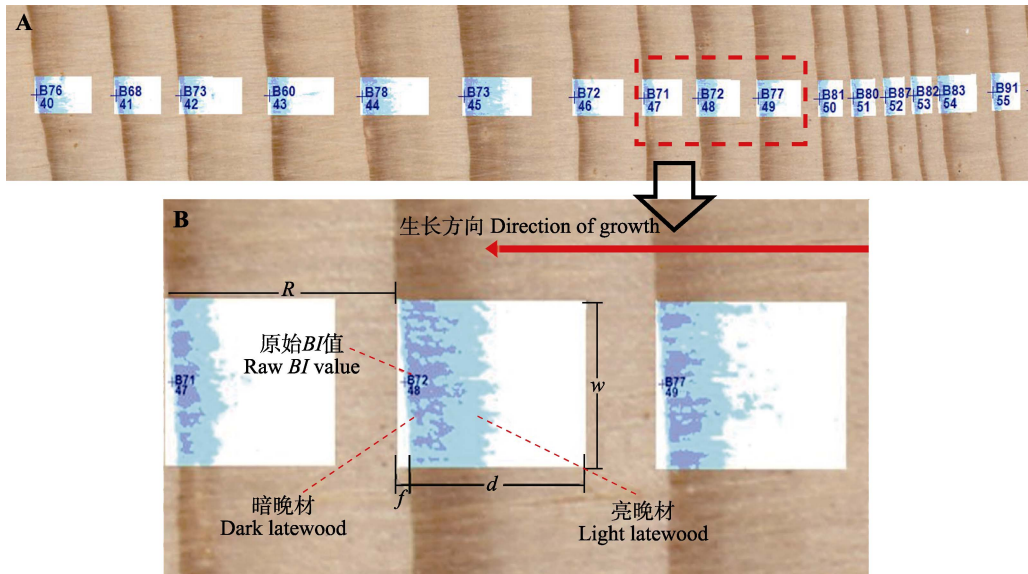


图3 老白山鱼鳞云杉年轮蓝光强度(BI)及年轮宽度的测量。A, Coorecorder软件生成窗口。B, 测量过程详解。 d , 像素深度; f , 点偏移度; R , 年轮宽度; w , 像素宽度。

Fig. 3 Measurement of blue intensity (BI) and ring width in *Picea jezoensis* in Laobai Mountain. A, Coorecorder blue intensity generation window. B, Detailed measurement process. d , depth; f , offset; R , ring width; w , width.

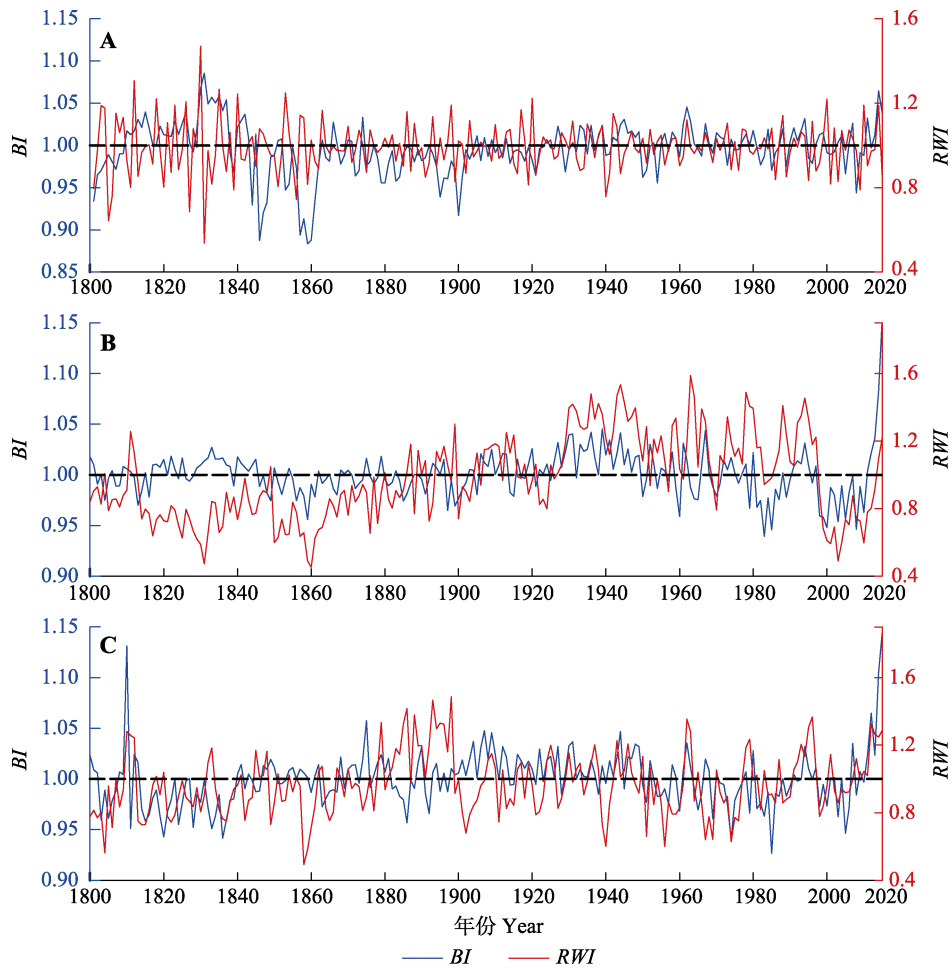


图4 近200年老白山不同海拔鱼鳞云杉年轮蓝光强度(BI)及轮宽指数(RWI)变化。A, 低海拔。B, 中海拔。C, 高海拔。
Fig. 4 Variation in the blue intensity (BI) and ring width index (RWI) in *Picea jezoensis* at different elevations in Laibai Mountain over the recent 200 years. A, Low elevation. B, Middle elevation. C, High elevation.

兰皇家气象研究所网站上的空间相关分析评估BI及RWI对主要气候因子响应的空间代表性。该网站空间相关分析的操作步骤为: 登录网站后注册或登录, 之后上传BI或RWI数据, 再把序列重新分为12月的序列, 选择“correlate with a field”, 再选气候变量、地理区域、时间、月份、显著水平等, 再点击“correlation”即可获得空间相关分析结果。利用SPSS软件完成所有统计分析, 用SigmaPlot、Excel等软件进行图表制作。

2 研究结果

2.1 不同海拔鱼鳞云杉BI与RWI的关系

不同海拔(900、1 200及1 500 m)鱼鳞云杉的3个BI年表存在高度的一致性(表2; 图4), 同时鱼鳞云杉的中海拔及高海拔RWI之间存在高度的一致性。整体而言, BI的变化幅度略低于RWI (图4)。同海拔鱼鳞云杉BI与RWI间均呈正相关关系, 中、高海拔正相关性显著($p < 0.05$)(表2)。

2.2 BI和RWI与区域气候的关系

低、中海拔BI及RWI与降水负相关的月份居多, 其中低海拔BI与当年8月降水显著负相关($p < 0.05$), 而低海拔RWI与当年7月降水显著正相关(图5A)。高海拔BI及RWI与各月降水的相关性大致相同, BI达到显著正相关的月份略多(当年2、9月), 而RWI达到显著负相关的月份略多(当年3、6月)(图5A)。

低海拔BI与相对湿度(RH)整体负相关而低海拔RWI与RH整体正相关, 但均未达到显著水平。中海拔BI和RWI均与多个月份RH正相关, RWI与其达到显著水平的月份居多(上一年9、12月, 当年1、2和

10月); 而中海拔BI与当年7月RH显著负相关。高海拔RWI与当年6月RH显著负相关(图5B)。

低、中、高海拔BI与月平均气温整体呈正相关关系, 中海拔BI与当年7月平均气温及高海拔BI与当年6–7月平均气温显著正相关(图5C)。低、中海拔RWI与平均气温主要呈负相关关系, 低海拔RWI与其在上一年9–10月及当年2、9月显著负相关, 中海拔RWI与其在上一年9–10月和12月及当年1–5月(除3月)和8月显著负相关。高海拔RWI与当年6月平均气温显著正相关(图5C)。

3个海拔BI和RWI与月平均最低气温的相关性整体趋势与月平均气温一致, 低、中海拔RWI与月最低气温显著负相关的月份较平均气温略有增加(图5D)。

3个海拔BI与月平均最高气温整体呈正相关关系, 而RWI年表与月最高气温整体呈负相关关系, 其中低海拔BI与当年7月最高气温, 中海拔BI与当年7、8月最高气温及高海拔BI与当年6–8月最高气温显著正相关; 低海拔RWI与上一年9月和当年2、10月最高气温及中海拔RWI与上一年9月和当年4、9月最高气温显著负相关, 而高海拔RWI与当年6月最高气温显著正相关(图5E)。

3个海拔BI和RWI与SPEI的相关性整体趋势与降水基本一致(图5F)。

通过低、中、高BI和RWI鱼鳞云杉年表与就近的蛟河气象站季节气候因子的相关分析发现(图6), 中海拔RWI与当年秋季降水量显著正相关, 高海拔BI与当年夏季降水量显著负相关(图6A)。中海拔RWI与秋季及年相对湿度显著正相关(图6B)。低、中海拔BI (正相关)及RWI (负相关)与温度因子具有几乎相反的相关关系, 低海拔BI与夏季平均气温显著正相关; 低海拔RWI与秋季和年平均气温及中海拔RWI与当年春季和年平均气温均显著负相关(图6C)。高海拔BI及RWI均与温度因子主要呈正相关关系, 其中BI与最高气温显著正相关的季节较多(当年夏季、生长季和全年)(图6E), 而RWI与低温显著正相关的季节较多(当年秋季、生长季和全年)(图6D)。就SPEI而言, 3个海拔BI均与夏季SPEI显著负相关, 3个海拔RWI中只有中海拔RWI与秋季SPEI显著正相关(图6F)。

2.3 BI和RWI年表与夏季气候关系的时间稳定性

低海拔BI与当年夏季降水量的负相关性逐渐减

表2 老白山不同海拔鱼鳞云杉年轮宽度与年轮蓝光强度标准年表相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the standard chronologies of blue intensity (BI) and ring width index (RWI) at low (L), middle (M) and high (H) elevations in *Picea jezoensis* in Laobai Mountain

	L-BI	L-RWI	M-BI	M-RWI	H-BI
L-RWI	0.15				
M-BI	0.49**	-0.28**			
M-RWI	0.24**	0.21*	0.39**		
H-BI	0.42**	-0.40**	0.77**	0.14	
H-RWI	0.16	-0.05	0.21*	0.35**	0.40**

L-BI, 低海拔年轮蓝光强度; L-RWI, 低海拔年轮宽度指数; M-BI, 中海拔年轮蓝光强度; M-RWI, 中海拔年轮宽度指数; H-BI, 高海拔年轮蓝光强度; H-RWI, 高海拔年轮宽度指数。*代表在0.05的水平上显著相关; **代表在0.01的水平上显著相关。

*, the correlation is significant at the 0.05 level; **, the correlation is significant at the 0.01 level.

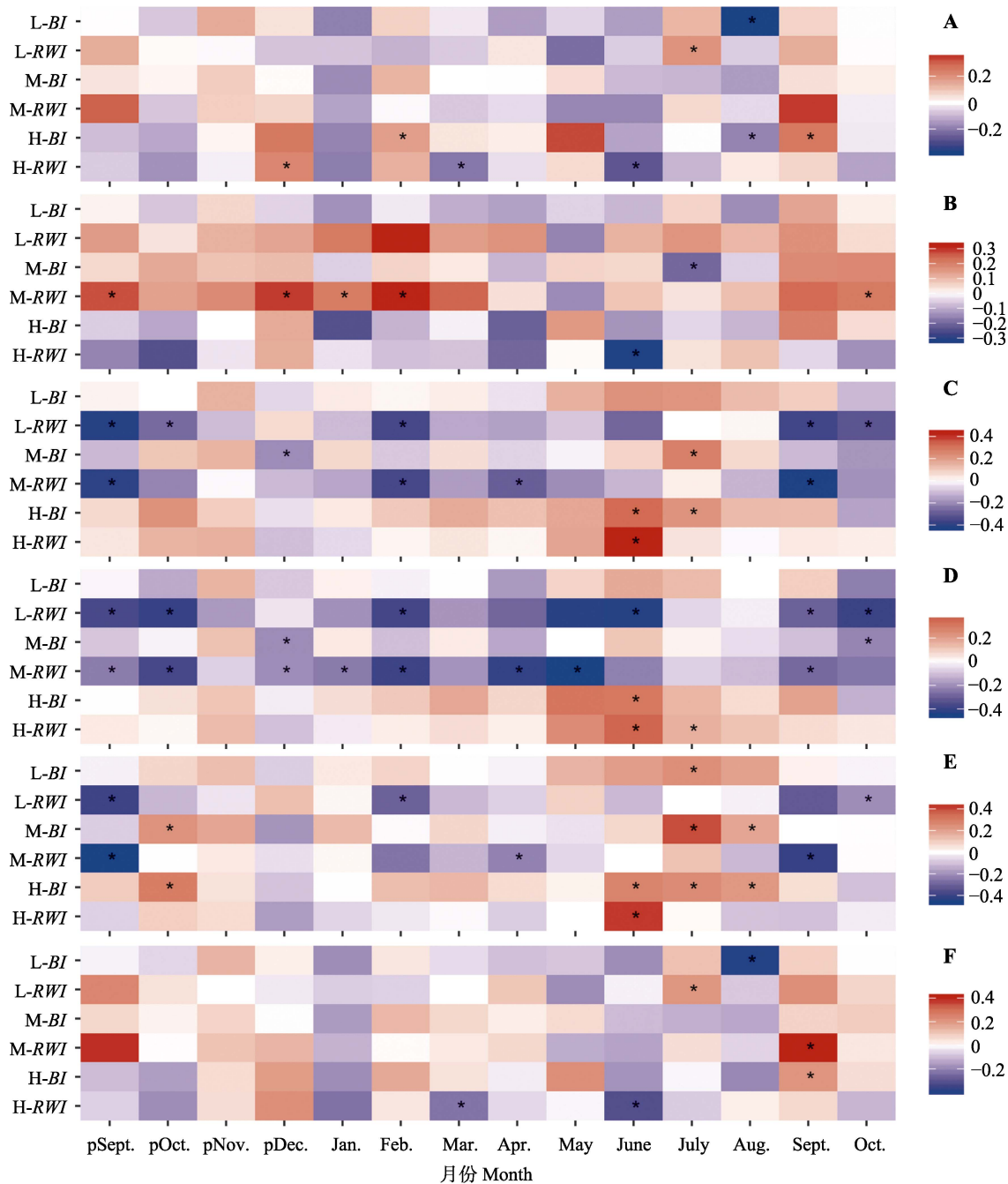


图5 老白山低(L)、中(M)、高(H)海拔鱼鳞云杉年轮蓝光强度(BI)与年轮宽度指数(RWI)标准年表及两者与月气候因子的相关系数。A, 降水量。B, 相对湿度。C, 月平均气温。D, 月平均最低气温。E, 月平均最高气温。F, 标准降水蒸腾指数。p, 上一年; *, 在0.05的水平上显著相关。

Fig. 5 Standard chronologies of blue intensity (BI) and ring width index (RWI) in *Picea jezoensis* and their correlation coefficients with monthly climatic factors at low (L), middle (M) and high (H) elevations in Laobai Mountain. A, Precipitation. B, Relative humidity. C, Mean monthly temperature. D, Minimum mean monthly temperature. E, Maximum mean monthly temperature. F, Standardized precipitation evapotranspiration index. p, previous year; *, the correlation is significant at the 0.05 level.

弱, 在最后10年表现出增强趋势; 低海拔RWI与当年夏季降水量由负相关、正相关、负相关再变为正相关关系(图7A)。中海拔BI与当年夏季降水量的负相关性先增强($p < 0.05$)后减弱($p > 0.05$), RWI与当年夏季降水量的相关性由负相关、正相关再变为负

相关关系, 两者在后10年均有变为正相关关系的趋势(图7B)。高海拔BI与当年夏季降水整体呈负相关关系; 高海拔RWI与当年夏季降水量由显著负相关、正相关再变为负相关关系(图7C)。3个海拔BI和RWI与夏季降水的滑动相关系数均具有显著差异,

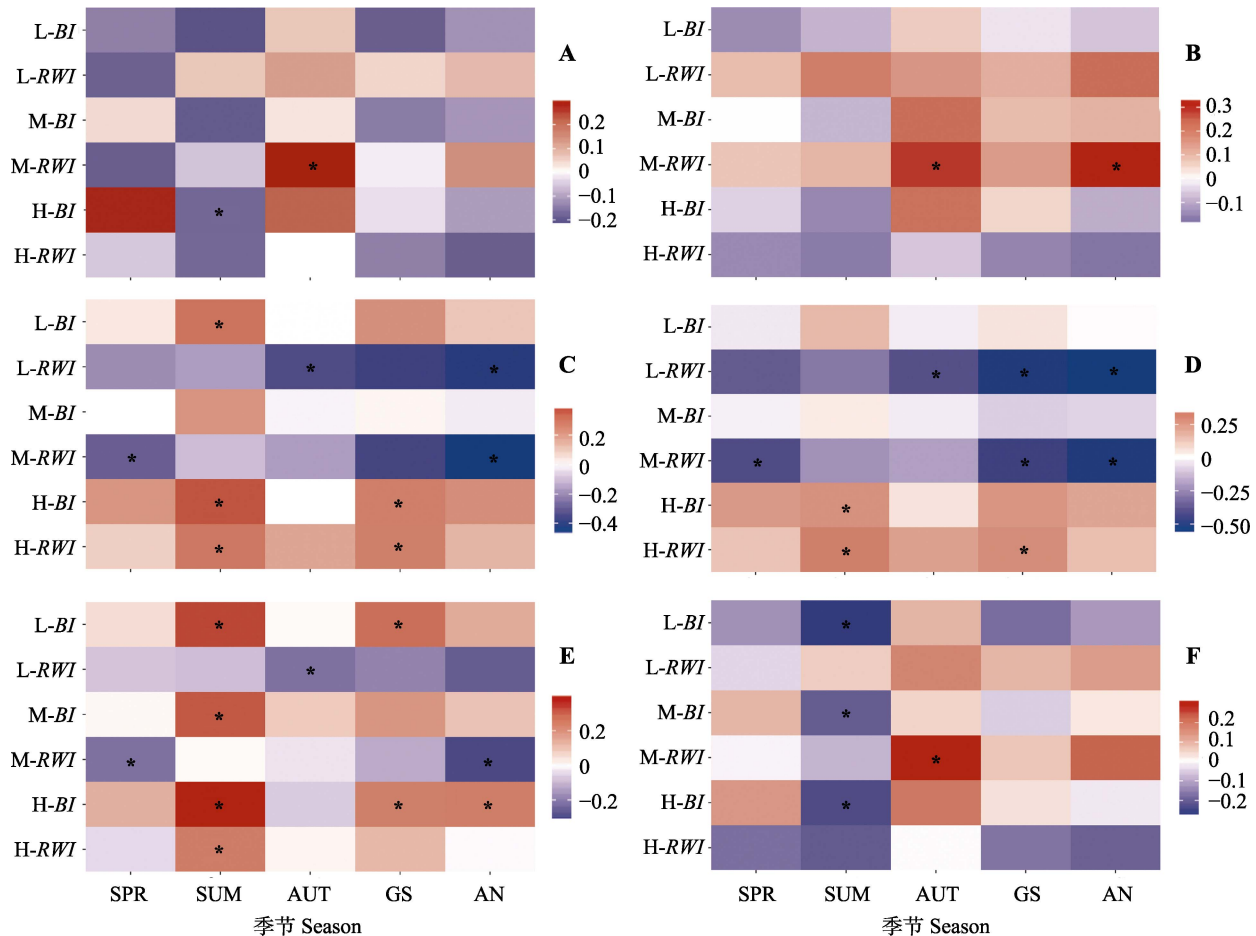


图6 老白山低(L)、中(M)、高(H)海拔云杉年轮蓝光强度(BI)与年轮宽度指数(RWI)年表及两者与季节气候因子的相关系数。A, 降水量。B, 相对湿度。C, 季平均气温。D, 季平均最低气温。E, 季平均最高气温。F, 标准降水蒸腾指数。*代表在0.05的水平上显著相关。SPR, 春季; SUM, 夏季; AUT, 秋季; GS, 生长季; AN, 全年。

Fig. 6 Standard chronologies of blue intensity (BI) and ring width index (RWI) in *Picea jezoensis* and their correlation coefficients with seasonal climatic factors at low (L), middle (M) and high (H) elevations in Laobai Mountain. A, Precipitation. B, Relative humidity. C, Mean seasonal temperature. D, Minimum mean seasonal temperature. E, Maximum mean seasonal temperature. F, Standardized precipitation evapotranspiration index. *, the correlation is significant at the 0.05 level. SPR, spring; SUM, summer; AUT, autumn; GS, growing season; AN, annual.

其中低、高海拔BI与夏季降水量的稳定性高于RWI, 中海拔前者略低于后者(图7)。

低海拔BI与当年夏季最高气温由显著负相关($p < 0.05$)变为正相关关系; 低海拔RWI与当年夏季最高气温由显著负相关、正相关、负相关再变为正相关关系(图8A)。中海拔BI与当年夏季最高气温的负相关性先增强后减弱, 在后10年有转化为正相关的趋势; RWI与当年夏季最高气温的正相关性先增强, 在1987–1997年达到显著水平, 之后正相关性逐渐减弱为负相关关系, 后又转化为正相关关系(图8B)。高海拔BI与当年夏季最高气温在1970–1991, 1974–1995年不显著正相关($p > 0.05$), 在其他阶段主要呈负相关关系, 后10年有转化为正相关的趋势; 高海拔RWI与当年夏季最高气温的正相关性先减弱

后增强, 在1977–1998年显著正相关(图8C)。3个海拔BI和RWI与夏季最高温度的滑动相关系数均具有显著差异, 中、高海拔BI与夏季最高气温的稳定性高于RWI, 低海拔前者略低于后者(图8)。

低海拔BI与当年夏季SPEI整体呈负相关关系; 低海拔RWI与当年夏季SPEI由显著负相关、正相关、负相关再变为正相关(图9A)。中海拔BI与当年夏季SPEI的负相关性先增强后减弱, 在后10年有转化为正相关的趋势; 中海拔RWI与当年夏季SPEI由显著负相关、正相关再变为负相关关系(图9B)。高海拔BI与当年夏季SPEI整体呈负相关关系, 在1952–1973年显著负相关; 高海拔RWI与当年夏季SPEI由显著负相关、正相关再变为负相关关系(图9C)。3个海拔BI和RWI与夏季SPEI滑动相关系数的标准偏

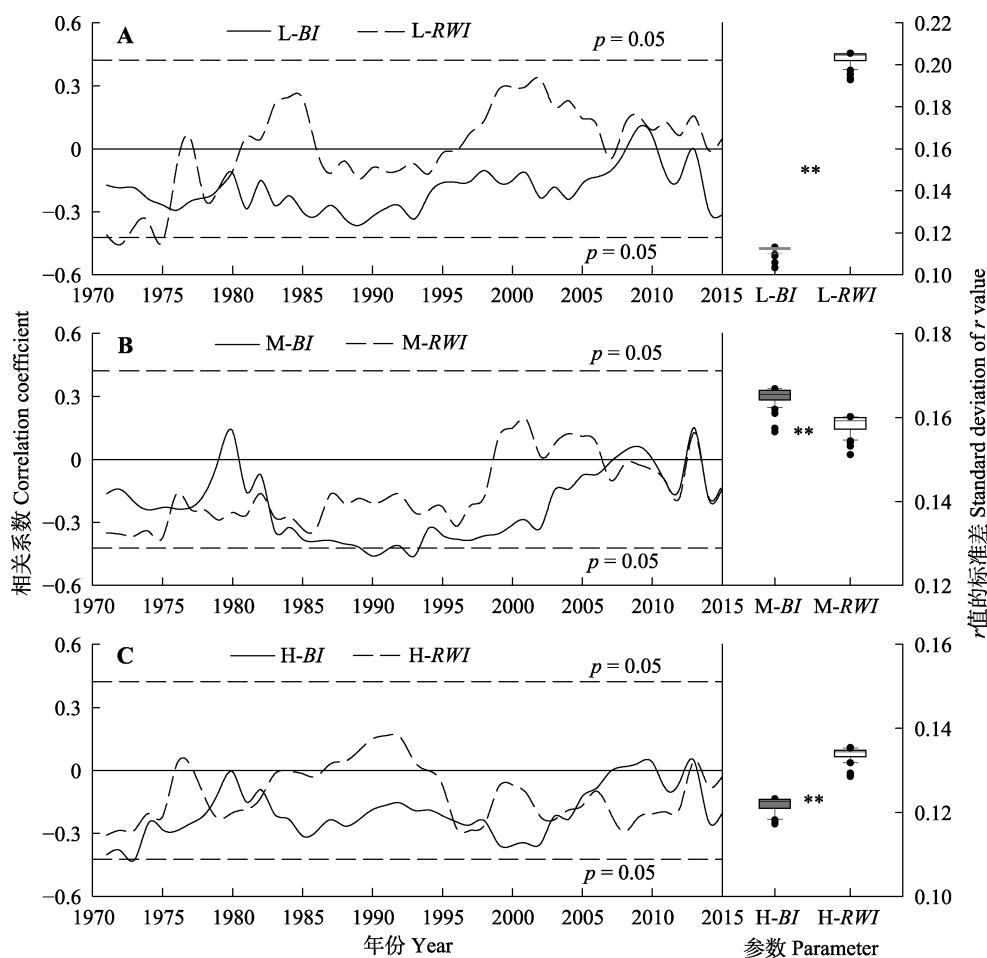


图7 老白山低(L)(A)、中(M)(B)、高(H)(C)海拔鱼鳞云杉年轮蓝光强度(BI)年表和年轮宽度指数(RWI)年表与当年夏季降水量(P)的滑动相关及滑动相关系数的标准偏差。虚线表示95%置信水平; r , 滑动相关系数; **, 在0.01的水平上显著相关。

Fig. 7 Moving correlation analysis between the standard chronologies of blue intensity (BI) and ring width index (RWI) in *Picea jezoensis* and summer precipitation at low (L)(A), middle (M)(B) and high (H)(C) elevations in Laobai Mountain and the standard deviations of the moving correlation coefficients. Dotted line represents 95% confidence level; r , moving correlation coefficient; **, the correlation is significant at the 0.01 level.

差均具有显著差异, 不同海拔BI与夏季SPEI的稳定性均显著高于RWI (也就是BI与SPEI的相关系数标准偏差显著低于RWI)(图9)。

2.4 BI和RWI年表对区域气候的空间代表性

以3个海拔鱼鳞云杉的BI及RWI与夏季气候因子的关系为例, 探讨两类年表在空间尺度上的气候代表性, 结果表明(图10): 3个海拔的BI与采样点周边区域夏季降水量呈显著负相关关系, 而3个海拔RWI与采样点周边夏季降水量相关性显著。3个海拔BI均表现出与研究区周围夏季最高气温显著正相关, 尤其高海拔BI。3个海拔RWI均与研究区周边夏季最高气温相关性不显著。尽管低、中海拔RWI在空间范围上与大兴安岭地区气温显著负相关, 高海拔RWI与朝鲜周边夏季最高气温呈显著正相关关系; 但因这些地区距研究区域较远, 其空间代表性可信

度较低。此外, 3个海拔BI与采样区周围夏季SPEI显著负相关; 低海拔BI还与俄罗斯远东地区夏季SPEI显著正相关, 但因距研究区域较远, 可信度低。3个海拔RWI均与研究区周边当年夏季SPEI相关性不显著。总之, 就上述3种气候因子而言, BI均比RWI具有更强的空间代表性, BI比RWI更具备用于气候重建的潜能。

3 讨论

3.1 BI所记录的气候信号

最高气温是限制老白山3个海拔鱼鳞云杉BI的主要气候因子, 其中BI与当年夏季及生长季最高气温均显著正相关($p < 0.05$)(图7), 这与前人在其他地区对部分针叶树的相关研究结果(Büntgen *et al.*, 2006, 2007; Björklund *et al.*, 2013; Dolgova, 2016;

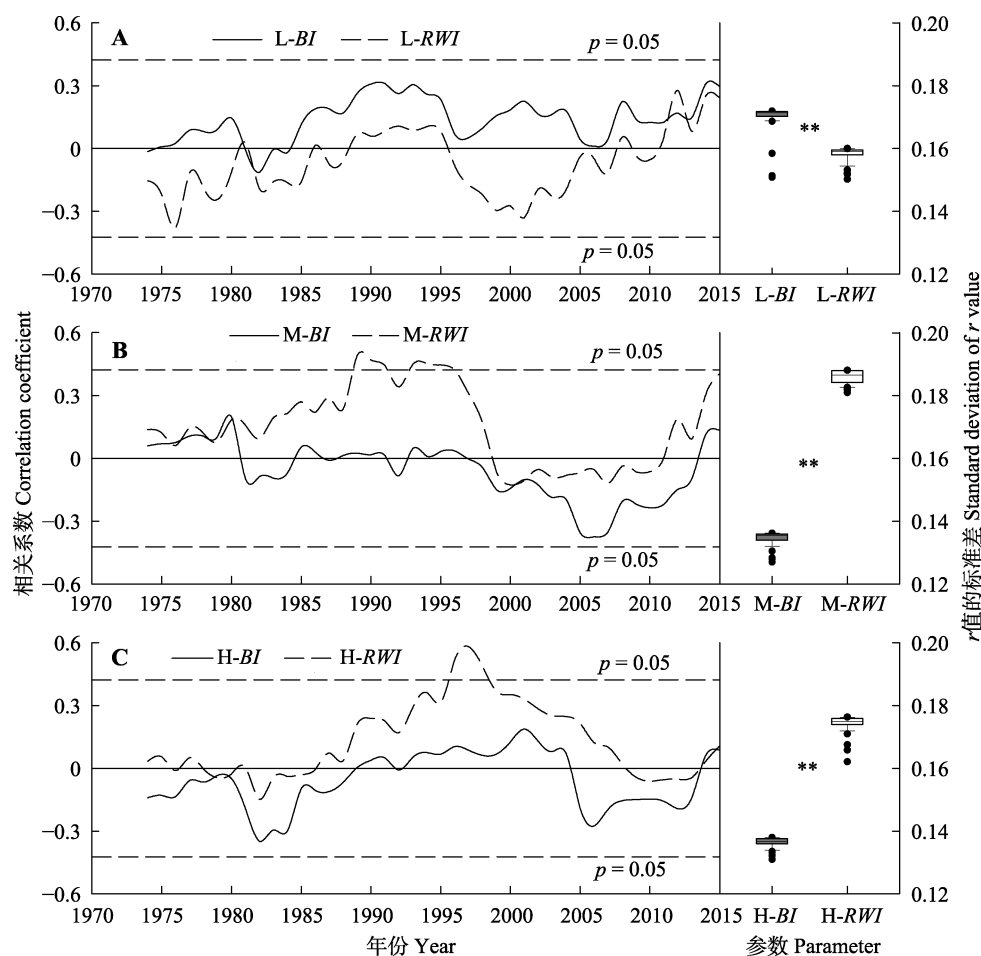


图8 老白山低(L)(A)、中(M)(B)、高(H)(C)海拔云杉年轮蓝光强度(BI)年表和年轮宽度指数(RWI)年表与当年夏季最高气温(T_{\max})的滑动相关及滑动相关系数的标准偏差。虚线表示95%置信水平; r , 滑动相关系数; **, 在0.01的水平上显著相关。

Fig. 8 Moving correlation analysis between the standard chronologies of blue intensity (BI) and ring width index (RWI) in *Picea jezoensis* and summer maximum temperature at low (L)(A), middle (M)(B) and high (H)(C) elevations in Laobai Mountain and the standard deviations of the moving correlation coefficients. Dotted line represents 95% confidence level; r , moving correlation coefficient; **, the correlation is significant at the 0.01 level.

Kaczka *et al.*, 2018)一致。老白山年平均气温 3.2°C , 且生长季的平均气温均高于 0°C , 在这种温度条件下, 较高的当年夏季及生长季最高气温有利于光合作用的进行。光合作用积累的同化产物随之增多, 促进树木晚材细胞壁的加厚及管胞的形成, 木质素的含量随之增加, 鱼鳞云杉的木质化程度呈增大的趋势(Fan *et al.*, 2009), 产生较小的最小蓝光反射率, 进而得到较大的BI值(Campbell *et al.*, 2011; Björklund *et al.*, 2013)。研究区年降水量623 mm, 属半湿润地区, 以往的多数研究表明生长在湿润、半湿润环境下大多数针叶树的年轮最大晚材密度, 对夏季气温的变化有较好的指示作用; 针叶树晚材细胞壁的合成可能直接取决于夏季气温的变化(王晓春等, 2009; Björklund *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2017)。BI与MXD的前期研究绝大多数基于针叶树管胞内木

质素含量与温度的关系(Chen *et al.*, 2012; Rydval *et al.*, 2014)。部分研究表明, 相对较低的气温抑制研究区域树木进行光合作用, 较高的气温促进其木质化; 高纬度或高海拔地区生长季温度低, 导致树木木质素含量较少, 形成MXD较小的年轮, 此时BI的最小蓝光反射率较高, 称之为“亮轮”。由于木质化基于细胞的形成, 当生长季温度突然降低到最佳水平以下时, 不仅会导致“亮轮”形成, 严重时因木质素断裂导致管胞凝固, 致使无法完成树木内部水分运输, 形成“霜轮”(Buckley *et al.*, 2018)。相反, 生长季温度较高时, 树木木质化的程度增强, 木质素含量增多, MXD增大, 最小蓝光反射率减小, BI增大。因此, 本研究得出的BI对夏季气温具有很好的响应验证了BI可对MXD在气候的指示作用上起到一定的替代作用。在生长季, 鱼鳞云杉的细胞壁逐渐木

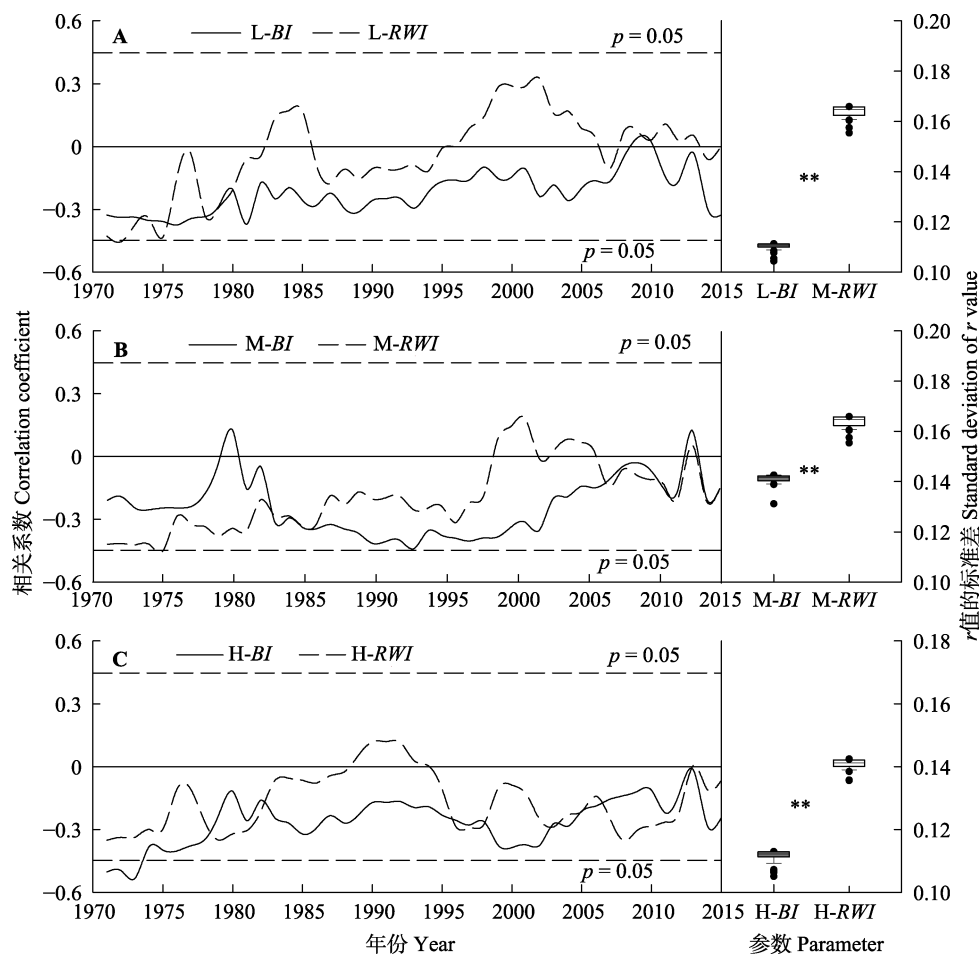


图9 老白山低(L)(A)、中(M)(B)、高(H)(C)海拔云杉年轮蓝光强度(BI)和年轮宽度指数(RWI)与当年夏季标准化降水蒸散指数(SPEI)的滑动相关及滑动相关系数的标准差。虚线表示95%置信水平; r : 滑动相关系数; **, 在0.01的水平上显著相关。

Fig. 9 Moving correlation analysis between the standard chronologies of blue intensity (BI) and ring width index (RWI) in *Picea jezoensis* and summer Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) at low (L)(A), middle (M)(B) and high (H)(C) elevations in Laobai Mountain and the standard deviations of the moving correlation coefficients. Dotted line represents 95% confidence level; r : moving correlation coefficient; **, the correlation is significant at the 0.01 level.

质化且管胞向成熟发育, 气温适当升高有利于生长季的延长, 促进光合作用的进行, 最终导致BI值增大 (Campbell *et al.*, 2007; Brookhouse & Graham, 2016)。

各海拔鱼鳞云杉BI与当年夏季SPEI均呈显著负相关关系($p < 0.05$), 也表明当年夏季温度与水分组合同样是限制鱼鳞云杉BI的关键因素。由于夏季气温持续升高, 当地大气和土壤中的含水量减少, 太阳辐射增强, 气候干燥多风, 此时土壤中的水分对树木生长起着极为关键的控制作用(陈峰等, 2017)。缺水时, 树木叶片萎蔫, 气孔关闭, CO_2 扩散阻抗增加, 光合作用受到明显抑制, 树木细胞的分裂、伸长都受到制约(张雨等, 2016)。严重干旱时, 细胞脱水, 液泡收缩, 对原生质产生一种向内的拉力, 使原生质和细胞壁均向内收缩, 在细胞壁上形成很多折叠, 细胞壁厚度增加, 导致木质素含量增加, 最小蓝光

反射率减少, BI值增大(Björklund *et al.*, 2014; Rydval *et al.*, 2014; Kaczka *et al.*, 2018)。反之, 当土壤、大气中相对湿度较大时, 树木细胞的分裂与伸长有充分的水分供应, 细胞个体大而细胞壁变薄, 木质素含量减少, 最小蓝光反射率增加, BI值减小(杨银科等, 2012; Björklund *et al.*, 2014)。

3个海拔鱼鳞云杉BI对气候的响应整体趋势基本一致, 但中、高海拔鱼鳞云杉BI的气候代表性明显好于低海拔, 尤其是高海拔鱼鳞云杉BI对夏季及当年生长季最高气温的记录作用, 不同海拔鱼鳞云杉BI对区域气候的空间代表性也证实了这一结果(图10)。这与Babst等(2016)对不同海拔黄松(*Pinus ponderosa*) BI的研究结果相似, 海拔较高的地点温度较低, 生长季略晚于海拔较低的地点, 即生长季相对缩短, 这最终将导致中、高海拔鱼鳞云杉BI对

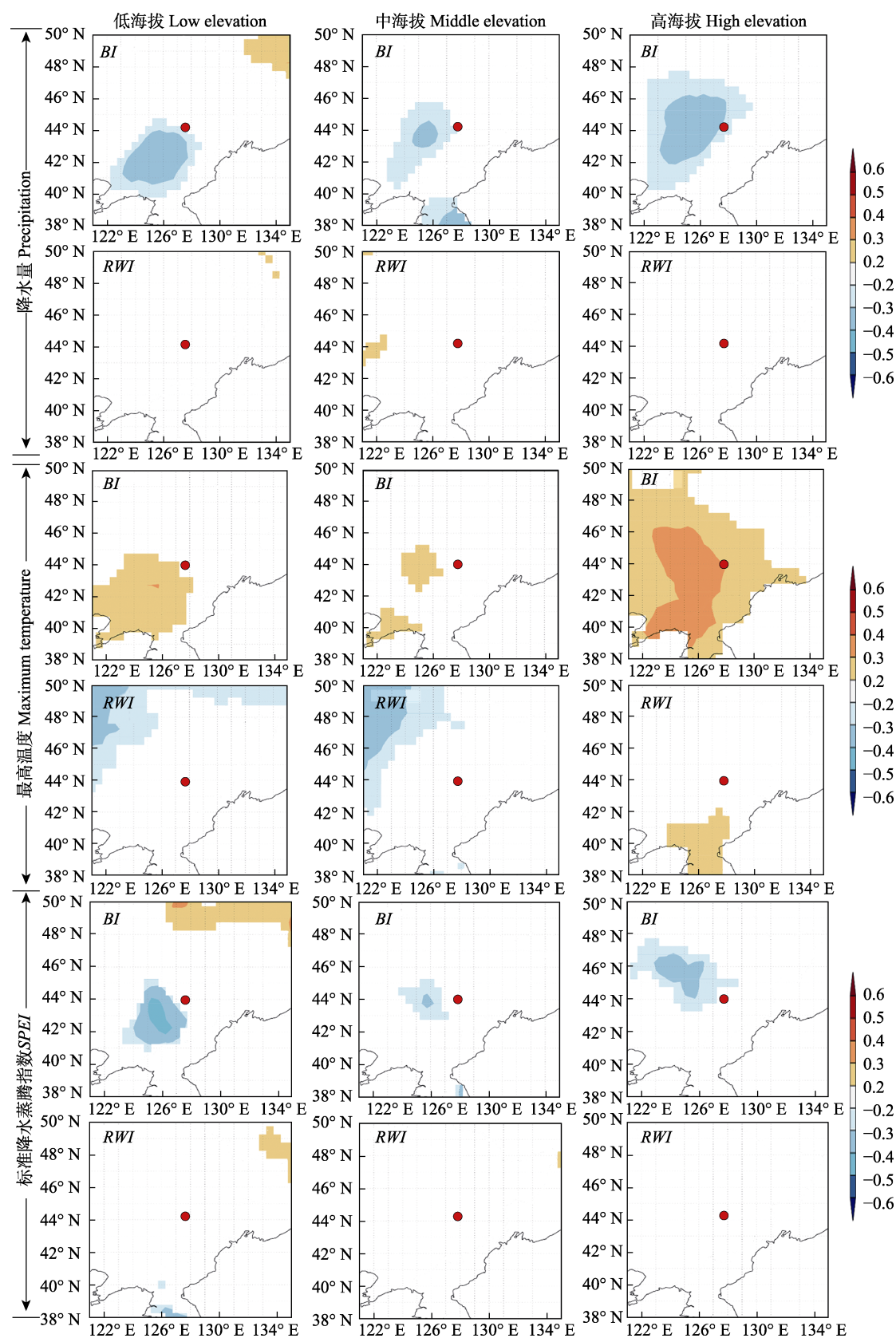


图10 老白山低、中、高海拔鱼鳞云杉年轮蓝光强度(BI)年表与年轮宽度指数(RWI)年表与当年气候因子空间相关关系。 $p < 0.01$ 的区域被显示, 红色区域为采样点。

Fig. 10 Correlation coefficients between average chronology of blue intensity (BI) and ring width index (RWI) in *Picea jezoensis* and summer climatic factors at low, middle and high elevations in Laobai Mountain. SPEI, Standard Precipitation Evapotranspiration Index. Correlation with the significance of $p > 0.01$ level was mask out; the red dot is the sample area.

夏季及生长季温度的敏感性增高(Hughes, 2001)。

3.2 *BI*与*RWI*的气候代表性差异

鱼鳞云杉*BI*和*RWI*主要受到温度条件的限制,水分条件对两者的限制作用较弱。低、中海拔*RWI*年表与月平均气温和月平均最低气温主要呈负相关关系,尤其是上一年9和10月及当年2和9月($p < 0.05$)。当上一年生长季末期气温较低时,鱼鳞云杉叶肉细胞中的原生质可能会产生脱水现象,同时还可能使土壤冻结造成根系的死亡,进而影响树木当年的光合作用、水分和养分的吸收等,从而导致窄轮的形成功(Wang *et al.*, 2017);同时冬季末期(当年2月)及当年生长季末期气温升高,树木的呼吸作用和蒸腾作用增强,不利于有机物质积累,降低鱼鳞云杉的生长量,即温度的升高会增加水分的胁迫作用,从而使两者呈现明显的负相关关系(Wang *et al.*, 2019)。高海拔*RWI*与生长季初期温度的显著正相关,表明升温可以促进高海拔鱼鳞云杉径向生长,从而扩大鱼鳞云杉的海拔分布范围(高露双等, 2011; 王守乐等, 2017)。月平均气温、月平均最低气温对各海拔*BI*则整体上表现出正效应,尤其是当年6月($p < 0.05$)。当年6月高温有利于细胞分裂、伸长及细胞壁加厚,尽早完成早材形成,为晚材形成提供更充足的时间,从而增加木质素含量导致最小蓝光反射率减小,*BI*值增大。而月最高气温对各海拔*BI*的促进作用较明显,尤其是6–8月,但这一阶段的月平均最高气温(月平均气温、月平均最低气温)对*RWI*表现为负相关(低、中海拔)或较弱的正相关(高海拔)关系,这与前人在长白山的研究结果(李广起等, 2011)一致,验证了Sidor等(2015)研究发现的升温有可能增加高海拔地区树木生长量,降低低海拔树木生长量的结果。*BI*对当年夏季(6–8月)最高气温的代表性要高于*RWI*,这与Wilson等(2017)利用*Tsuga mertensiana* *BI*及*RWI*数据重建夏季气候时所得出*BI*揭示温度的变化量高于*RWI*的研究结果相一致。Campbell等(2011)、Björklund等(2013, 2015)、Linderholm等(2015)和Fuentes等(2017)的研究均表明*BI*与夏季温度的响应关系要好于*RWI*,这些研究结果表明*BI*和*RWI*可能记录不同的气候信号(Björklund *et al.*, 2013)。同时,我们的结果鱼鳞云杉*BI*及*RWI*和最高气温响应关系的时间稳定性及空间代表性也印证了以上结论(图8, 图10)。

当年6和8月降水对各海拔鱼鳞云杉*BI*和*RWI*有

抑制作用,其中高海拔*RWI*与6月降水显著负相关,低、高海拔*BI*与8月降水显著负相关。高海拔降水量较多,一定程度上影响光照时间,导致太阳有效辐射减少,树木的净光合速率降低,进而抑制鱼鳞云杉径向生长,同时由于光合速率降低,细胞壁增厚减缓,木质素含量减少,最小蓝光反射率增加,*BI*值减小。而生长季初期(6月)降水增加容易在低海拔造成土壤大量积水,树木根部进行无氧呼吸,进而影响其对土壤养分的吸收,导致无法提供足够的养分供给光合作用,最终导致*BI*值减小(王守乐等, 2017)。空间相关结果显示鱼鳞云杉*BI*对于当年夏季(6–8月)降水代表性(负响应)好于*RWI*。同时,*BI*与当年夏季*SPEI*显著负相关($p < 0.05$),这与空间相关所显示的结果一致(图10);各海拔*BI*及*RWI*与当年秋季(9–11月)降水、相对湿度及*SPEI*主要表现为正相关关系,尤其是中海拔*RWI* ($p < 0.05$)。秋季是树木生长结束的时期,适量提高水热条件将延长其生长季,光合作用时间随之延长,进而增加*BI*及*RWI*值(高露双等, 2011)。

*RWI*同时受到上一年及当年气候因子的影响,而*BI*则主要受到当年气候因子的影响,这是由于*RWI*同时包含早晚材,表征的是整个一年或者生长季加上前期气候影响的总效果,而*MXD*及*BI*反应生长季或其中某个时段的气候因子状况;因此,*RWI*对气候变化的响应会出现“滞后效应”,即上一年气候也可能对当年树木*RWI*的生长变化产生影响(王婷等, 2003)。*BI*所指代的为最大晚材密度,树木晚材的形成时间主要集中在当年6–11月,在11月中旬,晚材结束生长,形成层停止分裂(张雨等, 2016),因此*BI*主要反映当年的气候状况。在研究结果中,*BI*作为*MXD*的潜在替代品,捕捉过去气候的能力在中高频领域优于*RWI*,这与其他研究结果(Buckley *et al.*, 2018; Kaczka *et al.*, 2018)类似。

通过对比鱼鳞云杉*BI*与*RWI*对气候的代表性,发现*BI*和*RWI*与主要气候因子关系大部分完全相反,这可能是鱼鳞云杉在径向生长过程中早、晚材分配权衡关系的体现。每年径向生长宽度取决于早材和晚材的共同作用,早材对于年轮宽窄的决定性作用较大,晚材对年轮宽度决定性作用较小。*BI*主要反映晚材的作用,文中所得出的*BI*和*RWI*与温度、降水的关系几乎相反,我们猜测主要是年轮宽度中早晚材生长过程中相互权衡所造成的结果。这一猜测是

否可靠, 还有待进一步的研究验证。

3.3 BI应用前景及注意事项

中、高海拔BI与夏季降水量、最高温度以及SPEI关系的时间稳定性好于RWI。3个海拔BI年表与夏季降水量及SPEI的滑动相关系数维持在较为稳定的负相关关系, 与最高气温的相关性也稳定在负相关及较弱的正相关关系之间。水分因素对3个海拔的RWI年表的限制作用逐渐增大, 表现为滑动相关分析中RWI与夏季降水量及SPEI的相关系数呈负相关关系减弱或由负相关转正相关关系的变化趋势(图7, 图9), 这与李广起等(2011)对海拔分布上限鱼鳞云杉的研究结果一致。随着近几十年温度的升高, 土壤水分的蒸散以及植物体的蒸腾作用都会加快, 原本满足径向生长需求的水分条件有可能变成限制因素(高露双等, 2011; 李广起等, 2011; 于健等, 2017); 同时, 干旱胁迫增强造成的水分亏缺会导致该限制作用增强。中、高海拔RWI与夏季最高温度的滑动相关系数(图9)主要呈现“中间高两头低”现象, 即在水分充足时段升温有利于径向生长, 但在水分为生长限制因素时, 升温会加剧暖干化作用, 从而使RWI与高温呈现明显的负相关关系。这与其他对于鱼鳞云杉的研究结果(李广起等, 2011; 于健等, 2017)一致, 即升温造成的水分胁迫是造成鱼鳞云杉径向生长与温度上升趋势相背离的最主要原因。鱼鳞云杉BI与夏季气候因子相关系数的时间稳定性较高, 而RWI与气候因子则易出现“分异现象”, 说明BI较传统宽度而言更适用于夏季气候重建(Fan *et al.*, 2009; Björklund *et al.*, 2014, 2015; Linderholm *et al.*, 2015; Dolgova, 2016)。此外, 3个海拔BI均比RWI对主要气候因子具有更强的空间代表性(图10), 这与前人对于BI及RWI的空间代表性对比的研究结果一致(Dolgova, 2016; Buckley *et al.*, 2018)一致, 进一步表明BI比RWI更具备用于气候重建的潜能。

BI数据的获取过程与MXD相比简单且成本较低, 在未来可以增加树轮气候学研究的空间分布及可重复性, 为气候重建等研究带来更多的可能性(Björklund *et al.*, 2013)。尽管在测量过程中存在可能影响BI数据质量的因素, 如扫描样品过程中的进光率等, 但在一般情况下, 这些影响可被避免或最小化(Campbell *et al.*, 2011; Björklund *et al.*, 2013; Rydval *et al.*, 2014)。通过扫描树轮样芯得到的蓝光反射强度和前人利用X射线技术测得的树轮最大晚

材密度数据显著相关(段建平, 2015; Fuentes *et al.*, 2017; Buckley *et al.*, 2018), 但采用该技术获取窄轮及边材和心材颜色有明显差异样芯(如欧洲赤松)的BI值时准确性偏低或较难实现(Sheppard & Wiedenhoeft, 2007; Campbell *et al.*, 2011; 段建平, 2015; Babst *et al.*, 2016)。在把样芯表面打磨得足够平整光滑后, 利用高分辨率扫描仪对样芯进行扫描, 并保存扫描图像, 最后使用CooRecorder或WinDENDRO蓝光强度测量系统测得BI数据。与X射线技术相比, 蓝光强度分析法仍需通过萃取等方法把树脂和心材物质去除, 但不需对样芯进行切割分段(段建平, 2015)。另外, BI的样本总代表性(EPS)虽大于0.80, 但值却低于RWI, 这在一定程度上验证了Rydval等(2014)的研究结果即获取BI数据所需的样本量要略大于RWI, 故建议之后进行有关BI的研究过程中相应地增加样本量。同时, BI对于气候的反映效果较好且异于传统的年轮宽度, 尤其是中高频领域对于夏季(或生长季)气候的响应, 再次验证BI是针叶树种重建过去气候的高潜力参数。在今后的研究中, 利用CooRecorder方法可在更多研究区域生成BI数据; 除了完善样品制备程序和探索信号稳定性之外, 开展进一步工作的方向将是克服BI年表中潜在的低频偏差。

4 结论

本研究将树轮年代学新兴参数BI应用到不同海拔鱼鳞云杉与气候因子的响应研究中, 详细介绍了使用CooRecorder 9.1软件获取BI数据所需的方法步骤, 通过对比BI与RWI对气候的代表性, 发现鱼鳞云杉BI和RWI具有接近相反的生长-气候关系, 这可能是树木在径向生长过程中早、晚材分配权衡关系的体现。鱼鳞云杉BI在记录月平均最高气温、夏季和生长季最高气温及夏季SPEI时相比传统宽度具有明显优势, 尤其是中、高海拔树木; 且BI在空间尺度上对于当年夏季降水、最高气温以及SPEI的响应好于传统RWI。尽管鱼鳞云杉BI对气候的记录作用不具备绝对优势, 但BI与夏季气候因子关系的时间稳定性与空间代表性均好于传统RWI, 足以证实BI能够指代与RWI不同的气候信号, 具有代替MXD并应用于夏季气候重建的潜能。BI数据获取成本低廉且应用方便, 在树木年代学研究中具有一定的应用潜能和运用空间。

致谢 感谢中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室基金项目(stqx2018zd02)的资助, 黄泥河国家级自然保护区员工及东北林业大学生态研究中心研究生宋文琦和张旭在野外取样工作中给予的帮助。

参考文献

- Babst F, Wright WE, Szejn P, Wells L, Belmecheri S, Monson RK (2016). Blue intensity parameters derived from Ponderosa pine tree rings characterize intra-annual density fluctuations and reveal seasonally divergent water limitations. *Trees*, 30, 1403–1415.
- Björklund J, Gunnarson BE, Seftigen K, Zhang P, Linderholm HW (2015). Using adjusted Blue Intensity data to attain high-quality summer temperature information: A case study from Central Scandinavia. *The Holocene*, 25, 547–556.
- Björklund JA, Gunnarson BE, Seftigen K, Esper J, Linderholm HW (2014). Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information. *Climate of the Past*, 10, 877–885.
- Björklund JA, Gunnarson BE, Seftigen K, Esper J, Linderholm HW (2013). Is blue intensity ready to replace maximum latewood density as a strong temperature proxy? A tree-ring case study on Scots pine from northern Sweden. *Climate of the Past Discussions*, 9, 5227–5261.
- Briffa KR, Melvin TM (2010). A closer look at regional curve standardization of tree-ring records: Justification of the need, a warning of some pitfalls, and suggested improvements in its application. In: Hughes MK, Swetnam TW, Diaz HF eds. *Dendroclimatology*. Springer, Dordrecht. 113–145.
- Brookhouse M, Graham R (2016). Application of the minimum blue-intensity technique to a southern-hemisphere conifer. *Tree-Ring Research*, 72, 103–107.
- Buckley BM, Hansen KG, Griffin KL, Schmiede S, Oelkers R, D'Arrigo RD, Stahle DK, Davi N, Nguyen TQT, Le CN, Wilson RJS (2018). Blue intensity from a tropical conifer's annual rings for climate reconstruction: An ecophysiological perspective. *Dendrochronologia*, 50, 10–22.
- Büntgen U, Frank DC, Kaczka RJ, Verstege A, Zwijacz-Kozica T, Esper J (2007). Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Tree Physiology*, 27, 689–702.
- Büntgen U, Frank DC, Nievergelt D, Esper J (2006). Summer temperature variations in the European Alps, A.D. 755–2004. *Journal of Climate*, 19, 5606–5623.
- Campbell R, McCarroll D, Loader NJ, Grudd H, Robertson I, Jalkanen R (2007). Blue intensity in *Pinus sylvestris* tree-rings: Developing a new palaeoclimate proxy. *The Holocene*, 17, 821–828.
- Campbell R, McCarroll D, Robertson I, Loader NJ, Grudd H, Gunnarson B (2011). Blue intensity in *Pinus sylvestris* tree rings: A manual for a new palaeoclimate proxy. *Tree-Ring Research*, 67, 127–134.
- Chen F, Yuan YJ, Wei WS, Yu SL, Fan ZA, Zhang RB, Zhang TW, Li Q, Shang HM (2012). Temperature reconstruction from tree-ring maximum latewood density of Qinghai spruce in middle Hexi Corridor, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 633–643.
- Chen F, Yuan YJ, Wei WS, Yu SL, Shang HM, Zhang TW, Zhang RB, Wang HQ (2017). Air temperature from May through August in northern Xinjiang reconstructed from multi-site tree-ring density. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 39(1), 43–53. [陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 喻树龙, 尚华明, 张同文, 张瑞波, 王慧琴 (2017). 利用年轮密度重建新疆北部5–8月温度变化. 冰川冻土, 39(1), 43–53.]
- Dolgov E (2016). June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data. *Dendrochronologia*, 39, 17–23.
- Duan JP (2015). Advances in tree-ring density study. *Quaternary Sciences*, 35, 1271–1282. [段建平 (2015). 树木年轮密度研究进展. 第四纪研究, 35, 1271–1282.]
- Esper J, Frank DC, Timonen M, Zorita E, Wilson RJS, Luterbacher J, Holzkämper S, Fischer N, Wagner S, Nievergelt D, Verstege A, Büntgen U (2012). Orbital forcing of tree-ring data. *Nature Climate Change*, 2, 862–866.
- Fan ZX, Bräuning A, Yang B, Cao KF (2009). Tree ring density-based summer temperature reconstruction for the central Hengduan Mountains in southern China. *Global and Planetary Change*, 65(1–2), 1–11.
- Fritts HC (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London.
- Fuentes M, Salo R, Björklund J, Seftigen K, Zhang P, Gunnarson B, Aravena JC, Linderholm HW (2017). A 970-year-long summer temperature reconstruction from Rogen, west-central Sweden, based on blue intensity from tree rings. *The Holocene*, 28, 254–266.
- Gao LS, Wang XM, Zhao XH (2011). Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 27–34. [高露双, 王晓明, 赵秀海 (2011). 长白山过渡带红松和鱼鳞云杉径向生长对气候因子的响应. 植物生态学报, 35, 27–34.]
- Gindl W, Grabner M, Wimmer R (2000). The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width. *Trees*, 14, 409–414.
- Heeter KJ, Harley GL, van de Gevel SL, White PB (2019). Blue intensity as a temperature proxy in the eastern United States: A pilot study from a southern disjunct population

- of *Picea rubens* (Sarg.). *Dendrochronologia*, 55, 105–109.
- Holmes RL (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–75.
- Hughes MK (2001). An improved reconstruction of summer temperature at Srinagar, Kashmir since 1660 AD, based on tree-ring-width and maximum latewood density of *Abies pindrow* [Royle] Spach. *Palaeobotanist*, 50, 13–19.
- Kaczka RJ, Spyt B, Janecka K, Beil I, Büntgen U, Scharnweber T, Nievergelt D, Wilmking M (2018). Different maximum latewood density and blue intensity measurements techniques reveal similar results. *Dendrochronologia*, 49, 94–101.
- Lange PW (1954). The distribution of lignin in the cell wall of normal and reaction wood from spruce and a few hardwoods. *Svensk Papperstidn*, 57, 525–532.
- Li GQ, Bai F, Sang WG (2011). Different responses of radial growth to climate warming in *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* at their upper elevational limits in Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 500–511. [李广起, 白帆, 桑卫国 (2011). 长白山红松和鱼鳞云杉在分布上限的径向生长对气候变暖的不同响应. 植物生态学报, 35, 500–511.]
- Linderholm HW, Björklund J, Seftigen K, Gunnarson BE, Fuentes M (2015). Fennoscandia revisited: A spatially improved tree-ring reconstruction of summer temperatures for the last 900 years. *Climate Dynamics*, 45, 933–947.
- Luckman BH, Wilson RJS (2005). Summer temperatures in the Canadian Rockies during the last millennium: A revised record. *Climate Dynamics*, 24, 131–144.
- McCarroll D, Pettigrew E, Luckman A, Guibal F, Edouard JL (2002). Blue reflectance provides a surrogate for latewood density of high-latitude pine tree rings. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 34, 450–453.
- Nagavciuc V, Roibu CC, Ionita M, Mursa A, Cotos MG, Popa I (2019). Different climate response of three tree ring proxies of *Pinus sylvestris* from the Eastern Carpathians, Romania. *Dendrochronologia*, 54, 56–63.
- Österreicher A, Weber G, Leuenberger M, Nicolussi K (2015). Exploring blue intensity comparison of blue intensity and MXD data from Alpine spruce trees. *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, 13, 56–61.
- Rydval M, Larsson LÅ, McGlynn L, Gunnarson BE, Loader NJ, Young GHF, Wilson R (2014). Blue intensity for dendroclimatology: Should we have the blues? Experiments from Scotland. *Dendrochronologia*, 32, 191–204.
- Sheppard PR, Graumlich LJ, Conkey LE (1996). Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate. *The Holocene*, 6, 62–68.
- Sheppard PR, Wiedenhoef A (2007). An advancement in removing extraneous color from wood for low-magnification reflected-light image analysis of conifer tree rings. *Wood and Fiber Science*, 39, 173–183.
- Sidor CG, Popa I, Vlad R, Cherubini P (2015). Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania). *Trees*, 29, 985–997.
- Stokes MA, Smiley TL (1968). *An Introduction to Tree-ring Dating*. University of Arizona Press, Tucson.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23, 1696–1718.
- Wang SL, Zhao Y, Gai XR, Wang XY, Yu DP, Zhou WM, Zhou L, Dai LM (2017). Response of radial growth of *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate factors along an altitudinal gradient on Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 3131–3137. [王守乐, 赵媛, 盖学瑞, 王晓雨, 于大炮, 周旺明, 周莉, 代力民 (2017). 长白山鱼鳞云杉径向生长对气候响应的海拔差异. 生态学杂志, 36, 3131–3137.]
- Wang T, Yu D, Li JF, Ma KP (2003). Advances in research on the relationship between climatic change and tree-ring width. *Acta Photoecologia Sinica*, 27, 23–33. [王婷, 于丹, 李江凤, 马克平 (2003). 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. 植物生态学报, 27, 23–33.]
- Wang XC, Pederson N, Chen ZJ, Lawton K, Zhu C, Han SJ (2019). Recent rising temperatures drive younger and southern Korean pine growth decline. *Science of the Total Environment*, 649, 1105–1116.
- Wang H, Shao XM, Fang XQ, Jiang Y, Liu CL, Qiao Q (2017). Relationships between tree-ring cell features of *Pinus koraiensis* and climate factors in the Changbai Mountains, Northeastern China. *Journal of Forestry Research*, 28, 105–114.
- Wang XC, Zhang XQ, Zhu JH, Hou ZH, Chai ZL (2009). Research on relationship between tree-ring and global warming. *World Forestry Research*, 22(6), 38–42. [王晓春, 张小全, 朱建华, 侯振宏, 柴正礼 (2009). 树木年轮与全球变暖的关系研究进展. 世界林业研究, 22(6), 38–42.]
- Wilson R, Anchukaitis K, Andreu-Hayles L, Cook E, D'Arrigo R, Davi N, Haberbauer L, Krusic P, Luckman B, Morimoto D, Oelkers R, Wiles G, Wood C (2019). Improved dendroclimatic calibration using blue intensity in the southern Yukon. *The Holocene*, 29, 1817–1830.
- Wilson R, D'Arrigo R, Andreu-Hayles L, Oelkers R, Wiles G, Anchukaitis K, Davi N (2017). Experiments based on blue intensity for reconstructing North Pacific temperatures along the Gulf of Alaska. *Climate of the Past*, 13, 1007–1022.
- Yang YK, Huang Q, Liu Y, Wang YM, Bai T, Wang WK (2012). Response analysis between climate factors and the density of wood growth of *Picea crassifolia*. *Journal of Xi'an University of Technology*, 28, 432–438. [杨银科, 黄

- 强, 刘禹, 王义民, 白涛, 王文科 (2012). 云杉树轮生长密度对气候要素的响应分析. 西安理工大学学报, 28, 432–438.]
- Yanosky TM, Robinove CJ (1986). Digital image measurement of the area and anatomical structure of tree rings. *Canadian Journal of Botany*, 64, 2896–2902.
- Yu J, Liu QJ, Zhou G, Meng SW, Zhou H, Xu ZZ, Shi JN, Du WX (2017). Response of radial growth of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* to climate change in Xiaoxing'anling Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 3451–3460. [于健, 刘琪璟, 周光, 孟盛旺, 周华, 徐振招, 史景宁, 杜文先 (2017). 小兴安岭红松和鱼鳞云杉径向生长对气候变化的响应. 应用生态学报, 28, 3451–3460.]
- Zhang P, Ionita M, Lohmann G, Chen DL, Linderholm HW (2017). Can tree-ring density data reflect summer temperature extremes and associated circulation patterns over Fennoscandia? *Climate Dynamics*, 49, 2721–2736.
- Zhang Y, Fang KY, Zhou FF, Dong ZP, Gan ZF, Li DW (2016). A study on the inter-annual latewood growth of *Pinus massoniana* in fuzhou. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 11, 59–64. [张雨, 方克艳, 周非飞, 董志鹏, 甘展峰, 李大稳 (2016). 福州马尾松年内晚材生长动态观测研究. 亚热带资源与环境学报, 11, 59–64].
- Zhu LJ, Cooper DJ, Yang JW, Zhang X, Wang XC (2018). Rapid warming induces the contrasting growth of Yezo spruce (*Picea jezoensis* var. *microsperma*) at two elevation gradient sites of northeast China. *Dendrochronologia*, 50, 52–63.
- Zhu LJ, Li ZS, Wang XC (2017). Anatomical characteristics of xylem in tree rings and its relationship with environments. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 238–251. [朱良军, 李宗善, 王晓春 (2017). 树轮木质部解剖特征及其与环境变化的关系. 植物生态学报, 41, 238–251.]

特邀编委: 张齐兵 实习编辑: 赵航