

# 不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应的研究进展

张慧<sup>1,2,3</sup>, 邵雪梅<sup>1</sup>, 张永<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 临沂大学 资源环境学院, 临沂 276005;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 树木径向生长与气候要素之间的关系是树轮气候学研究的基础, 而对不同海拔高度上树木径向生长与气候要素的关系研究, 有助于更深入地理解树木生长与气候要素的关系。本文对国内外关于不同海拔高度的树木径向生长与气候要素的关系研究进行了总结, 结果显示: 在相同及相似气候区内, 树木径向生长对气候要素的响应随海拔高度变化的趋势较一致。一般而言, 森林上限树木径向生长往往与气温密切相关, 森林下限树木径向生长与降水密切相关。在十分干旱的地区, 上述结论却不一定适用, 往往表现为无论森林上、下限, 树木径向生长均主要受降水的影响; 在水分条件较为充足的地区, 亦会出现无论森林上、下限, 树木径向生长均与气温的变化显著相关的现象。另外, 研究表明树木生长主要受局域气候的影响, 不同树种对气候因子的响应差异不明显。

**关键词:** 不同海拔梯度; 树木径向生长; 气候要素; 响应

**中图分类号:** S718.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2012)03-0845-10

## Research progress on the response of radial growth to climatic factors at different altitudes

ZHANG Hui<sup>1,2,3</sup>, SHAO Xue-mei<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276005, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The relationship between radial tree growth and climatic factors is the basis of dendroclimatology. Studying the responses of radial growth to climatic factors could contribute to a better understanding of the relationship between them. In this article, we summarized the researches on radial growth responses to climatic factors at different altitudes, and reached the conclusion that at the same and the similar climate zones, the variation of growth-climate responses is same when altitude changes. Usually, radial growth at the upper tree limit closely relates to temperature while precipitation effects those near lower timber line most. But in some regions of special climate patterns, the relationship is simple: in extremely arid areas, the limiting factor is always precipitation regardless of altitude variations, and in humid conditions, temperature is critical to tree ring growth. Radial growth variability is primarily associated with local climate changes and interspecific growth variations play an insignificant role.

**Key words:** different altitudes; radial growth; climatic factors; response

自 20 世纪初 Douglass 创立树轮年代学以来, 树轮年代学资料就以其样本分布广、分辨率高、定年准确和易于获取多个复本等优点 (Hughes 2002), 被广泛应用于气候学的研究工作, 特别是在重建过去近

收稿日期: 2012-04-10

基金项目: 中国科技部全球变化研究国家重大科学研究计划 (2010CB950101); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05080201); 国家自然科学基金 (41071061)

通讯作者: 邵雪梅, E-mail: Shaoxm@igsrr.ac.cn

2000 年以来具有年分辨率的温度变化研究中 (Briffa et al, 1995; Esper et al, 2002; Mann et al, 2008), 有着不可替代的作用。而树木径向生长与气候要素之间的关系则是利用树轮进行气候学研究的重要基础。

海拔高度通过影响水热分配, 从而进一步影响树木的径向生长 (Fritts, 1976)。随着海拔高度的升高, 限制树木生长的气候因子往往会有所不同, 认识树木径向生长与周围环境的关系, 辨识不同海拔高度的树木径向生长的气候意义, 对于进行可靠的气候重建工作有着重要的指导作用 (Grace and Norton, 1990; Shao et al, 2010)。为此, 国内外已经开展了较多的不同海拔高度的树木径向生长研究。但不同学者对森林的上、下限树木径向生长所指示的气候意义随海拔高度的变化趋势并没有一个统一的认识。

本文的目的是对近 50 年以来的国内外不同海拔高度的树轮研究成果进行总结, 概括不同海拔高度的树木径向生长所响应的气候因子, 总结不同海

拔高度的树木径向生长对气候要素的响应规律, 为树轮研究工作提供参考信息。

## 1 材料和方法

本文所涉及的样点主要来自于 1965 年至 2011 年国内外发表的关于不同海拔高度的树木径向生长对气候要素响应方面的文献。文中所述的树木径向生长是以树轮宽度为代表, 为此树轮同位素等指标对气候的响应研究未包含在内。

图 1 展示了本文所涉及到的相关研究工作的样点位置, 其中每一个点代表一个研究地点 (以相关研究中提供的经纬度进行标注, 如若文中提供不同高度样点的经纬度, 则用最低点处的经纬度进行标注)。现有的不同海拔梯度的树木径向生长对气候要素的响应研究主要分布在北美、欧洲、大洋洲等地区, 样点空间分布不均, 且处于不同的气候基带内。因此, 为了更清晰的描述响应规律, 本文根据样点所处的位置以及所在的气候区 (Peel et al, 2007), 分地区进行论述。

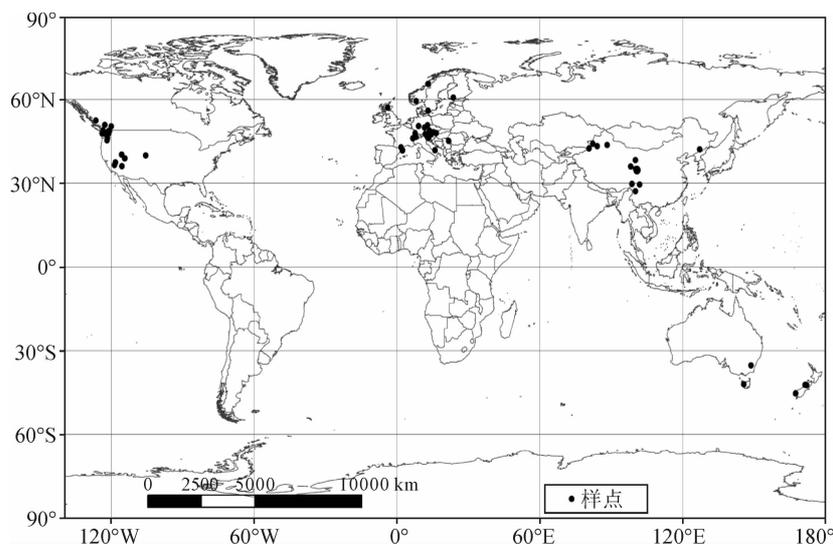


图 1 不同海拔高度树木径向生长与气候要素关系研究样点分布图

Fig. 1 Sample sites of the research on radial growth response to climatic factors at different altitudes

## 2 国外关于树木径向生长对气候要素响应随海拔梯度变化的研究

### 2.1 以美国中西部为代表的干旱区

对树轮年代学研究开展较早的北美地区而言, 树木径向生长对气候要素响应随海拔高度变化研究

主要集中在北美西部地区。根据相关研究所处的位置及气候状况, 又可将其分为图 2 所示的以美国中西部为代表的干旱区和以北美西部北纬 40° 以北沿海地区为代表的夏干型海洋性气候区。其中, 在美国中西部高原地区, 由于受科迪勒拉山系 (American Cordillera) 的阻碍, 暖湿的气流难以深入到大陆内

部,气候较干旱,以高山性气候以及温带草原性气候为主。Fritts et al(1965)在亚利桑那北部(Northern Arizona)由森林内部到森林下部边界沿多个海拔高度研究了树木径向生长的特征。其研究指出,在森林下部边界树木径向生长比森林内部更为敏感,受到气候因子的胁迫较多。多元相关分析表明,冬季和春季的降水是其主要的影 响因子。Kienast et al(1987)在科罗拉多州(Colorado)的研究认为:降水特别是春季降水是树木径向生长的主要限制因子;尽管随着海拔高度的升高,降水显著增加,限制因子随海拔升高并没有发生显著变化。LaMarche Jr(1974a)以及 Hughes and Funkhouser(2003)开展了不同海拔高度树木径向生长对气候因子在不同频率方面的响应研究。他们的研究一致认为,在高频上该区域下限树木的径向生长受到前一年夏季、秋季以及当年春季降水的影响。以上研究表明,对于干旱区而言,由于降水较少,树木径向生长的主要限制因子多为降水,但也有研究表明在林线附近的一定海拔高度范围内限制因子为生长季的温度。例如,

LaMarche Jr(1974b)在蛇山地区(The Snake Range)对狐尾松(*Pinus longaeva*)研究中指出:在高海拔处,降水较多而温度较低,光合作用主要集中在夏季,夏季温度较高可以促进光合作用,增加光合作用的产物,因而夏季温度对上限树木的生长起着决定性的作用。早期不同海拔梯度的树木径向生长对气候要素响应的研究多为沿海拔梯度的响应趋势的研究,并没有对某一气候要素响应敏感的海拔高度予以严格的界定。为此,Salzer et al(2009)对上限及其以下的树木生长与气候要素关系进行了对比研究,并对上限的树木对温度响应的海拔高度范围予以界定。他们认为:仅上限 150 m 以内的树木的主要限制因子为生长季的温度,而此高度以下的树木的生长都与春季的降水紧密相关,与温度的关系甚微。综上所述,美国中西部高原地区的这些研究表明,在这一区域树木径向生长的限制因子多为生长前季的降水,特别是春季降水。温度对树木径向生长的限制作用仅局限于树线以下一定高度范围之内。

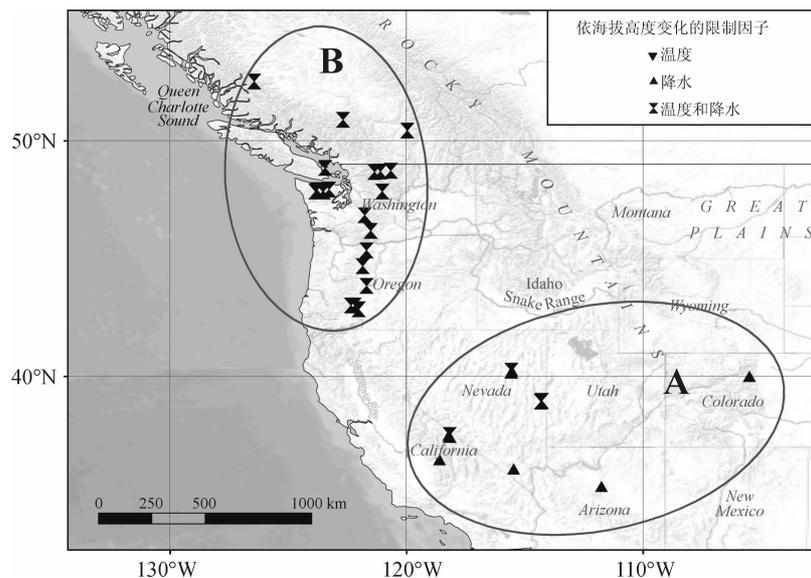


图2 北美不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应研究样点分布图

(其中,A圈代表美国中西部干旱区,B圈代表北美西部北纬40°以北沿海夏干型海洋性气候区;本文图例统一使用倒立三角代表限制因子为温度,正三角代表的限制因子为降水,两者合起来代表限制因子上限为温度而下限为降水)

Fig. 2 Sample sites of the research on radial growth response to climatic factors at different altitudes in North America

## 2.2 以欧洲中部为代表的大陆性气候区

图3显示了欧洲地区不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应研究样点的分布状况,并将其划分为以欧洲中部为代表的大陆性气候区和以欧洲西

部为代表的湿润气候区。在欧洲中部,冬季寒冷,夏季较热,雨量集中于夏季,具有大陆性气候的特征。Dittmar and Elling(1999)在德国南部的研究表明:在海拔600 m以下,树木生长的主要限制因子为降

水;而在 600 ~ 800 m, 树木的径向生长与气候因子的关系较微弱, 限制因子并不明显; 在高于 800 m 处的样点, 树木的径向生长与生长季的温度相关较显著。为了进一步了解环境变化对不同气候和环境条件下树木生长的影响, Dittmar et al (2003) 在上述研究基础上, 又对欧洲多个地点的山毛榉 (*Nothofagus genus*) 进行研究。其研究结果显示, 在德国的南部, 低海拔处山毛榉径向生长主要与 6、7 月的降水正相关, 限制因子为生长季的降水; 而在高海拔处与气候因子的关系恰恰相反, 较高的温度以及较少的降水的气候条件组合更适合山毛榉的径向生长。在西班牙, 低海拔处 (930 m) 树轮宽度的年表与 6 月的温度负相关, 与 6 月的降水正相关, 在 1170 m 处的年表与生长季温度正相关, 而与生长季降水负相关。为了比较树木生长变化及其影响因子的时空差异, Makinen et al (2002) 在德国西南部和东部对挪威云杉 (*Picea abies*) 进行了研究, 结果表明: 在中频上, 树木生长对不同气候要素的响应随海拔以及地区的变化而变化; 但在高频上, 两地区的响应较一致, 均呈现低海拔处树木径向生长与夏季的温度负相关, 与夏季降水正相关; 而在高海拔处, 树木径向生长则与夏季的温度正相关, 与夏季降水负相关。Meyer and Braker (2001) 在瑞士阿尔卑斯山地区通过对挪威云杉的研究发现, 位于高海拔处的树轮宽度年表与 6、7 月温度正相关; 低海拔处树轮宽度年表与 6、7 月温度负相关, 与 4—6 月的降水正相关, 但并不显著。同时他们还强调立地条件是树木径向生长对气候要素响应模式的最主要影响因子。Affolter et al (2010) 则指出, 海拔位置高于 1450 m 的树木径向

生长主要受生长季的温度限制, 对干旱的敏感性较低; 而在低于海拔 1000 m 处的树木与 6 月的降水以及 scPDSI 显著正相关, 树木的生长限制因子为土壤的湿度。不同的树种对干旱响应的敏感度会有差异, 但其生长限制因子较一致。Leal et al (2007) 在奥地利境内的阿尔卑斯山区的研究表明, 低海拔处的树木主要受春、夏季降水的影响, 而高海拔处的树木主要受生长季温度的影响。仅在生态幅的边界地带的树木对某一气候要素较敏感, 而中间海拔的树木与相应的气候要素没有明确的关系。Di Filippo et al (2007) 对分布于意大利、斯洛文尼亚、奥地利, 海拔介于 200 ~ 1500 m 的山毛榉进行的研究也表明: 低海拔地区 (200 ~ 800 m) 以地中海气候为主, 年表主成分与 6—7 月的降水正相关, 与 6—7 月的温度负相关, 夏季干旱是树木径向生长的主要限制因子; 高海拔 (> 1300 m) 的年表与 5 月温度正相关, 与降水负相关, 生长季前期温度为树木径向生长的主要限制因子; 而中间海拔 (800 ~ 1200 m) 的树木与气候因子的关系并不显著。Jump et al (2007) 对西班牙东北部山毛榉的研究显示: 在高海拔处的树木径向生长与 4—7 月的温度正相关, 低海拔处的树木径向生长与 4—7 月的温度负相关, 降水是下限树木的主要限制因子。综上所述, 在欧洲中部, 海拔高度对树木径向生长与气候要素之间关系影响较大, 一般而言, 较高海拔处的树木径向生长主要受生长季温度的限制, 而海拔较低处的树木径向生长的限制因子为夏季的降水, 其中 6 月份的降水对该区域树木径向生长作用较突出, 中间海拔的树木径向生长与气候要素的关系并不显著。

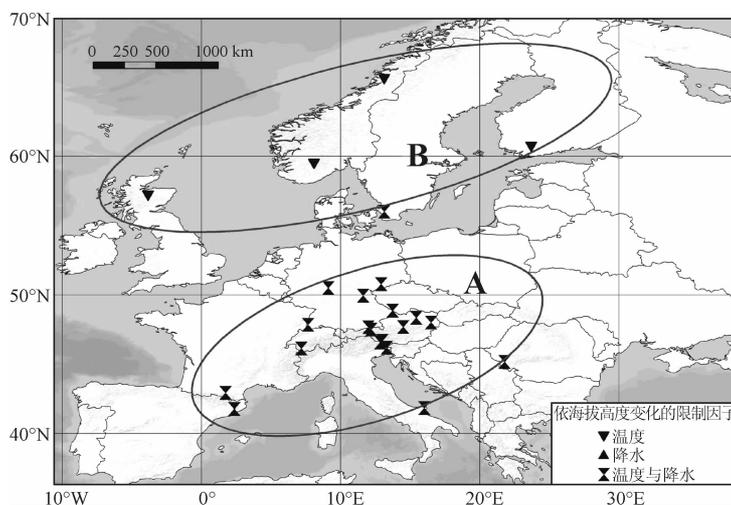


图3 欧洲不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应研究样点分布图  
(其中, A 圈代表欧洲中部大陆性气候区, B 圈代表欧洲西部湿润气候区)

Fig. 3 Sample sites of the research on radial growth response to climatic factors at different altitudes in Europe

### 2.3 以欧洲西部以及大洋洲为代表的湿润气候区

欧洲西部冬暖夏凉,年温差小,全年有雨,且冬雨较多,全年没有干季,属于温带海洋性气候。斯堪的纳维亚半岛(Scandinavian Peninsula)西部地区属海洋性气候,夏季凉爽湿润、冬季温和多雪;半岛东部及邻近地区由于受中部山脉对北大西洋暖流的屏障阻碍作用,属寒温带气候。由于两个地区都较湿润,树木对气候要素响应的研究结果也较一致。如,Grace and Norton(1990)通过对英格兰海拔介于270~600 m的樟子松(*Pinus Sylvestris*)的径向生长与气候要素的关系进行的研究。相关分析显示,7、8月份的温度是限制树木径向生长的主要原因,冬季晚期(1、2月)的温度对树木的径向生长也有一定的影响。相比而言,温度对树木生长的限制作用要大于降水,即使是在低海拔处。Makinen et al(2002)在挪威南部的研究表明,在高频上,在高海拔处树木的径向生长与春季、夏季的温度正相关,由于降水与地表温度的关系成反比,其与夏季的降水反相关;在芬兰境内的研究结果与挪威境内的相同。Andreassen et al(2006)对遍布挪威境内588个样点的研究表明,低海拔处的树木主要受6月份降水的限制,而高海拔的树木主要受6月份温度的限制。树木生长对6月份温度的响应存在着一个12~13℃阈值范围,相应的海拔高度为400~500 m;在挪威南部,如果6月份温度未超过阈值,树木适宜生长在温暖以及干旱环境;如若6月份温度超过阈值,树木则适宜生长在相对冷湿的环境中。总之,综合欧洲西部以及纬度较高的斯堪的纳维亚半岛以及邻近区域的研究(如图3所示)表明:在海拔较高的地方,树木径向生长的主要限制因子为生长季的温度,冬季的温度对该区域的树木径向生长也有一定的影响;由于降水丰富,下限树木径向生长的限制因子并不明显。

对位于大洋洲的澳大利亚的东南沿海以及新西兰而言,冬季温和湿润,夏季相对温暖干燥,四季差别不大,属于温带海洋性气候。该区域关于树木径向生长对气候要素响应随海拔梯度变化的研究的样点分布如图4所示。其中,Buckley et al(1997)对澳大利亚塔斯马尼亚省(Tasmania)胡恩松(*Lagarostrobos franklinii*)的研究表明,在海拔高度700 m以上的树木径向生长受到生长季温度的强烈影响;虽然700 m以下的树木径向生长与生长季的温度正相关,但湿度对树木生长的限制仍然弱于温度。总体而言,生长季的温度对树木径向生长的限

制作作用随着海拔高度的增加而增强。Brookhouse and Bi(2009)在澳大利亚本土东南沿海的研究显示,树木分布最高处的年表与春季(9—12月)的最高温显著正相关,树木分布最低处的年表与晚夏以及早秋降水显著正相关,而中间海拔的年表与气候要素的关系都不显著。Norton(1984)在新西兰地区研究认为,虽然树木生长的位置海拔高度不一,但是温度特别是生长季的温度(1—3月)对树木的生长最重要。D'Arrigo et al(1998)发现不同海拔高度(244~1000 m)的树木径向生长均与生长季的温度显著正相关。Cullen et al(2001)在新西兰研究也显示,树限位置的树木径向生长主要限制因子为当年夏季的温度(1、2月)。综上所述,大洋洲湿润海洋气候区的研究结果与欧洲西部湿润区的研究结果相近,进一步表明,在南、北半球较为湿润、气候条件年际变化小的地区,树木径向生长的限制因子均为温度,海拔高度上的差异并不显著。

### 2.4 以北美西部北纬40°以北沿海地区为代表的夏干型海洋性气候区

虽然同属温带海洋性气候,在北美西部北纬40°以北的沿海地区,由于夏季受副热带高压影响,拥有相对暖干的夏季,其不同海拔高度树木径向生长对气候要素的响应与欧洲西海岸的研究结果存在一些差异。例如,Ettl and Peterson(1995)在美国华盛顿州奥林匹克山(the Olympic Mountains)对亚高山带冷杉(*Abies lasiocarpa*)的研究表明,多处地点的树木径向生长都与生长季的温度正相关;在高海拔以及潮湿的地方,树木的径向生长还与冬季温度反相关;而中间以及较低海拔较干样点的树木径向生长则受夏季降水限制。Peterson and Peterson(2001)的研究发现:在华盛顿州以及俄勒冈州北部高、中间海拔处铁杉(*Tsuga mertensiana*)径向生长与春季的积雪量成反比,与生长季温度显著正相关;而在低海拔处,生长季的降水成为其径向生长的主要影响因子。Peterson et al(2002)进一步的研究表明,该区域的亚高山带冷杉对气候因子的响应模式与铁杉的响应模式较一致。Case and Peterson(2005)对华盛顿州花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)的研究中指出,中低海拔处的年表与生长季的降水正相关,与生长季的最高温度负相关;高海拔的年表则与生长季的温度正相关并跟前一年冬季的PDO呈反相关;Case and Peterson(2007)的另一研究还显示黑松(*Pinus contorta*)径向生长的限制因子与花旗松的相同。在加拿大英属哥伦比亚省(British Columbia),

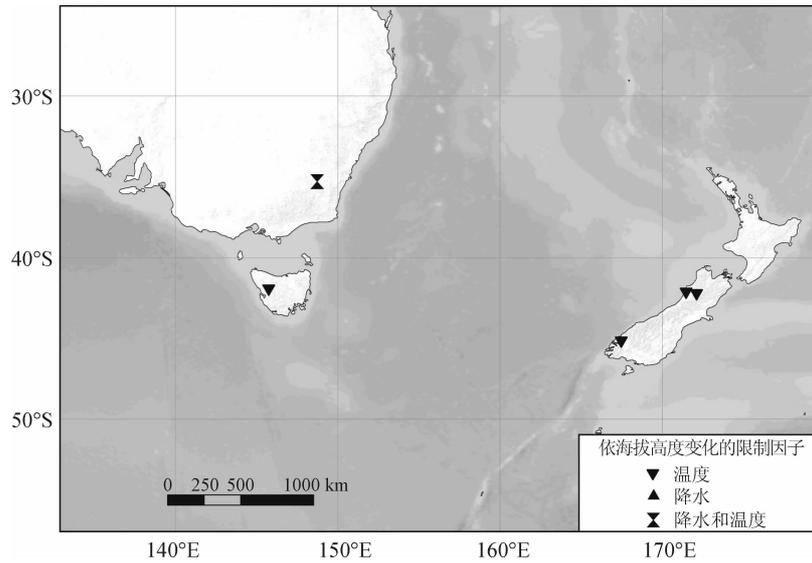


图4 大洋洲不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应研究样点分布图

Fig. 4 Sample sites of the research on radial growth response to climatic factors at different altitudes in Oceania

Splechtina et al (2000) 对亚高山冷杉, Zhang and Hebda (2004) 对花旗松以及 Lo et al (2010) 对多个树种的研究一致表明: 树木径向生长响应模式随着海拔高度的变化而变化, 在高海拔处树木径向生长受到生长季的温度的影响, 而在低海拔处, 生长季的降水是限制树木径向生长的主要气候因子。综上所述, 对美国西北部以及加拿大西南部的沿海区域 (如图2所示) 而言, 上限树木径向生长的主要限制因子为生长季的温度。尽管该区域降水较多, 但夏季降水相对较少, 在森林中部以及森林下限树木径

向生长仍受到生长季降水的制约; 且不同树种对气候要素的响应模式较一致。

### 3 国内关于树木径向生长对气候要素响应随海拔梯度变化的研究

我国针对不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应的研究工作主要集中在长白山地区, 天山、祁连山、柴达木盆地, 阿尼玛卿山, 横断山区、藏东南及相邻地区 (图5)。本文根据研究样点的分布状况, 分以下几个区进行介绍。

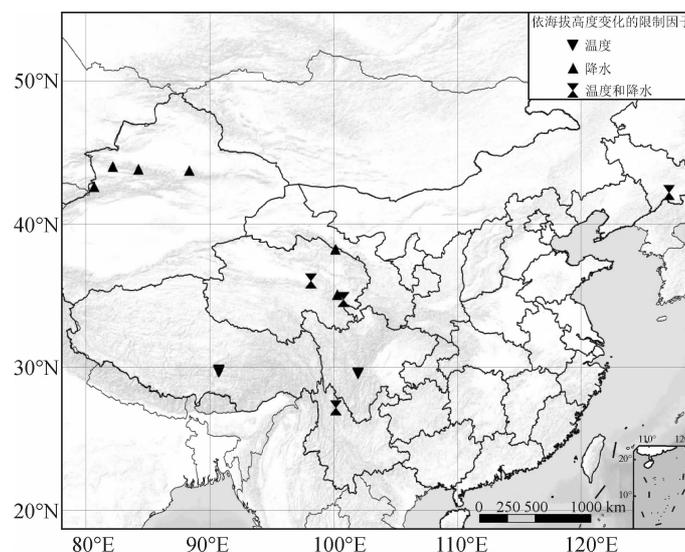


图5 中国不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应研究样点分布图

Fig. 5 Sample sites of the research on radial growth response to climatic factors at different altitudes in China

### 3.1 干旱区

天山横贯我国的新疆地区,冬季比较寒冷,夏季比较干燥,山地气候明显。其南部为塔里木盆地,北部为准噶尔盆地,周围地区气候较为干旱。袁玉江和李江风(1994)在天山西部通过对雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)的研究认为,3月、5—6月的降水是其生长的制约因素,特别是5—6月降水的影响更为明显。朱海峰等(2004)则认为,坡向不同,限制树木径向生长的气候因子不同。其研究发现:在南天山北坡下限,雪岭云杉径向生长与前一年11月至当年1月平均最低温度呈显著正相关;而降水是北天山南坡森林下限树木径向生长的限制因子,其中7、8月份降水的影响尤为显著,森林下限树木径向生长对气候要素的响应强于森林上限。在天山中部,Wang et al(2005)研究则显示,森林下限年表与前一年8月以及当年4、5月的降水正相关,与6、7月的温度负相关;中间海拔的年表与当年5月以及前一年8月的降水正相关;而上限的年表与前一年8月的降水以及当年2月温度正相关。郭允允等(2007)结合李江风(1989)的研究指出,天山中部树木径向生长主要受由降水不足引起的干旱制约,仅在接近林线处,低温的限制作用才表现出来。

祁连山位于青藏高原的最北端,是盛行西风与东亚季风的交界地带,降水量相对稀少,气候较干旱。王亚军等(2001)研究指出,春季降水是祁连山中、东段青海云杉(*Picea crassifolia*)径向生长的限制因子。勾晓华等(2004)在此研究的基础上,又增加了更高的上限的样点。研究也显示,该区域树木生长的限制因子是春季降水。随着海拔高度的增加,降水增加,因而降水对上限的树木的胁迫作用降低。并呈现出森林下限的树木敏感性最高,而上限树木敏感性最低的现象。

柴达木盆地山地具有寒、旱的气候特征。郑永宏等(2008)在柴达木盆地的东部边缘研究表明,在森林上限,树木径向生长主要与7月份的温度正相关,对前一年7、8月份的温度变化也有较明显正响应;其他各样点,包括水分条件相对较好的凹地,树木径向生长均与6月份的降水正相关。

### 3.2 湿润区

Liang et al(2010)对青藏高原南部色季拉山的山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)的研究认为,该区域受南亚季风的影响,降水较丰富,对山急尖长苞冷杉而言,7月的最低温度成了最主要的限制因子。随着海拔高度的不同,降水与温度分配都随之变化,但是该地的树木径向生长对气候的响

应却并没有沿着海拔梯度的变化而呈现出规律性的变化。这可能是因为该地降水相对较多,降水限制作用不明显所造成的。

贡嘎山位于四川省康定以南,夏季受南亚季风的影响,降水丰沛,冬季主要受西风环流的影响,雨水较少,属温带高原型气候。段建平等(2010)的研究指出,森林上限(3700 m)的轮宽指数与当年7月份平均温度呈显著正响应,与降水的响应关系不显著;3550 m处的轮宽指数与7月分的温度正相关,但不显著;而在3100 m以及3050 m处的轮宽指数都与当年3月份温度显著正相关;在海拔2800 m处轮宽序列与气温、降水都不能达到显著响应,气候因子对树木径向生长没有明显的限制作用。

对横断山区而言,夏季受南亚夏季风影响,温暖湿润;冬季受亚洲高原季风的影响,气候相对冷且干燥。Fan et al(2009)的研究表明,生长在高海拔及中海拔处的树木对冬季的低温比较敏感;在低海拔处春季的降水是树木生长的限制因子;在横断山区高中海拔的针叶树种的生长受益于全球升温,特别是冬季温度的升高。

### 3.3 大陆性气候区

长白山位于我国的东北部,属于温带大陆性山地气候,冬季漫长寒冷,夏季短暂凉爽且天气变化无常,春季多风,秋季多雾。Yu et al(2006)对长白山地区鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)的研究指出,上限以及下限鱼鳞云杉年际生长变化较大,对气候的响应更敏感。相对于受降水影响较多的下限而言,上限树木受生长季的最低温度影响较多,而在林线的中部,树木主要受日照比的大小影响。

### 3.4 高寒半湿润地区

位于青海省东南部的阿尼玛卿山地区,属于高原亚寒带湿润半湿润气候。彭剑峰等(2007)和杨涛等(2010)对该区域祁连圆柏(*Sabina przewalskii* Kom.)的研究显示,低海拔的树木径向生长与5月的降水显著正相关,生长季前期的降水是其主要的限制因子;随着海拔高度的升高,5—7月的降水对树木的限制作用减弱;在高海拔处生长季(7月)温度是其主要的限制因子。彭剑峰等(2007)对青海云杉的研究则显示:其生长与前一年10月份月均温显著正相关,与前一年8月和当年5、6月份月均温显著负相关;与前一年9、10月和当年5月的降水量都呈显著正相关。该地区低海拔处的青海云杉径向生长受温度、降水的影响要比高海拔处的更显著,不同于该区域祁连圆柏在森林上下限的生长模式。

综上所述:国内开展的一些不同海拔高度上的

树木径向生长与气候要素的关系研究与国际上的相应研究结论有许多相似之处。如在我国西部干旱地区森林下限树木径向生长的主要限制因子为降水,由于降水随着海拔高度的增加而增加,上限树木的限制因子并不显著。在较湿润的藏东南地区,树木径向生长的主要限制因子为生长季温度,对降水的响应并不明显;同样为湿润地区的横断山区,由于冬季受亚洲高原季风的影响,气候相对冷且干燥,上限树木径向生长受冬季温度的限制。对具有大陆性气候的东北地区而言,受季风影响,上限树木的主要限制因子为生长季的温度,而下限为生长季的降水。

#### 4 小结

国内外基于不同海拔梯度的树木径向生长与气候要素的关系已展开了大量细致的研究工作。其中欧美等国家地区的研究工作较集中:已经由较单一的海拔高度响应的差异研究,发展到对某一气候要素响应的海拔高度的严格限定研究;在研究方法上,已由单纯的相关分析,扩展到采用不同频率上的响应对比分析。综合前述不同气候区内的研究成果,发现在相同及相似气候区内,树木径向生长对气候要素的响应随海拔高度变化的趋势较一致。随着海拔高度的升高,限制树木生长的气候因子往往会有所不同。胁迫作用越强的地方如森林的上部边界以及下部边界,树木对某一气候要素的响应越敏感。一般而言,森林的上限树木径向生长往往与气温密切相关,森林下限树木径向生长与降水密切相关。在十分干旱的地区,上述结论却不一定适用,往往呈现出无论森林上、下限均主要受降水的影响,如美国西部的干旱区;在水分条件较为充足的地区,亦会出现无论森林上、下限,树木径向生长均与气温的变化显著相关,如欧洲西部的湿润气候区。综合同一气候区内不同学者利用不同树种研究结果表明,树木生长主要是受当地局域气候的影响,不同树种对气候要素响应随海拔高度变化趋势的差异并不明显。

#### 5 研究展望

从目前研究结果看,不同海拔高度树木径向生长对气候要素的响应会有所差异,不同气候区内树木径向生长对气候要素的响应随海拔高度变化的趋势也不同。不同气候区不同海拔高度的树木径向生长对气候要素响应研究的广泛开展,加深了我们对树木径向生长—气候要素关系的理解,较明确地指示了不同海拔高度树木径向生长所指示的气候意义,为不同目的的树轮研究工作的开展提供了参考

信息。与国际研究相比,作者认为国内研究在以下几个方面需要加强:

##### 5.1 加强相同以及临近气候区内不同树种响应的对比研究

由于受研究区内地形、坡度等因素的影响,与国外研究相比,国内现有的研究显示不同树种对气候要素的响应随海拔高度变化的模式差异较大,易混淆我们对不同气候区域不同海拔高度树木径向生长—气候关系的理解。为此,应加强相同以及临近气候区内不同树种响应的对比研究。

##### 5.2 进一步深化气候要素响应敏感高度的界定研究

北美干旱区关于树木径向生长对气候要素的响应敏感高度的界定研究,对辨识树木径向生长指示的气候意义以及可靠的气候要素的重建有着重要的指导作用。国内所开展的多为随海拔梯度变化的响应趋势研究,但对某一气候要素响应敏感海拔高度严格界定的研究仍还没有开展。近年来在全国范围内树轮学者进行了大量的气候重建工作,所重建的气候要素也不尽相同,在此基础上有必要对不同区域不同海拔高度的树木径向生长所指示的气候意义进行系统的梳理。因此,在开展不同海拔高度的树木径向生长对气候要素的响应研究的同时,应进一步深化气候要素响应敏感高度的界定研究。

##### 5.3 开展不同频率上的气候要素响应对比研究

通过不同频率上响应的对比研究,可以更深入地了解不同海拔高度树木径向生长与气候要素的关系,探讨不同海拔高度的响应差异是否是受非气候因素的影响,还是同时受不同的气候因素的影响,或是以不同的方式响应同一气候要素等问题。因此,为利于树木—气候关系的认识,并为更多的树轮研究工作提供信息参考,不同海拔高度不同频率上的树木径向生长对气候要素响应的对比研究也有待于进一步开展。

#### 参考文献

- 段建平,王丽丽,徐岩,等. 2010. 贡嘎山东坡不同海拔高度树轮宽度对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 21(11): 1940—1949. [Duan J P, Wang L L, Xu Y, et al. 2010. Responses of tree-ring width to climate change at different elevations on the east slope of Gongga Mountains[J]. *Geographical Research*, 21(11): 1940—1949.]
- 勾晓华,陈发虎,杨梅学,等. 2004. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化[J]. *生态学报*, 24(1): 172—176. [Gou X H, Chen F H, Yang M X, et al. 2004. Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian

- Mountains at different elevation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 24(1): 172–176.]
- 郭允允, 刘鸿雁, 任 估, 等. 2007. 天山中段树木生长对气候垂直梯度的响应[J]. *第四纪研究*, 27(3): 322–331. [ Guo Y Y, Liu H Y, Ren J, et al. 2007. Responses of tree growth to vertical climate gradient in the middle section of the Tianshan Mountains [ J ]. *Quaternary Sciences*, 27(3): 322–331. ]
- 李江风. 1989. 新疆年轮气候年轮水文研究[M]. 北京:气象出版社, 1–192. [ Li J F. 1989. Studies of dendroclimatology and dendrohydrology in Xinjiang [ M ]. Beijing: China Meteorological Press, 1–192. ]
- 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 2007a. 阿尼玛卿山地祁连圆柏径向生长对气候的响应[J]. *地理学报*, 62(7): 742–752. [ Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. 2007a. Horizontal variations of climate responses of Qilian Juniper (*Juniperus przewalskii*) in the Anyemaqen Mountains [ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 62(7): 742–752. ]
- 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 2007b. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉(*Picea crassifolia*)树轮生长特性及其对气候的响应[J]. *生态学报*, 27(8): 3268–3276. [ Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. 2007b. Characteristics of ring-width chronologies of *Picea crassifolia* and their responses to climate at different elevations in the Anyemaqen Mountains [ J ]. *Acta Ecologica Sinica*, 27(8): 3268–3276. ]
- 王亚军, 陈发虎, 勾晓华, 等. 2001. 祁连山中部树木年轮宽度与气候因子的响应关系及气候重建[J]. *中国沙漠*, 21(2): 135–140. [ Wang Y J, Chen F H, Gou X H, et al. 2001. Study on response relationship between tree-ring and climate factors and climate reconstruction in middle region of Qilianshan Mountains [ J ]. *Journal of Desert Research*, 21(2): 135–140. ]
- 杨 涛, 勾晓华, 李颖俊, 等. 2010. 青藏高原东北部树轮海拔梯度研究的散点图分析应用[J]. *冰川冻土*, 32(2): 429–437. [ Yang T, Gou X H, Li Y J, et al. 2010. Scatter plot and linear regression applied in the tree-ring elevation gradient analysis in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [ J ]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(2): 429–437. ]
- 袁玉江, 李江风. 1994. 天山西部云杉林年轮气候生长量与气候的关系[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 11(4): 93–98. [ Yuan Y J, Li J F. 1994. The relationships between tree-ring climate growth of spruce forest and climate in the west part of Tianshan Mountain [ J ]. *Journal of Xinjiang University*, 11(4): 93–98. ]
- 郑永宏, 梁梁源, 朱海峰, 等. 2008. 不同生境祁连圆柏径向生长对气候变化的响应[J]. *北京林业大学学报*, 30(3): 7–12. [ Zheng Y H, Liang E Y, Zhu H F, et al. 2008. Response of radial growth of Qilian juniper to climatic change under different habitats [ J ]. *Journal of Beijing Forestry University*, 30(3): 7–12. ]
- 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 等. 2004. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 59(6): 863–870. [ Zhu H F, Wang L L, Shao X M, et al. 2004. Tree ring-width response of *Picea schrenkiana* to climate change [ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 59(6): 863–870. ]
- Affolter P, Büntgen U, Esper J, et al. 2010. Inner Alpine conifer response to 20th century drought swings [ J ]. *European Journal of Forest Research*, 129(3): 289–298.
- Andreassen K, Solberg S, Tveit O E, et al. 2006. Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway [ J ]. *Forest Ecology and Management*, 222(1–3): 211–221.
- Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H, et al. 1995. Unusual twentieth-century summer warmth in a 1,000-year temperature record from Siberia [ J ]. *Nature*, 376: 156–159.
- Brookhouse M T, Bi H. 2009. Elevation-dependent climate sensitivity in *Eucalyptus pauciflora* Sieb. ex Spreng [ J ]. *Trees-Structure and Function*, 23(6): 1309–1320.
- Buckley B M, Cook E R, Peterson M J, et al. 1997. A changing temperature response with elevation for *Lagarostrobos franklinii* in Tasmania, Austurlia [ J ]. *Climatic Change*, 36(3): 477–498.
- Case M J, Peterson D L. 2005. Fine-scale variability in growth climate relationships of Douglas-fir, North Cascade Range, Washington [ J ]. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(11): 2743–2755.
- Case M J, Peterson D L. 2007. Growth-climate relations of lodgepole pine in the North Cascades National Park, Washington [ J ]. *Northwest Science*, 81(1): 62–75.
- Cullen L E, Palmer J G, Duncan R P, et al. 2001. Climate change and tree-ring relationships of *Nothofagus menziesii* tree-line forests [ J ]. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere*, 31(11): 1981–1991.
- D'Arrigo R D, Cook E R, Salinger M J, et al. 1998. Tree-ring records from New Zealand: long-term context for recent warming trend [ J ]. *Climate Dynamics*, 14(3): 191–199.
- Di Filippo A, Biondi F, Cufar K, et al. 2007. Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network [ J ]. *Journal of Biogeography*, 34: 1873–1897.
- Dittmar C, Elling W. 1999. Radial growth of Norway spruce and European beech in relation to weather and altitude [ J ]. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 118(4): 251–270.
- Dittmar C, Zech W, Elling W. 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study [ J ]. *Forest Ecology and Management*, 173(1–3): 63–78.
- Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability [ J ]. *Science*, 295: 2250–2253.

- Ettl G J, Peterson D L. 1995. Growth response of subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) to climate in the Olympic Mountains, Washington, USA [J]. *Global Change Biology*, 1 (3): 213–230.
- Fan Z X, Brauning A, Cao K F, et al. 2009. Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains, southwestern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 258(3): 306–313.
- Fritts H C, Smith D G, Cardis J W, et al. 1965. Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in Northern Arizona [J]. *Ecology*, 46(4): 393–401.
- Fritts H C. 1976. *Tree Rings and Climate* [M]. New York, Academic press, 1–567.
- Grace J, Norton D A. 1990. Climate and growth of *Pinus sylvestris* at its upper altitudinal limit in Scotland: evidence from tree growth-rings [J]. *Journal of Ecology*, 78 (3): 601.
- Hughes M K, Funkhouser G. 2003. Frequency-dependent climate signal in upper and lower forest border tree rings in the mountains of the Great Basin [J]. *Climatic Change*, 59 (1–2): 233–244.
- Hughes M K. 2002. Dendrochronology in climatology—the state of the art [J]. *Dendrochronologia*, 20: 69–78.
- Jump A S, Hunt J M, Penuelas J. 2007. Climate relationships of growth and establishment across the altitudinal range of *Fagus sylvatica* in the Montseny Mountains, northeast Spain [J]. *Ecoscience*, 14(4): 507–518.
- Kienast F, Schweingruber F H, Braker O U, et al. 1987. Tree-ring studies on the conifers along ecological gradients and the potential of single-year analyses [J]. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere*, 17(7): 683–696.
- LaMarche Jr V C. 1974a. Frequency-dependent relationships between tree-ring series along an ecological gradient and some dendroclimatic implications [J]. *Tree-Ring Bull*, 34: 1–20.
- LaMarche Jr V C. 1974b. Paleoclimatic inferences from long tree-ring records [J]. *Science*, 183: 1043–1048.
- Leal S, Melvin T M, Grabner M, et al. 2007. Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate [J]. *Boreas*, 36(4): 426–440.
- Liang E Y, Wang Y F, Xu Y, et al. 2010. Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Trees-Structure and Function*, 24(2): 363–373.
- Lo Y H, Blanco J A, Seely B, et al. 2010. Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada [J]. *Forest Ecology and Management*, 259(5): 932–942.
- Makinen H, Nojd P, Kahle H P, et al. 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe [J]. *Forest Ecology and Management*, 171 (3): 243–259.
- Mann M E, Zhang Z, Hughes M K, et al. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia [J]. *PNAS*, 105(36): 13252–13257.
- Meyer F D, Braker O U. 2001. Climate response in dominant and suppressed spruce trees, *Picea abies* (L.) Karst., on a subalpine and lower montane site in Switzerland [J]. *Ecoscience*, 8(1): 105–114.
- Norton D A. 1984. Tree-growth-climate relationships in subalpine *Nothofagus* forests, South Island, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Botany*, 22(4): 471.
- Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (5): 1633–1644.
- Peterson D W, Peterson D L, Ettl G J. 2002. Growth responses of subalpine fir to climatic variability in the Pacific Northwest [J]. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere*, 32(9): 1503–1517.
- Peterson D W, Peterson D L. 2001. Mountain hemlock growth responds to climatic variability at annual and decadal time scales [J]. *Ecology*, 82(12): 3330–3345.
- Salzer M W, Hughes M K, Bunn A G, et al. 2009. Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(48): 20348–20353.
- Shao X, Xu Y, Yin Z Y, et al. 2010. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 29(17–18): 2111–2122.
- Splechtna B E, Dobry J, Klinka K. 2000. Tree-ring characteristics of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.) in relation to elevation and climatic fluctuations [J]. *Annals of Forest Science*, 57(2): 89–100.
- Wang T, Ren H B, Ma K P. 2005. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China [J]. *Trees-Structure and Function*, 19(6): 735–741.
- Yu D P, Wang Q L, Wang G G, et al. 2006. Dendroclimatic response of *Picea jezoensis* along an altitudinal gradient in Changbai Mountains [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 49: 150–159.
- Zhang Q B, Hebda R J. 2004. Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga menziesii* on the central coast of British Columbia, Canada [J]. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere*, 34 (9): 1946–1954.