

青藏高原东北部阿尼玛卿山祁连圆柏年龄结构与林线动态分析及其对气候变化的响应

张 芬,高琳琳,苏军德,邓 洋,勾晓华

(兰州大学 西部环境教育部重点实验室,西部环境与气候变化研究院,兰州 730000)

摘 要:近百年来全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化,但不同的生态系统对全球变暖如何响应是一个值得深入研究的问题。本研究选取阿尼玛卿山区三个坡面(YYC\HBS\HHB)以及林线处的祁连圆柏,利用树轮生态学方法来研究树木更新以及林线动态与气候变化之间的关系。通过对三个坡面以及各坡面的上限圆柏的年龄结构以及林线动态分析发现:自14世纪末期开始,YYC坡面树木便处于不断的更新之中;15世纪末期以来HBS坡面树木开始更新;HHB坡面从18世纪末期开始才有树木更新;YYC坡面树木更新出现了1550—1650年和1800—1900年两个高峰期;HBS坡面和HHB坡面的树木更新只有1800—1900年一个高峰期;三个坡面上限圆柏的更新都只有一个高峰期:1800—1900年。近百年没有显著的更新是由于没有采集小树,因此本文没有讨论近百年的树木更新。树木平均年龄随着海拔的升高而不断减小,表明近200年来树木的更新和林线向高海拔迁移在本研究区体现很明显。树木年龄更新变化通过与重建的中国温度(Yang et al, 2002)和北半球温度(D'Arrigo et al, 2006)对比发现,阿尼玛卿山树木更新变化与升温关系密切,这表明温度可能是研究区树木更新的一个决定因素。

关键词:青藏高原;树木年轮;年龄结构;林线动态;气候变化

中图分类号: S718.53; P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2012)03-881-08

Age structure and treeline dynamics of *Juniperus przewalskii* Kom. in response to climate change in the Anyemaqen Mountains, Northeastern Tibetan Plateau

ZHANG Fen, GAO Lin-lin, SU Jun-de, DENG Yang, GOU Xiao-hua

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education),

Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Alpine forests are particularly prone to temperature change and warrant special consideration. The responses of treeline environments to climate change were examined in the Anyemaqen Mountains, northeastern Tibetan Plateau, employing age structure and average age of the trees from three *Juniperus przewalskii* Kom (Qilian juniper) slopes (YYC, HBS, and HHB). The age structure analysis results showed that the *J. przewalskii* forest growing appeared at the end of 14th century on YYC slope, at the end of 15th century on HBS slope and at the end of 18th century on HHB slope. The appearance of trees at the upper treeline limit dates to different periods. There was one recruitment peak during the period 1800—1900 on three slopes and upper limit sites. Tree regeneration and treeline dynamics coincide well with air temperature. The average age of trees declined with increasing altitude on the YYC and HHB slopes, which demonstrated that trees at higher elevations have established later than lower elevations and the treeline advancing upslope in research area. The low limit sites beside the road on the HBS slope, so

收稿日期:2012-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41171039);国家自然科学基金创新群体项目(40721061);国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB421306);中国科学院项目(290827B11);高等学校学科创新引智计划(B06026)

通讯作者:勾晓华, E-mail: xhgou@lzu.edu.cn

there was human disturbance on this slope, which appearance the different average age trend from other two sides. The results of this work indicate that higher air temperatures will increase tree numbers along treeline in this mountainous region of China that likely will alter the forest age structure and forest-climate interactions and feedbacks of the treeline ecosystem in the future. What is more, human disturbance was also mainly reason which affected the tree germination and tree line dynamics.

Key words: dendrochronology; tree-ring; age structure; treeline dynamics; climate change

近百年来全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化。气候变化已经成为当今科学界、各国政府和社会公众普遍关注的问题之一。不同生态系统对全球变化的响应是一个重大的科学问题。尤其是生态系统较为脆弱、对环境变化较为敏感的地区,例如地处中国西北,位于青藏高原东北部的黄河源区。鉴于生物圈与大气圈之间的重要反馈,应该加强森林生态系统动态变化以及树木生长对气候变化响应的研究(Ruddiman, 2000)。

森林生态系统的动态变化诸如:年龄结构、树木更新以及林线变化受多种因素的影响(Taylor et al, 1996; North et al, 2004)。树木年轮气候学研究表明树木生长速率(Oberhuber et al, 1998; Esper et al, 2002)、树木更新(Mäkinen et al, 2001; Liang et al, 2003)、森林火灾(Westerling et al, 2006)以及沿纬度和海拔梯度的林线动态变化(Briffa et al, 1990; Esper and Schweingruber, 2004)都受气候变化的影响。森林年龄结构指的是森林中树木数量按年龄分布的状况,它是反映种群过去和现在更新状况的一个重要指标(Agren and Zackarisson, 1990)。Kullman(1981)对北半球极地森林和高山林线的调查研究发现,树木年龄结构和更新速率与二十世纪气温变化之间关系密切;Kullman(2005)在对瑞士南部的研究中发现,在过去近50年中,树木种群密度不断增大,并且超过了过去1000年的最高水平,同时也发现在气候寒冷的小冰期阶段,树木更新处于一个很低的水平。

高山林线作为森林上限和冰原冻土的过渡带,对气候变化敏感(Camarero and Gutiérrez, 2004; 崔海亭等, 2005),诸多研究(Kullman, 1998; 王晓春等, 2004)表明温度对林线处树木生长起着至关重要的作用。一些关于高山林线树木生长和更新的研究认为,高山林线可以作为近年来气候变暖的探测器(Tranquillini, 1979; Payette and Filion, 1985; Slatyer and Noble, 1992)。利用树轮生态学研究森林动态变化(Harcombe, 1987; Tessier et al, 1997; Paulsen et al, 2000)已经成为全球变化研究的主要方法之一。但在中国利用树轮生态学手段来研究森

林生态系统动态变化的研究工作才刚刚开始,Fang et al(2009)发现20世纪北半球温度的升高是祁连山中部地区的林线上升和树木更新的主要原因;Wang et al(2006)在天山的研究中也发现树木的更新与温度有很大的关系;Dang et al(2010)对比了秦岭南北坡冷杉林的动态变化,研究表明海拔梯度、地形和坡向等环境因子是影响年龄结构和树木更新重要因素。

黄河源区对气候变化较为敏感,有大量的森林覆盖,生态系统较为脆弱;该区域森林生态系统对气候变化如何响应是十分值得关注的科学问题。目前在该区已经开展很多基于树木年轮对气候变化响应以及重建的研究(Gou et al, 2007, 2008a, 2008b; Peng et al, 2008a, 2008b, 2010),但关于森林年龄结构和林线动态的研究还未见发表。本研究利用采自3个坡面上的祁连圆柏树木年轮,采用树轮生态学方法研究年龄结构和林线动态变化对气候变化的响应,并尝试探讨引起林线变化的主要原因。

2 材料和方法

2.1 研究区概况

阿尼玛卿山地属于高原亚寒带湿润半湿润气候,平均海拔为4000~5000 m。研究区内年平均气温0.5~3.9℃,最暖月平均气温11.0~14.2℃,大于0℃期间的积温是1402.4~2006.0℃,年降水量477.4~621.1 mm,湿润系数为0.85~1.83(青海森林编辑委员会,1993),水热同期,尽管水资源丰富,但热量不足。林内结构比较简单,一般乔木层为单层纯林,郁闭度为0.3~0.5,立木尖削度大,林木低矮,林冠稀疏,透光度大。

本研究选取位于青海省玛沁县北部的羊玉林场和同德县河北林场的祁连圆柏。羊玉林场中部为原始林区,山高谷深,谷底宽阔,柏树残败腐朽心现象严重,林分密度较大,土层较薄,在此采集的样本标注为YYC。河北林场气候相对湿润,雨热同期,天然林主要分布在黄河干流两岸及附近的支流上。在河北林场选取两个典型坡面,一个位于河北乡南大约12 km处,标注为HBS,此处土壤湿度较大,除上

限树木稀疏外位于坡面海拔中间的两个样点树木较为密集。另一坡面位于河北乡东部大约8 km处,标注为 HHB,这里是西南坡,土壤相对干燥。样点分布如图 1 所示。

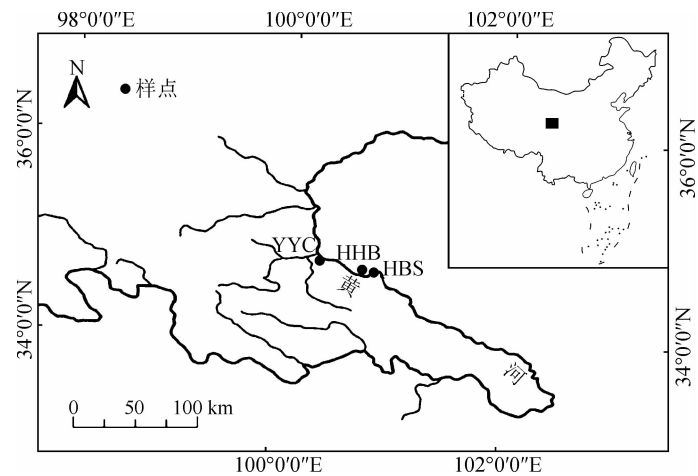


图 1 采样点示意图
Fig. 1 Map of locations of the sampling slopes (HHB, HBS and YYC) in the Anyemaqen Mountains

2.2 样本的获取

根据树轮气候学基本原理,严格按照树木年代学的取样方法 (Fritts, 1976; Cook and Kairiukstis, 1990) 分别在河北林场的东部 (HHB) 和南部 (HBS)、羊玉林场 (YYC) 选择了三个林带较宽的坡面,沿着海拔梯度进行了树轮样芯的采集工作。在采集过程中尽可能控制每个采样点的海拔范围,除

河北林场的东部 (HHB) 采用 20 m × 30 m 的样方外,其余都在相同坡面的一定高度范围内 (采样点内高差一般在 15 m 左右,带间高差大多在 50 ~ 100 m) 采样,每个坡面除上下限外,森林中部设 2 ~ 3 个采样点,每个样点至少 20 株树,通常每棵树在胸径高度的不同方向取两芯,并将每棵树的海拔高度标注在样芯管上,具体采样情况见表 1。

表 1 采样点基本信息
Table 1 Summary of the sampling locations

采样点标注代码	经纬度	海拔 (m)	样芯/株数	生境概况
HBS01	100°43'33"E, 34°43'32"N	3730	43/31	南坡沟谷,上部三个采样点是连续坡面,隔一条公路与下部采样点分开,上部采样点土壤湿度较大,树木较为密集,上限树木稀疏。
HBS02		3650	36/25	
HBS03		3580	38/30	
HBS04		3520	37/25	
HHBH	100°49'56"E, 34°42'42"N	3580	37/20	西南坡,相对干燥,林相稀疏,树种单一,林型简单,多丛生。
HHBMH		3500	34/22	
HHBM		3430	32/21	
HHBML		3360	25/14	
HHBL		3300	34/16	
YYCH	100°20'10"E, 34°48'01"N	3750 ~ 3845	32/27	东南坡,柏树较为密集,灌丛稀疏,土层深厚,坡度约 55°,盖度小,郁闭度大,上层森林相对稀疏,土层稍薄。
YYCMH		3635 ~ 3710	27/22	
YYCML		3450 ~ 3625	49/29	
YYCL		3350 ~ 3400	43/26	

2.3 数据分析

本文通过分别统计每个坡面以及每个坡面的上限即林线处所采集树芯树木的数量以及每棵树的年

龄来建立年龄结构表,进而进行树木更新以及林线动态变化的研究。
将所有祁连圆柏树轮样芯带回实验室,在自然

状态下干燥后,进行固定、打磨等预处理(Stokes et al,1968),然后利用“骨架示意图”法进行初步交叉定年;为确保定年的精确,对测量后的树轮样本序列值用 COFECHA 程序(Holmes,1983)和折线图进行定年质量检验,以保证所有样本定年准确无误。树轮宽度年表的建立是通过 ARSTAN 程序(Cook,1996)完成的。对于年龄较大的树来说,由于很多样芯接近但未到髓心,因此通过树木样芯统计的树木年龄和树木的实际年龄可能存在一定的误差。本研究对每个坡面的树木年龄进行分组统计,每间隔 10 年分为一组(比如,1110—1129 年为第一组,1130—1149 年为第二组(以此类推),然后再统计每一组中树木的样本数,以此来反映树木的更新状况。

为了研究树木年龄随着海拔梯度的变化,本研究对 3 个坡面不同海拔高度的树木样本分别进行了年龄统计,由于所采集祁连圆柏树轮样芯的年龄与树木实际年龄存在一定的误差,因此取 3 个坡面不同海拔上树木年龄的平均值来代表每一个海拔梯度树木的年龄水平,进而反映不同海拔梯度上树木的更新以及林线动态变化情况。

3 结果与讨论

3.1 阿尼玛卿山祁连圆柏的年龄结构分布

根据实地调查结果和坡面整体以及森林上限生态条件的特性,将阿尼玛卿山区两个林场的三个坡面的祁连圆柏分别从坡面以及上限的年龄结构变化情况进行讨论分析。阿尼玛卿山三个整体坡面以及三个坡森林上限祁连圆柏的年龄结构分布如图 2 所示。由图 2 可以看出,阿尼玛卿山三个坡面祁连圆柏年龄结构分布如下:从森林的三个整体坡面来看,自 14 世纪末期开始,YYC 坡面树木便处于不断的更新之中,YYC 坡面树木更新在 1550—1650 年和 1800—1900 年出现了两个高峰期;15 世纪末期以来 HBS 坡面树木开始更新,HBS 坡面树木更新在 1800—1900 年有一个高峰期;HHB 坡面从 18 世纪末期开始才有树木更新,HHB 坡面树木更新在 1800—1900 年有一个高峰期(图 2);由此可见,YYC 坡面祁连圆柏的树木更新出现两个高峰期,而 HBS 坡面和 HHB 坡面都只有一个高峰期,并且 YYC 坡面树木的年龄偏大。三个坡面森林上限的三个点祁连圆柏的年龄结构表现是:在 1800 年以前,YYC 坡面上限有三棵树木出现(图 2),HBS 坡面上限有两棵树木出现,HHB 坡面没有树木更新;在 1800 年之

后,三个坡面的上限均有大量树木更新(图 2)。在 1800 年之前,HBS 和 HHB 的整个坡面以及三个坡面的森林上限,祁连圆柏基本没有更新,YYC 坡面在 1800 年以前存在大量树木的更新,YYC 坡面的上限在 1800 年以前稍有更新(图 2 和图 3);但从 1800 年之后,三个坡面以及森林上限的点树木更新速率迅速加快,尤其上限树木的数量迅速增加(图 2)。由于当时采样没有采集年龄小的祁连圆柏树轮样芯,所以图 2 中没有显示 1950 年以后祁连圆柏树木的更新情况,即本文不讨论近百年树木更新情况。

综上所述,从不同坡面和森林上限树木年龄结构(图 2)中可以清楚的看到林线随时间的推移向高海拔爬升,并且通过计算表明 72% 以上的树木出现于 1800 年以后,树龄最大的圆柏出现在 14 世纪末期,并且在近千年以来,树木处于不断的更新变化之中,但在 1720 年以前,YYC 坡面有树木更新,HHB 坡面和 HBS 坡面树木的更新处在一个较低的水平;而从 1800 年开始以后,YYC、HBS 和 HHB 坡面祁连圆柏树木的更新速率明显加快,并且维持在一个较高水平。

3.2 林线动态变化

研究区祁连圆柏森林上限树木分布较下限相对稀疏,树冠为圆形,上限树木的年龄相对较小。从图 3 也可以清楚的看到随着海拔的升高,树木分布越来越稀疏,大致显现出树线向高海拔迁移的特征。可靠年表的平均序列长度随海拔升高变短,表明树木生长是沿着山坡逐渐向上迁移的(图 4)。从图 5 也可以看出,各个坡面海拔梯度上平均年龄随着海拔升高呈递减趋势。YYC 坡面随着海拔梯度的升高,树木平均年龄呈现出如下递减趋势:364.5 a→316.5 a→191.5 a→165.5 a,这种变化趋势可明显分为两个阶段,表明高海拔采样点树木可能是小冰期较冷时期过后温度回升引起树线向高海拔迁移的结果(彭剑峰等,2006)。而 HBS 坡面变化趋势(240 a→193 a→189 a→149 a)则更加清楚的印证了小冰期后林线向高海拔迁移的观点。HHB 坡面由于采样点海拔相对较低,树木年龄相对较小,变化趋势也没有 YYC、HBS 坡面那样的明显,但也基本反映了近 200 年来树木的更新变化。

总之,树木平均年龄随海拔分布(图 3、5)直观的反应了树木随海拔的变化趋势,随着海拔的升高,树木的平均年龄不断减小,尤其是最近的 200 年来,树木更新加快,并且向高海拔迁移。

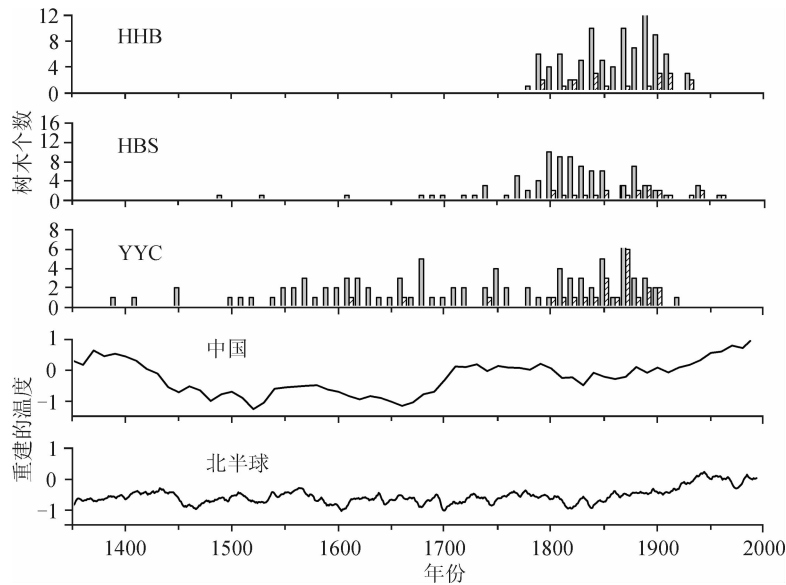


图2 三个坡面(HHB,HBS 和 YYC)树木年龄结构与重建的中国温度(Yang et al, 2002)和北半球温度(D'Arrigo et al, 2006)曲线对比

Fig. 2 Comparison of age structure variations of trees along the sites and at the treeline ecotones on HHB, HBS and YYC slopes (gray bars) and upper tree limit sites (twill bars) of the Anyemaqen Mountains with temperature variations in China (Yang et al, 2002) and Northern Hemisphere(D'Arrigo et al, 2006)

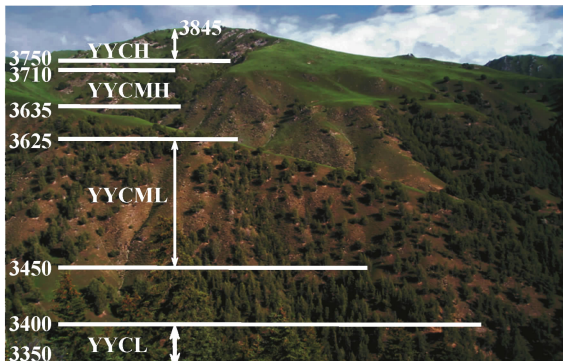


图3 祁连圆柏在羊玉林场随海拔升高树线上移采样点照片
Fig. 3 *Juniperus przewalskii* forest distribution Yangyu areas of the Anyemaqen Mountains, showing the distribution of trees in relation to altitude and the upslope advancement of the treeline

林线处树木的成功更新是林线在当前位置维持和相应气候变暖后向高海拔地区推进的基础。在本研究区内,树木年龄序列随着海拔的升高而成递减趋势(图4),树木平均年龄也随着海拔的升高而不断减小(图5),而图3更加清楚的展示了研究区内树木随海拔变化的趋势,这都表明在最近200年来树木的更新和林线向高海拔迁移在本研究区更加明显。

3.3 祁连圆柏年龄结构对温度变化的响应

研究区气候站点稀少,并且气候要素的观测记

录只有几十年;而研究区重建的温度信息又缺乏低频信号,因此,我们将 Yang et al (2002) 重建的中国温度变化和 D'Arrigo et al (2006) 重建的北半球的温度变化与本文祁连圆柏树木年龄结果进行对比(图2)发现,在世纪时间尺度上,树木的更新和温度变化对应的基本一致;YYC 坡面在 1550—1650 年期间 1800—1900 年期间有两个树木更新的高峰期,从图2重建的温度可以看出,在 1500 年左右,有一个升温过程,持续的升温过程使得树木的更新在 1550 年达到高峰,随着 19 世纪初温度的逐步升高,在最近 200 多年以来,三个坡面以及上限的祁连圆柏树木更新速率加快(图2),在 1800—1900 期间,三个坡面以及各个坡面的上限都有一个树木更新的高峰期。图3显示林线有显著的向上迁移的趋势。林线向高海拔地区的迁移,一般来说不是依靠提高成熟树木的生长速率,也不是改变从高山矮曲木到直立木的生长格局,而主要取决于提高幼树的更新和成活率(Holtmeier, 1993; Smith, 2003)。通常情况下高山林线处乔木树种产生种子时间较晚,种子年间隔期略长于低海拔处,再加上受低温的影响,种子萌发率低(Holtmeier, 2003)。此外在高山林线处,种子不能完全成熟,因此高山林线种子的萌发条件差,进一步导致幼苗和幼树较少,尤其是接近树线时,种子必须在一个合适的环境条件下才能更新。但这种

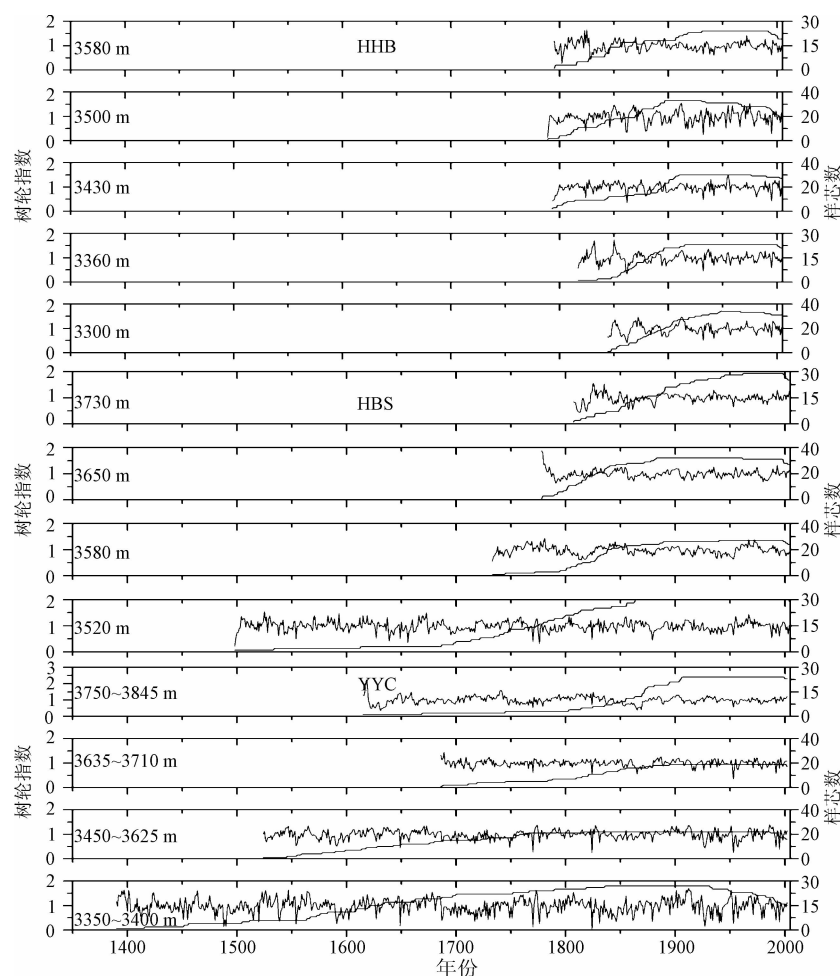


图4 HHB, HBS 和 YYC 三个坡面不同海拔梯度树木的年表

Fig. 4 Plot of the standard chronology of Qilian Juniper from the three slopes (HHB, HBS and YYC) along the different elevations and the sample size in the Anyemaqen Mountains

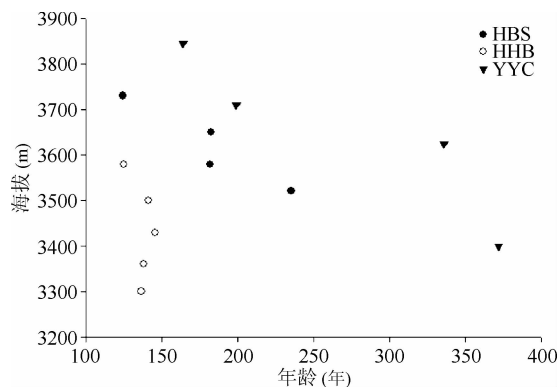


图5 树木平均年龄随海拔分布图

Fig. 5 Variations in average tree age for all the chronologies at the different elevation and different sites (HHB, HBS and YYC)

情况却能随着温度的升高而改变,1800 年以来,温度迅速升高(图 2),此时温暖的环境有利于种子的萌发和幼苗的形成,在温暖的环境下,使积雪融化,

形成了水热合适的环境,因此也更有利于树木在林线交错带内进行种子的萌发和幼苗的形成。研究区内树木的更新与变化趋势与重建的中国温度(Yang et al, 2002)和重建的北半球温度(D'Arrigo et al, 2006)一致表明,温度是影响该研究区树木更新和林线向高海拔迁移的主要因素。

在不同时段内,随着温度的变化,树木更新也呈现出一种不同的变化趋势(Kullman, 1981, 1986)。在小冰期期间,树木的更新并没有完全的停止,而是处在一个很低的更新水平(图 2)。这可能是小冰期期间,树木更新缓慢,并且树木完全被雪覆盖,从而防止了树木在晚冬或初春被冻死(Kullman, 1983)。而当 19 世纪初温度迅速回升时,积雪融化,此时充足的水分也能够促使树木快速的生长,这可能也是 19 世纪初树木更新加快的原因。20 世纪期间,林线处种群密度的增加似乎是北方高海拔地区的一个共同现象,并且种群密度的增大比林线爬升更为明显

(Payette et al, 2001; Juntunen et al, 2002; Shiyatov, 2003; Camarero and Gutiérrez, 2004; Kullman, 2005; Danby and Hik, 2007)。本研究也表明,在 1800 年之后,随着温度的快速升高,树木的更新速度加快,树线向高海拔迁移(图 3)。在一定范围内来说,这种更新格局的突然转变,是对温度升高的一种正反馈。1800 年以后根据树木年龄结构的变化可知树木的快速更新和重建的中国温度(Yang et al, 2002)和重建的北半球温度(D'Arrigo et al, 2006)相关表明,温度是影响树木更新和树线动态变化重要因素,这和祁连山地区的其他研究结果一致(Fang et al, 2009)。

4 结论

通过对阿尼玛卿山三个坡面以及各个坡面上限的三个点祁连圆柏年龄结构分析发现,三个坡面树木更新变化并不完全一样,树木的更新处于不断变化之中,自 14 世纪末期开始,YYC 坡面树木便处于不断的更新之中;15 世纪末期以来 HBS 面树木开始更新;HHB 面从 18 世纪末期开始才有树木更新;YYC 坡面树木更新出现了 1550—1650 和 1800—1900 两个高峰期;HBS 坡面和 HHB 坡面的树木更新只有 1800—1900 一个高峰期;三个坡面的上限圆柏的更新都只有一个高峰期:1800—1900。近百年没有显著更新是由于没有采集小树,因此本文不讨论近百年的更新。在小冰期阶段树木的更新并没有完全停止,而是保持缓慢的更新状态,通过计算发现 72% 以上的树木出现于 1800 年以后,树龄最大的圆柏出现在 14 世纪末期,并且在近千年以来,树木处于不断的更新变化之中,但在 1720 年以前,HBS 和 HHB 坡面树木的更新处在一个较低的水平,而从 1800 年开始,树木的更新速率加快,尤其是上限圆柏更新数量明显增多,并且维持在一个较高的水平。通过与重建的中国温度(Yang et al, 2002)和北半球温度(D'Arrigo et al, 2006)对比发现,阿尼玛卿山树木更新变化与升温关系密切,如 YYC 坡面 1550—1650 的树木更新高峰期对应 1500 年左右的升温过程,三个坡面 1800—1900 年的更新对应 19 世纪初开始的逐步升温。这表明温度可能是研究区树木更新的一个决定因素。

林线处树木的成功更新是林线在当前位置维持和响应气候变暖后向高海拔地区推进的基础。在本研究区内,树木平均年龄随着海拔的升高而不断减小,表明近 200 年来树木的更新和林线向高海拔迁移在本研究区体现很明显。

致谢:感谢青海省玛沁县、同德县林业局有关领导和工作人员对采样工作的大力支持和帮助。

参考文献

- 崔海亭, 刘鸿雁, 戴君虎. 2005. 山地生态学与高山林线研究[M]. 北京:科学出版社. [Cui H T, Liu H Y, Dai J H. 2005. Study on mountain ecology and alpine timberline[M]. Beijing: Science Press.]
- 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 2006. 阿尼玛卿山不同海拔祁连圆柏树轮宽度年表特征对比分析[J]. 冰川冻土, 28(5): 713—721. [Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. 2006. The characteristics of tree-ring width of *Sabina przewalskii* Kom for different elevations in the A'nyemaqên Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(5): 713—721.]
- 《青海森林》编辑委员会. 1993. 青海森林[M]. 北京: 中国林业出版社. [Qinghai Forest Editorial Committee. 1993. Forest in Qinghai Province[M]. Beijing: China Forestry Publishing House.]
- 王晓春, 周晓峰, 李淑娟, 等. 2004. 气候变暖对老秃顶子林线结构特征的影响[J]. 生态学报, 24(11): 2412—2421. [Wang X C, Zhou X F, Li S J, et al. 2004. The effect of climate warming on the structure characteristic of the timberline in Laotudingzi Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 24(11): 2412—2421.]
- Agren J, Zackarison O. 1990. Age and size structure of *Pinus sylvestris* populations on mires in Central and Northern Sweden [J]. *Journal of Ecology*, 78: 1049—1062.
- Briffa K R, Bartholin T S, Eckstein D, et al. 1990. A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia[J]. *Nature*, 346: 434—439.
- Camarero J J, Gutierrez E. 2004. Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees[J]. *Climatic Change*, 63: 181—200.
- Cook E R, Holmes R L. 1996. Users manual for program ARSTAN [CP]. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, USA.
- Danby R K, Hik D S. 2007. Variability, contingency and rapid change in recent subarctic alpine tree line dynamics [J]. *Journal of Ecology*, 95: 352—363.
- Dang H S, Zhang Y J, Zhang K R, et al. 2010. Age structure and regeneration of subalpine fir (*Abies fargesii*) forests across an altitudinal range in the Qinling Mountains, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 259: 547—554.
- D'Arrigo R, Wilson R, Jacoby G. 2006. On the long-term context for late twentieth century warming[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111, D03103, doi: 10.1029/2005JD006352.
- 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.
- Esper J, Schweingruber F H. 2004. Large-scale tree-line changes recorded in Siberia [J]. *Geophysical Research Letter*, 31, L06202, doi:10.1029/2003GL019178.
- Fang K, Gou X H, Chen F H, et al. 2009. Response of regional tree-line forests to climate change: evidence from

- the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Trees-Structure and Function*, 23: 1321–1329.
- Gou X H, Chen F H, Jacoby G, et al. 2007. Rapid tree growth with respect to the last 400 years in response to climate warming, northeastern Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 27(11): 1497–1503.
- Gou X H, Chen F H, Yang M X, et al. 2008a. Asymmetric variability between maximum and minimum temperatures in Northeastern Tibetan Plateau: Evidence from tree rings [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(1): 41–55.
- Gou X H, Peng J F, Chen F H, et al. 2008b. A dendrochronological analysis of maximum summer half-year temperature variations over the past 700 years on the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 93(3): 195–206.
- Holmes R L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 43(1): 69–78.
- Holtmeier F K. 1993. Der Einfluß der generativen und vegetativen Verjüngung auf das Verbreitungsmuster der Bäume und die ökologische Dynamik im Waldgrenzbereich. Beobachtungen und Untersuchungen in Hochgebirgen Nordamerikas und den Alpen [J]. *Geoökodynamik*, 14: 153–182.
- Holtmeier F K. 2003. Mountain timberline: ecology, patchiness and dynamics [M]. Dordrecht: Kluwer Academic publishers.
- Juntunen V, Neuvonen S, Norokorpi Y, et al. 2002. Potential for timberline advance in northern Finland, as revealed by monitoring during 1983–99 [J]. *Arctic*, 55: 348–361.
- Kullman L. 1981. Recent tree-limit dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the southern Swedish Scandes [M]. *Wahlenbergia*, 8: 1–65.
- Kullman L. 1986. Recent tree-limit history of *Picea abies* in the southern Swedish Scandes [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 761–771.
- Kullman L. 1998. Tree-limits and montane forests in the Swedish Scandes; sensitive biomonitors of climate change and variability [J]. *Ambio*, 27: 312–321.
- Kullman L. 2005. Pine (*Pinus sylvestris*) treeline dynamics during the past millennium—a population study in west-central Sweden [J]. *Annals of Botany Fennici*, 42: 95–106.
- Liang E, Shao X, Kong Z, et al. 2003. The extreme drought in the 1920s and its effect on tree growth deduced from tree ring analysis: a case study in North China [J]. *Annual of Forest Science*, 60: 145–152.
- Mäkinen H, Nöjd P, Mielikäinen K. 2001. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce in southern Finland [J]. *Trees*, 15: 177–185.
- North M, Chen J, Oakley B, et al. 2004. Forest stand structure and pattern of old-growth western hemlock/Douglas-fir and mixed-conifer forests [J]. *Forest Science*, 50: 299–311.
- Oberhuber W, Stumboeck M, Kofler W. 1998. Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness [J]. *Trees*, 13: 19–27.
- Paulsen J, Weber U M, Krner C. 2000. Tree growth near treeline: Abrupt or gradual reduction with altitude? [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 32(11): 14–20.
- Payette S, Filion L. 1985. White spruce expansion at the tree line and recent climatic change [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 15: 241–251.
- Payette S, Fortin M J, Gamache I. 2001. The subarctic forest-tundra: the structure of a biome in a changing environment [J]. *BioScience*, 51: 709–718.
- Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. 2008a. Difference in tree growth responses to climate at the upper treeline: Qilian Juniper in the Anyemaqen Mountains [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(8): 982–990.
- Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. 2008b. Altitudinal variability of climate-tree growth relationships along a consistent slope of Anyemaqen Mountains, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Dendrochronologia*, 26: 87–96.
- Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. 2010. Climate-growth relationships of Qilian juniper *Sabina przewalskii* in the Anyemaqen Mountains, Tibet [J]. *Climate Research*, 41(1): 31–40.
- Ruddiman W F. 2000. Earth's Climate: Past and Future [M]. New York: W H Freeman.
- Slatyer R O, Noble I R. 1992. Dynamic of montane treelines [M]// Hansen A J, di Castri F. Landscape boundaries: Consequences for biotic diversity and ecological flows. New York: Springer-Verlag, 346–359.
- Smith W K, Germino M J, Hancock T E, et al. 2003. Another perspective on altitudinal limits of alpine timberlines [J]. *Tree Physiology*, 23: 1101–1112.
- Stokes M A, Smiley T L. 1968. An introduction to tree-ring dating [M]. Chicago: University of Chicago Press.
- Taylor A H, Qin Z S, Jie L. 1996. Structure and dynamics of subalpine forests in the Wang Lang Natural Reserve, Sichuan, China [J]. *Plant Ecology*, 124: 25–38.
- Tessier L, Guibal F, Schweingruber F H. 1997. Research Strategies in Dendroecology and Dendroclimatology in Mountain Environments [J]. *Climatic Change*, 36: 499–517.
- Wang T, Zhang Q, Ma K. 2006. Treeline dynamics in relation to climatic variability in the central Tianshan Mountains, northwestern China [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 15: 406–415.
- Westerling A L, Hidalgo H G, Gayan D R, et al. 2006. Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity [J]. *Science*, 313: 940–943.
- Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. 2002. Temperature variation in China during the last two millennia [J]. *Geophysical Research Letter*, 29(9), 1324, doi: 10.1029/2001GL014485