



蔡苗,卢杰. 树轮密度的测量方法及其对气候变化的响应研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2023(5):107-112.

树轮密度的测量方法及其对气候变化的响应研究进展

蔡苗,卢杰

(西藏农牧学院 高原生态研究所/西藏高原森林生态教育部重点实验室/西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站/西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室, 西藏 林芝 860000)

摘要:近年来全球气候变暖成为研究热点,树轮密度是研究气候变化的重要代用资料之一。在全球气候变暖的背景下,研究树木年轮密度与气候之间的关系是十分必要的。基于当前国内外对树轮与气候关系的研究进展,本文分别从树轮密度测量方法、树轮密度与气候变化之间的关系以及树轮密度对气候响应的影响因素方面等进行综述。总结了树轮密度与主要气候因子(温度、降水)综合作用的关系,树高、海拔、树龄和坡向等非气候因子对树轮密度与气候响应的影响。一般情况下,它们的关系体现在早材密度与降水存在显著负相关关系,晚材密度与温度呈显著正相关关系,并且树轮密度受降水和温度双重作用影响。

关键词:树轮密度;测量方法;气候变化;影响因素

随着人类社会的发展,森林的过度采伐、化石燃料的燃烧等人类活动的干扰加剧,造成了生态环境恶化,大气中温室气体不断累积,随之形成温室效应。这些环境变化不仅造成冰川消融、海洋和陆地表面温差变小、空气流动减慢,还会破坏人类生存环境,打破地球生态系统的平衡,最终导致全球气候日趋变暖。

树木年轮不仅可以记录其自身的年龄,还可以记载树木生长所经历的环境及气候演变过程^[1]。树木年轮是一种代用资料,具有分布广泛、易于复本、分辨率高以及连续性好等特征^[2-5]。因此,自20世纪60年代以来,国外就开始对树木年轮密度方面开展了大量的研究^[6];而中国由于研究条件的影响导致起步相对较晚,从20世纪90年代起,国内学者才先后开展了相关的研究,而且主要集中在青藏高原和新疆等高海拔地区和中高纬度地带^[7-8]。早些年,一般通过树木年轮的宽度指标来研究其对气候的响应,而利用年轮密度指标的响应研究相对比较少。树木年轮密度主要分为早材最小密度、早材平均密度、晚材最大密度、晚材

平均密度4种指标参数,其大小与早晚材细胞壁的厚薄和细胞的大小相关^[9]。树轮密度不仅能够反映树木细胞的大小及其细胞壁的厚度等特点,还能够提取出树轮宽度不能反映的环境信息^[10]。而且相对于年轮宽度来说,年轮密度具有稳定性的特征,受生长季前期气候影响不明显,能够更好地反映生长季气候的变化^[11-12]。近十年来,国内外学者研究了大量树木年轮密度对气候变化的响应,并且也取得了很好的研究成果。

为了解树木年轮密度与气候变化的响应机制,分析树木年轮密度的研究潜力,本文将从树木年轮密度的角度出发,综述国内外有关树轮密度的研究进展,分别阐述树木年轮密度测量方法、树轮密度对气候的响应以及树轮密度对气候响应的影响因素3方面内容,以期对未来树木年轮密度研究和预测未来的气候变化提供一定参考。

1 树轮密度测量方法

早些年,由于树轮密度的测量技术水平欠缺、设备价格昂贵以及操作过程复杂且耗时较长,使树轮密度的研究相对较少。自20世纪40年代以来,国外学者相继尝试了多种树轮密度测量方法,如体积比重法、硬度测定法、光透视法以及 β 微粒法等不同方法^[13]。但由于这些方法都存在着一一定的局限性,没能在研究中广泛应用。直到20世纪60年代,X射线分析法由法国科学家 Polge 首

收稿日期:2022-12-15

基金项目:科技部国家野外科学观测站(生态系统)运行补助项目(2021-2025)。

第一作者:蔡苗(1998—),女,硕士研究生,从事森林生态学研究。E-mail:c187811411612@163.com。

通信作者:卢杰(1973—),男,博士,教授,博导,从事森林生态学的研究与教学工作。E-mail:tibetlj@163.com。

先提出,后来不断地对其进行完善改进,X射线技术的应用已经发展为树木年代学的一种基础研究方法^[14-16],树轮密度的研究也因此逐渐兴起,并得到广泛地应用^[13,17]。近年来,研究者们多采用X射线法对树木年轮密度进行测量,如塔城西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)树轮密度测定^[18];测定欧亚地区的落叶松(*L. sibirica*)、苏格兰松(*Pinus sylvestris*)和地中海黑松(*P. nigra* subsp. *salzmannii*)3种针叶树树轮密度^[12];中国祁连山青海云杉(*Picea crassifolia*)树轮密度的测定^[19]以及来自各地不同种源的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的树轮密度指标测定^[20]。

在实际操作中,运用X射线法前需要对树轮样芯进行一系列的样本前处理。首先需要把从野外采集的树轮样芯拿到实验室进行固定和打磨;再进行挑选,扭动角度不宜过大、破损尽量较小,舍弃有结疤的样品,以便后续对样品进行切割,将挑选好的样芯进行脱糖脱脂萃取处理,减少树脂流动干扰物的影响;然后对样芯进行切段和角度测量并做好标记,前后两端呈梯形斜切,每小段1~3 cm长,并做好标记,使用纤维角度仪器测量;随后将样芯按照纤维走向,将样段切割成 1.00 ± 0.02 mm样片;接着进行X光照射处理,完成X光胶片制作,利用Dendro-2003树轮密度分析系统将光学信号转化为树轮密度信号树轮密度值^[21];对树轮密度数据进行交叉定年和交叉定年的质量检验,最后使用ARSTAN建立树轮密度年表^[22]。

随着研究需求的发展,21世纪初德国科学家Schinker^[23]提出了高频光密度测定法测量树轮密度,该测量方法成本相对较低,且准确性和X射线法没有显著性差异。其原理是利用木材绝缘特性,通过高频探头接触,根据树木绝缘常量的变化而产生密度值的变化,从而得到树轮密度^[24]。该方法虽成本相对X射线法较低,但是对树木样芯的要求较高,实验时需与高频探头紧密接触。如果样芯不满足条件就会产生异常值,造成实验数据的不准确。

2014年比利时Dierick等^[25]研发了X射线显微CT扫描仪,如Nanowood扫描仪和微环境扫描仪(EMCT)。X射线显微扫描仪是利用三维X射线成像,与医用CT相结合,可进行小尺寸、

高精度扫描来获取树轮密度,运用该方法获取树轮密度优点是无需进行样本前处理^[25-26]。近年来,de Groot^[27]和Vanhellemont^[28]也运用该方法对树芯进行扫描来获取树轮密度。

目前也有研究者认为X射线法仪器存在不方便携带、测量过程繁琐等问题,研发了微钻阻力仪,其工作原理是根据钻针钻入早晚材部分的阻力大小不同来得出相应的密度大小信息^[29]。并于2017年组建了微钻阻力仪研制团队,该方法有待进一步测试其精度以及研究其影响因素。

总之在目前的科学研究中,X射线技术被广泛地运用。各研究方法也有各自的限制条件,在实际研究操作过程中,可根据实际情况进行选取,如根据样芯质量、实验数据精确度、获取时间以及科研室的经费等条件选取较为合适的方法。

2 树木年轮密度对气候的响应

2.1 对降水的响应

在干旱、半干旱地区,树轮的早材密度对降水的反应表现较为敏感。降水减少,对应的土壤和空气中的水分也很少,缺水导致树干本身细胞的分裂、伸长都受到制约,抑制了树木生长,从而会增加早材密度。反之,水分充足时,导致细胞个体大而细胞壁变薄,促进树木生长,从而早材部分的木质密度会下降^[30-32]。因此,树木生长越快,树木年轮密度就越小。杨柳等^[19]对祁连山的青海云杉树木年轮的密度与气候响应进行了分析,树轮的早材密度与降水表现出显著的负相关关系。内蒙古鄂尔多斯地区早材密度和最小早材密度与降水量有负相关^[32]。甘肃崆峒山发现早材最小密度和早材密度均与夏季降水量存在显著的负相关关系^[24]。张辉等^[20]对南方杉木研究发现,早材密度与当年5月份的降水也存在显著的负相关关系。上述结果显示,树轮密度中的早材密度和最小早材密度对降水的响应存在显著的相关关系。

但是在降雨充足或湿润的南方地区,降水量对树木年轮密度限制作用减小。这与树木生长地区的降水量是否充足有很大关系,降水充足使树木对降水量的敏感性下降。例如张辉等^[20]对福建三明莘口林场来自全国各地的杉木进行研究后发现,树轮密度主要受相对湿度的影响,降水量对其影响较小。祁连山地区每年6月开始进入雨季,导致土壤和空气中水分已经饱和,降水量就不再是影响树轮密度的限制因子^[33]。结果表明,在

降水量较多的条件下,可以促进树木年轮的细胞分裂,使细胞体积增大,进而造成细胞壁变薄,导致早材最小密度和早材平均密度减小。

2.2 对温度的响应

当水分充足时,树木年轮密度就降低了对降水量的敏感度,而温度便成了树轮密度的主要影响因子。国内外研究者均发现,树轮密度与温度这一气候因子具有很好的相关性,这种关系在全球气候变暖的趋势下尤为重要。

研究发现,树轮密度一般对生长季的温度响应较好。欧美地区对树轮密度的研究起步相对较早,有相关研究发现树轮最大密度和生长季末期的温度具有很好的正相关关系^[34]。陈峰等^[35]对天山山区的雪岭云杉(*P. schrenkiana*)进行分析得出,其树轮最大密度对夏季温度有显著的正相关关系。祁连山西部地区杉木的晚材密度与3月最高温度有明显的正相关关系^[19]。日本中部地区的寒温带落叶阔叶林树轮密度与温度也呈现出正相关关系^[36]。喀什河流域雪岭云杉^[37]、黑龙江漠河樟子松(*P. sylvestris* var. *mongolica*)以及兴安落叶松(*L. gmelinii*)^[38]、塔城西伯利亚落叶松^[18]的树木年轮晚材密度与生长季初期的温度均有明显的正相关关系。结果表明,高温可以提高植株的光合作用强度,有利于营养积累以及增加细胞壁的厚度,因而会促进树轮晚材密度的形成^[26]。

2.3 对温度与降水双重作用的响应

杨柳等^[19]发现青海云杉的树轮早材密度和晚材密度与温度呈现较好的正相关关系,而且对最高气温的反应最为明显,但同时与降水量表现出较弱的负相关关系。与降雨量相比之下,树轮密度对温度的反应较大,说明温度是影响树轮密度增长最重要的因素,对树轮密度有着直接影响,而降雨量起着间接影响作用^[33,39]。巩乃斯流域树轮最大密度与生长季温度具有显著相关关系,同时还与降水存在显著的负相关关系^[40]。对川西高山松(*P. densata*)最大密度的分析中也发现同样的规律,降水受气温的影响,通过与气温的负相关关系而间接地与最大密度表现为负相关^[41]。综上所述,可能是因为气温和降水的双重作用而致使树轮密度产生差异,而不是单温度因子所导致的。

3 影响树轮密度对气候响应的因素

由于外界环境因素及自身遗传因素的原因,影响树轮密度对气候响应的主要环境因子存在很大的差异,而遗传因素又是影响其对环境变化的生理学机制^[42]。同时,树轮密度对气候响应还受树高、海拔、树龄和坡向等多种因素的影响,其过程是相当复杂的。

3.1 树高

树轮密度对气候响应受不同树高取样的影响主要体现在干旱胁迫的方面。树干更高处,木质部导管的空化影响水分传递,从而对植物的径向生长产生影响,严重时甚至还会对植物生存造成影响^[43]。从而导致了不同树高处密度参数存在着一定差异。例如法国欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)在不同树高处取样,得出各树高对气候的响应存在着差异^[44]。刘可祥^[45]对伊犁地区雪岭云杉不同树高处树轮密度对气候的响应进行研究,也发现各树轮密度参数对气候的响应表现出一定差异。树轮密度对干旱反应敏感性高,水分亏缺与树轮密度呈显著的正相关,水分增多加快了细胞分化,促进树木生长,使树木细胞变大,细胞壁变薄,从而降低密度值。而不同树高处水分传递情况不同,最终使不同树干高度下密度值与气候因子表现出不同的响应关系。但导致密度参数发生变化的具体原因还有待进一步深入研究。

3.2 海拔

树轮密度对气候响应也会受海拔的影响。在高海拔地区,夏季温度限制了树木生长,从而对树木最大密度的形成产生影响^[46]。阿尔卑斯山欧洲落叶松(*L. decidua*)的晚材最大密度随海拔的升高与温度响应表现更加强烈^[47],高海拔地区较为寒冷,树轮密度生长受气温控制。同时,不同海拔梯度的土壤持水能力也表现不同,从而影响晚材最大密度对降水的响应,例如 Klippel 等^[48]对落叶松进行研究发现,高海拔地区土壤持水能力高于低海拔地区,低海拔地区的树木在7月受到干旱胁迫的影响,可能是由于低海拔地区石灰岩上排水良好的土壤引起的,从而导致低海拔地区晚材最大密度对降水响应强烈。综上所述,树轮密度对气候的响应受海拔的影响主要表现在两个方面:高海拔地区的温度和土壤的持水能力,但也有研究表明,海拔对树轮密度与气候关系不存在显著影响。如新疆尼勒克县喀什河流域不同海拔

雪岭云杉树轮密度与气候关系表现基本一致^[37]。

3.3 树龄

树龄对树木年轮的形成十分重要,树龄对树轮密度与气候响应的敏感性有很大的影响,随着形成层年龄的增加,树轮密度对气候变化响应的敏感程度也随之改变。如在瑞典北部和芬兰地区首次发现樟子松(*P. sylvestris* var. *mongolica*)随形成层年龄增加,最大晚材密度与温度的敏感性降低^[49]。树木整个生长周期的生理变化可能会影响形成层活性和细胞壁厚度,及其对环境的敏感性。通常,较年轻的树木往往生长周期较长,死亡风险更大,从而在光照竞争中促进生长^[50]。而相反,老树的生长周期更短,由于这些树木生长良好,竞争作用较小^[51]。再如 Rossi 等^[51]研究发现在林线处成年和老年针叶树中木质部形成的时间不同,从而影响了树龄对树轮密度与气候的响应强度。Carrer 等^[52]也发现幼树的木质部形成时间较长,并降低了树轮密度对气候的响应水平。

3.4 坡向

坡向在调节树轮密度与气候变化敏感性中也起着十分重要的作用。不同的坡向树轮密度对气候响应不同。如 Leonelli 等^[53]发现阿尔卑斯山南向和西向的树木与夏季温度的差异明显增加,而北向的树与夏季温度的关系稳定。可能是由于树木生长在不同坡向光周期的长短不同,导致温度存在差异。Zalloni 等^[54]对 Somma-Vesuvio 地区冬青(*Quercus ilex*)树进行研究发现,生长在南坡和北坡树轮密度对气候响应表现出差异,南坡受水分条件影响,而北坡主要受温度影响,温度限制了伪轮形成,因此南坡更易形成伪轮。不同坡向会影响树木生长对气候变化的敏感性和响应程度,进而影响其对气候变暖的响应方式。

4 总结与展望

本文回顾了近年来有关树轮密度测定的研究进展,同时,对近年来国内外关于树轮密度对气候响应的研究进展进行了综述,对其规律进行总结归纳,并进一步发掘其研究潜力,为未来树木年轮密度研究和预测未来的气候变化提供一定参考。综合国内外相关研究发现,温度和降水对树木年轮密度的影响是交叉起综合作用的,当降水量增加时,太阳辐射不足,导致温度下降,光合作用速率降低,物质积累增加,细胞分裂减少,细胞壁变薄,最终导致树轮密度变小;相反,如此时降水减

少,太阳辐射增强,温度升高,细胞酶活性增强,光合作用产物增多,就会形成较多叶绿素和正常的细胞,因而树轮密度增大。

目前国内关于树轮密度各方面研究的数量偏少,且主要是针对分布在高海拔和高纬度地区树轮密度与气候关系进行研究。今后还需进一步扩大研究范围,在干旱山区、干热河谷等不同的地理环境条件下进行采样。此外,树轮密度对气候响应还受诸多因素影响,但目前该方面研究较少。因此,在未来的研究中,还应特别注意其他气候因素的影响,如湿度、二氧化碳浓度、光照强度,也要关注非气候因子的影响,如树种、病虫害以及人类活动干扰。总而言之,树木年轮的生长受到诸多因素影响,如何从树轮中提取出相关信息仍然是目前的研究难点。树轮密度包含了丰富的气候信息以及具有稳定性的特征,已成为树木年轮气候学中的重要研究手段之一。近年来被广泛地运用到气候变化和重建的研究工作中,并取得较好的研究成果。我国对树轮密度相关研究开展相对较晚,应该积极思考如何扩大研究方向,加强学术合作和交流,努力探索树轮密度这一领域的研究,并在现有的基础上加以改进和创新,以全面推动我国树轮密度和气候研究的发展进程。

参考文献:

- [1] 柴正礼,姚孟春,张小全,等. 树木年轮对气候变化响应研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(2): 959-961.
- [2] NATH C D, MUNOZ F, PÉLISSIER R, et al. Growth rings in tropical trees: role of functional traits, environment, and phylogeny[J]. Trees, 2016, 30(6): 2153-2175.
- [3] BÜNTGEN U, MYGLAN V S, LJUNGQVIST F C, et al. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(3): 231-236.
- [4] 陈兰, 李书恒, 侯丽, 等. 基于 Vaganov-Shashkin 模型的太白红杉径向生长对气候要素的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2470-2480.
- [5] BABST F, BODESHEIM P, CHARNEY N, et al. When tree rings go global: challenges and opportunities for retro- and prospective insight[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 197: 1-20.
- [6] FRITTS H C, BLASING T J, HAYDEN B P, et al. Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationships and for reconstructing anomalies in paleoclimate [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1971: 845-864.
- [7] 张志华, 李骥. 用树轮密度及宽度资料重建新疆吉木萨尔县的季节降水和最高温度[J]. 气象学报, 1998(1): 78-87.

- [8] 刘禹,吴祥定,安芷生,等. 树轮密度、稳定 C 同位素对过去近 100 a 陕西黄陵季节气温与降水的恢复[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),1997(3):271-276.
- [9] KIRDYANOV A V, TREYDTE K S, NIKOLAEV A, et al. Climate signals in tree-ring width, density and $\delta^{13}\text{C}$ from larches in Eastern Siberia (Russia) [J]. Chemical Geology, 2008, 252(1-2):31-41.
- [10] WIMMER R, GRABNER M. A comparison of tree-ring features in *Picea abies* as correlated with climate[J]. Iawa Journal, 2000, 21(4):403-416.
- [11] YIN H, LIU H, LINDERHOLM H W, et al. Tree ring density-based warm-season temperature reconstruction since AD 1610 in the eastern Tibetan Plateau[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 426:112-120.
- [12] CAMARERO J J, FERNÁNDEZ-PÉREZ L, KIRDYANOV A V, et al. Minimum wood density of conifers portrays changes in early season precipitation at dry and cold Eurasian regions[J]. Trees, 2017, 31(5):1423-1437.
- [13] 魏本勇,方修琦. 树轮气候学中树木年轮密度分析方法的研究进展[J]. 古地理学报, 2008(2):193-202.
- [14] POLGE H. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants; applications dans les domaines Technologique et Physiologique [C]//Annales des sciences forestières. EDP Sciences, 1966, 23(1):1-206.
- [15] MANNES D, LEHMANN E, CHERUBINI P, et al. Neutron imaging versus standard X-ray densitometry as method to measure tree-ring wood density[J]. Trees, 2007, 21(6):605-612.
- [16] KIRDYANOV A V, VAGANOV E A, HUGHES M K. Separating the climatic signal from tree-ring width and maximum latewood density records [J]. Trees, 2007, 21(1):37-44.
- [17] BERGSGERGÈS L, NEPVEU G, FRANC A. Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(3-4):567-579.
- [18] 陈峰,袁玉江,王丽丽,等. 塔城西伯利亚落叶松树轮密度的气候响应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6):182-187.
- [19] 杨柳,秦春,李刚. 中国祁连山西段青海云杉树轮密度记录的气候信号[J]. 应用生态学报, 2021, 32(10):3636-3642.
- [20] 张辉,张芸,胡亚楠,等. 气候变暖背景下杉木年轮密度对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(4):1551-1563.
- [21] 喻树龙. 新疆伊犁巩乃斯地区树木年轮密度对气候的响应及气候重建[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学, 2011.
- [22] SONG H, MEI R, LIU Y, et al. Maximum July-September temperatures derived from tree-ring densities on the western Loess Plateau, China[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(2):779-790.
- [23] SCHINKER M G, HANSEN N, SPIECKER H. High-frequency densitometry-a new method for the rapid evaluation of wood density variations[J]. IAWA Journal, 2003, 24(3):231-239.
- [24] 侯迎,王乃昂,张学敏,等. 高频光密度测量法在崆峒山树轮年表建立中的应用[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2):236-242.
- [25] DIERICK M, VAN LOO D, MASSCHAELE B, et al. Recent micro-CT scanner developments at UGCT [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2014, 324:35-40.
- [26] BJÖRKLUND J, VON ARX G, NIEVERGELT D, et al. Scientific merits and analytical challenges of tree-ring densitometry[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(4):1224-1264.
- [27] de GROOTE S R E, VANHELLEMONT M, BAETEN L, et al. Competition, tree age and size drive the productivity of mixed forests of pedunculate oak, beech and red oak[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 430:609-617.
- [28] VANHELLEMONT M, SOUSA-SILVA R, MAES S L, et al. Distinct growth responses to drought for oak and beech in temperate mixed forests[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650:3017-3026.
- [29] 姚建峰,符利勇,宋新宇,等. 微钻阻力法测量早晚材密度的可行性试验[J]. 林业工程学报, 2022, 7(5):66-73.
- [30] 陈峰,袁玉江,魏文寿,等. 用于气候分析的树木年轮密度资料获取方法与质量控制[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(1):62-67.
- [31] 孙毓,王丽丽,陈津,等. 利用兴安落叶松树轮最大晚材密度重建大兴安岭北部 5-8 月气温变化[J]. 科学通报, 2012, 57(19):1791-1799.
- [32] 杨银科,黄强,刘禹,等. 以树木年轮密度资料重建鄂尔多斯中部地区 6 至 10 月降水量的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(8):96-102, 109.
- [33] 杨银科,黄强,刘禹,等. 云杉树轮生长密度对气候要素的响应分析[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4):432-438.
- [34] HOUSSET J M, NADEAU S, ISABEL N, et al. Tree rings provide a new class of phenotypes for genetic associations that foster insights into adaptation of conifers to climate change[J]. New Phytologist, 2018, 218(2):630-645.
- [35] 陈峰,王慧琴,袁玉江,等. 树轮最大密度记录的吉尔吉斯斯坦天山山区公元 1650 年以来的 7-8 月温度变化[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(4):1-7.
- [36] SHEN Y, TAKATA K, KUDO K, et al. Effects of climate on the tree ring density and weight of *Betula ermanii* in a cool temperate forest in central Japan[J]. Trees, 2022:1-9.
- [37] 石仁娜·加汗. 喀什河流域不同海拔雪岭云杉树轮气候响应特征研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2021.
- [38] 王丽丽,邵雪梅,黄磊,等. 黑龙江漠河兴安落叶松与樟子松树轮生长特性及其对气候的响应[J]. 植物生态学报, 2005(3):280-285.

- [39] 徐金梅,吕建雄,鲍甫成,等.祁连山青海云杉木材密度对气候变化的响应[J].北京林业大学学报,2011,33(5):115-121.
- [40] 喻树龙,袁玉江,陈峰,等.巩乃斯河源树木年轮密度年表特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2010,4(4):6-11.
- [41] WU P, WANG L, SHAO X. Reconstruction of summer temperature variation from maximum density of alpine pine during 1917-2002 for west Sichuan Plateau, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(2): 201-210.
- [42] 邓国富,李明启.树轮密度对气候的响应及重建研究进展[J].地理科学进展,2021,40(2):343-356.
- [43] RITA A, CHERUBINI P, LEONARDI S, et al. Functional adjustments of xylem anatomy to climatic variability: insights from long-term *Ilex aquifolium* tree-ring series [J]. Tree Physiology, 2015, 35(8): 817-828.
- [44] BOURIAUD O, BRÉDA N, DUPOUEY J L, et al. Is ring width a reliable proxy for stem-biomass increment? A case study in European beech [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(12): 2920-2933.
- [45] 刘可祥,张同文,张瑞波,等.不同树高处树轮密度变化特征及其对气候的响应[J].应用生态学报,2021,32(2):503-512.
- [46] 孙毓,王丽丽,陈津.长白落叶松树轮生长对气候变化的响应以及对夏季气温的重建[J].地球环境学报,2012,3(3):889-899.
- [47] HARTL C, SCHNEIDER L, RIECHELMANN D F C, et al. The temperature sensitivity along elevational gradients is more stable in maximum latewood density than tree-ring width [J]. Dendrochronologia, 2022, 73: 125958.
- [48] KLIPPEL L, BÜNTGEN U, KONTER O, et al. Climate sensitivity of high- and low-elevation *Larix decidua* MXD chronologies from the Tatra Mountains [J]. Dendrochronologia, 2020, 60: 125674.
- [49] KONTER O, BÜNTGEN U, CARRER M, et al. Climate signal age effects in boreal tree-rings: Lessons to be learned for paleoclimatic reconstructions [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 142: 164-172.
- [50] DAY M E, GREENWOOD M S, DIAZ-SALA C. Age- and size-related trends in woody plant shoot development: regulatory pathways and evidence for genetic control [J]. Tree Physiology, 2002, 22(8): 507-513.
- [51] ROSSI S, DESLAURIERS A, ANFODILLO T, et al. Age-dependent xylogenesis in timberline conifers [J]. New Phytologist, 2008, 177(1): 199-208.
- [52] CARRER M, URNINATI C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra* [J]. Ecology, 2004, 85(3): 730-740.
- [53] LEONELLI G, PELFINI M, BATTIPAGLIA G, et al. Site-aspect influence on climate sensitivity over time of a high-altitude *Pinus cembra* tree-ring network [J]. Climatic Change, 2009, 96(1): 185-201.
- [54] ZALLONI E, BATTIPAGLIA G, CHERUBINI P, et al. Site conditions influence the climate signal of intra-annual density fluctuations in tree rings of *Q. ilex* L. [J]. Annals of Forest Science, 2018, 75(3): 1-12.

Research Progress on Measurement Methods of Tree-Ring Density and Its Response to Climate Change

CAI Miao, LU Jie

(Institute of Plateau Ecology, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University/Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau, Ministry of Education/Nyingchi National Forest Ecosystem Observation & Research Station Tibet/Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Nyingchi, Nyingchi 860000, China)

Abstract: In recent years, global warming has become a research hotspot, and tree ring density is one of the important alternative data for studying climate change. In the context of global warming, it is necessary to study the relationship between tree ring density and climate. Based on the current research progress of tree ring climate at home and abroad, this paper expounded the tree ring density measurement method, the relationship between tree ring density and climate change, and the influencing factors of tree ring density and climate response. The relationship between tree ring density and the comprehensive effects of main climatic factors (temperature and precipitation) was summarized. Effects of non-climatic factors such as tree height, elevation, tree age and slope aspect on tree ring density and climate response. In general, their relationship was reflected in a significant negative correlation between the early wood density and precipitation, a significant positive correlation between the late wood density and temperature, and the tree ring density was affected by both precipitation and temperature.

Keywords: tree ring density; measurement method; climate change; influencing factors