

气候变暖对老秃顶子林线结构特征的影响

王晓春, 周晓峰, 李淑娟, 孙 龙, 牟长城

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要:运用样带样方法和年轮气候学方法对大海林地区的气候因子和样地数据进行了分析。结果表明,近 30a 来老秃顶子地区气候变暖明显,尤其是冬季增温最明显,月份增温中以 2 月份最大;寒冷时期(12 月份、翌年 1 和 2 月份)和温暖时期(6~9 月份)的温度都有增加,但是寒冷时期温度的增加幅度较大;冬季与夏季温差稍有减少,但积温有所增加,整年的热量正在增加。全球变暖导致的大海林地区增温对老秃顶子林线结构特征产生了很大的影响,由样地调查和分析可知,全球变暖导致林线上部幼苗、幼树的更新和存活增多,森林密度加大,树木平均年龄降低,年龄结构呈倒 J 字型,并且多呈聚集分布;而在林线的下部,幼苗更新很少,主要以中龄林存在,并且多呈零散分布形式。通过年轮分析得出,气候变暖导致林线树木径生长和高生长增加,而且增加的趋势和近 30a 来温度的变化基本一致。通过对年轮指数与气候因子的相关性分析,表明林线树木年轮指数与温度的相关性较强,而与降水的相关性较弱,并且年轮指数与温暖时期温度和积温呈正相关,而与寒冷时期温度和年平均温度呈负相关,表明温暖时期温度和积温控制着林线的海拔高度,而寒冷时期的温度和年平均温度主要对林线树种类型起着决定性的作用。从敏感度分析看出,林线上部对气候变化敏感,而非最上部;在不同树种中比较敏感度时,发现岳桦的平均敏感度要比云冷杉好,这也主要是与岳桦所处的位置有关,并且岳桦中也以中等年龄的树木对气候变化最为敏感。

关键词:气候变暖;林线;年轮;敏感度;岳桦

The effect of climate warming on the structure characteristic of the timberline in Laotudingzi Mountain

WANG Xiao-Chun, ZHOU Xiao-Feng, LI Shu-Juan, SUN Long, MU Chang-Cheng (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2412~2421.

Abstract: Ecotones, the boundary zones between major ecosystems, are important sites for examining the effects of climate change on ecosystem structure. The forest-tundra ecotone, formed by alpine timberline, may be especially sensitive to climate change. This paper analyzed the timberline stand structure related climate factors at Laotudingzi Mountain in Dahailin region by using transect investigation and dendrochronological methods. There was a trend of climate warming during the past 30 years, especially in winter seasons. February was the most sensitive month in a year. Both summer and winter temperature increased, and the later was greater. The temperature difference between summer and winter decreased, but the accumulated temperature slightly increased, indicating that the yearly heat increased. The climate warming in Dahailin region greatly influenced the structure characteristic of the timberline. The rate of regeneration and survival in the upper timberline ecotone and forest coverage increase, but stand age decreased. The trees class was clumped distributed structure with an inversed "J" type age structure. The regeneration in the lower timberline was poor and exhibits scattered distributed. The diameter and height growth increased because of the climate warming. The trend of the ring index was consistent with the temperature variation during the past 30 years. The tree ring index at timberline was strongly correlated to the temperature and slightly to precipitation. The warm period temperature and accumulated temperature were positively correlated to the ring index, while

基金项目:国家自然科学基金重大资助项目(39899370)

收稿日期:2003-10-24; **修订日期:**2004-04-20

作者简介:王晓春(1975~),男,吉林人,博士,讲师,主要从事全球气候变化和林线生态学研究。E-mail: wangxc-cf@nefu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 39899370)

Received date: 2003-10-24; **Accepted date:** 2004-04-20

Biography: WANG Xiao-Chun, Ph. D., Lecturer, mainly engaged in global climate change and timberline ecology. E-mail: wangxc-cf@nefu.edu.cn

the cold period temperature and mean annul temperature were negatively correlated to the ring index. These suggested that the warm period temperature control the timberline elevation, and the cold period temperature determine the type of tree species at timberline. The sensitivity analysis indicated that the tree at the upper timberline was more sensitive than those at lower timberline, but not at the most upper timberline. The sensitivity of *Betula ermanii* was better than spruce-fir by comparing, which mainly related with the location of *Betula ermanii*, and the mid-age tree had the better sensitivity.

Key words:climate warming; timberline; tree ring; sensitivity; *Betula ermanii*

文章编号:1000-0933(2004)11-2412-10 中图分类号:Q143 文献标识码:A

全球变暖是20世纪90年代以来最为引人注目和关切的环境问题之一,已经引起了各国政府、科学界与公众的强烈关注^[1,2]。它研究的核心在于探索由于人类活动所引起的全球环境变化对于人类赖以生存的陆地生态系统与人类生存环境的作用及其反应,以期找出应对的科学策略,最大限度地减小全球变暖的不利影响,使地球朝着有利于人类生存与持续发展的方向发展。因此,亟需研究和分析对气候敏感的生物监测系统。

亚高山森林和高山苔原之间的生态过渡带,亦即高山林线,一方面其所处的海拔位置受大气环境控制;另一方面,林线本身又是生物与非生物因子相互作用的产物^[3]。而且,由于其海拔位置较高,通常很少受到人为活动的影响,因此,这类过渡带被认为具有监测全球气候变化的综合作用,是全球变暖的“预警区”^[4]。关于气候变化与林线动态之间的关系,国外学者已经进行了一些研究。Kullman研究了20世纪气候变暖和瑞典斯堪的纳维亚山系南部树线升高之间的关系,结果表明气候变暖已使斯堪的纳维亚山系瑞典区域的主要树种树线上升了100m^[4];Payette研究表明最近气候变化导致Hudson Bay地区树线白云杉向前扩展,并且使林线的森林密度加大^[5]。国内对高山林线的研究相对较少,崔海亭讨论过华北山地高山带和亚高山带的划分问题^[6],并对太白山林线的稳定性进行了研究^[7];周晓峰等对长白山岳桦-苔原过渡带动态与气候变化之间的关系进行了分析^[8];于澎湃等分析了小五台山北台林线附近的植被及其与气候条件的关系^[9]。虽然国内已经对林线与气候变化作了一些研究,但对林线如何对气候变化响应的研究不多。本文从高山林线的格局、年龄结构和年轮变化等结构特征出发,研究亚高山林线植被对于全球变暖的响应及证据。

1 研究地区自然概况

老秃顶子(44°23′20″N,128°14′48″E)位于黑龙江省牡丹江市大海林林业局境内长白山支脉的张广才岭东南坡,是牡丹江最大的支流海浪河的源头。大海林地区地形为中低山丘陵地带,地势西北高东南低。张广才岭主脉从该区的西南入境,蜿蜒全区,地势起伏较大,内有多处73°~80°的石崖矗立,俗称砬子。该区海拔多在500~1000m之间,最高峰老秃顶子海拔1703m,是中国东北地区的第2高峰,黑龙江省第1高峰。

本区属于温带季风性气候,冬季在极地大陆气团控制下,气候寒冷,夏季受亚热带海洋气团影响,降水集中,气候潮热。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温为2024~2437 $^{\circ}\text{C}$,植物生长期为120~140d。夏季以7、8月份最热,平均气温8~23 $^{\circ}\text{C}$,极端最高温度达34 $^{\circ}\text{C}$;冬季以12月份、翌年1月份最冷,平均气温在-26~-16 $^{\circ}\text{C}$,极端最低温度可达-32 $^{\circ}\text{C}$,无霜期85~125d(早霜一般在8月28日~9月25日,晚霜一般在5月7日~6月12日)。全区降水量为500~1000mm,冬季积雪时间为130~150d,一般在10月初开始降雪,大量降雪多集中在12月份和翌年的1、2月份,地面积雪厚度一般在30~60cm,深山区最大积雪厚度一般120~180cm。主风方向随季节变化,一般冬季多为西北风,夏季多为东南风。

老秃顶子林线分布在海拔1580~1650m的亚高山矮曲林带,风力较强,空气潮湿,土壤为亚高山粗骨生草森林土,常常岩石裸露。在这种生态条件下,不利于一般树种生长,因此,组成树种极单一,因岳桦(*Betula ermanii*)性喜阳光和较大的空气湿度,对土壤要求不高,且能自基部分枝,形成多干的灌木型,对大风有较强的适应能力,因而岳桦在此垂直带能够形成矮曲林。岳桦林郁闭度一般不超过0.4~0.6,平均树高为6~8m,随着海拔高度升高,风力的增强,则成林愈稀。岳桦的上限一直分布到山顶苔原带,形成独特的围绕山顶的矮曲林,山顶植被分布极少,大部分是裸露的岩石,仅石块间隙有少量石质土。除岳桦外,在局部较干旱,土层瘠薄,岩石裸露的地段,林木疏开处则混有偃松(*Pinus pumila*),甚至形成小片偃松矮曲林与岳桦矮曲林交错分布。林下、林间植物除以附生石块上的黑石耳(*Gyrophora proboscidea*)为主的各种地衣外,仅在石块间隙、低凹地段、偃松或灌丛下,生长着以岩高兰(*Empetrum nigrum* var. *japonicum*)、兴安圆柏(*Juniperus davurica*)、西伯利亚圆柏(*Juniperus sibirica*)为主的一些小灌木,以及数量不多的各种草本植物,其中不少属垫状或匍匐状的高山或极地植物,如黑果天竺(*Arctous japonicus*)、高山蛇床(*Cnidium ajanense*)、高山茅香(*Hierochloe alpina*)、矮膝斗菜(*Aquilegia flabellate* var. *pumila*)、北马先蒿(*Pedicularis labradorica*)、兴安蓼(*Polygonum ajanense*)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)、高山绣线菊(*Spiraea alpina*)、杜鹃(*Rhododendron pulchrum* Turcz.)、小叶樟(*Deyeuxia angustifolia*)等。

2 研究方法

2001 年 6 月和 9 月份在老秃顶子林线采用样带网格法进行取样,用每木调查法进行群落和种群学调查。垂直于老秃顶子林线设置一条样带,在样带内的林线不同位置设置 4 个样地,样地面积为 $10\text{m} \times 10\text{m}$,再将它们分别隔成 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ 的小样方 16 个,调查并记录样株所在的位置,记录每个格子内岳桦株数。记录每一个样地内所有种群个体数量、组成、胸径、株高、郁闭度等特征,同时记录群落学的有关特征,如群落类型及主要种类组成、盖度、多度等。此外,还记录有关生境条件如海拔、坡度、坡向、温度、湿度、土壤特征等。同时进行树木年轮取样,在受小环境影响较小的理想地点选取典型样木(样木数为 10),从岳桦与云冷杉相接下限开始一直到岳桦分布上限的一条样带内取样,取样木包括岳桦、偃松和云冷杉^[10]。

2.1 年轮宽度测量

在每株样木基部和胸径处各取一个 2cm 厚的圆盘或钻芯,记录每个圆盘(钻芯)的取样位置和地点,并且记录样木及样木所在地的详细资料。将所有圆盘(钻芯)带回实验室,刨光,目视交叉定年。在双筒显微镜下用测微尺测量年轮宽度,精确到 0.01mm,每个样品分别由两人重复测量两次,如有两个年轮出现误差即作第 3 次测量。所有年轮资料输入计算机绘制年轮生长序列曲线^[11]。

2.2 敏感度的计算

采用 Rolland 的方法计算年轮生长的平均敏感度,反映高山林线树木年轮生长的特点。敏感度:即每个年轮宽度与第 2 年年轮生长的相对差,表示由于气候因素造成年轮宽度组成的高频率变化。Douglass 将此记述为每个年轮宽度与第 2 年年轮宽度变化的百分率^[12]:

$$MS = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{2(x_{i+1} - x_i)}{x_{i+1} + x_i} \right|$$

式中, x_i 为第 i 个年轮宽度值; x_{i+1} 为第 $i+1$ 个年轮宽度值; n 为该样本年轮的总数。

2.3 年轮指数 $I(t)$

年轮指数系指年轮生长实际宽度与该树种年生长期望值(生长趋势曲线上读得的年轮宽度值)的比值,其反映在排除遗传影响以后,年轮生长受气候等因素影响增加或减少的程度^[12]。计算公式:

$$I(t) = \frac{d(t)}{D(t)}$$

式中, $d(t)$ 为实际测量的年轮宽度; $D(t)$ 为预计生长的年轮宽度,通过生长模型来计算。

一般树木的直径生长随年龄的增加而减低,根据岳桦年轮生长序列特点模拟岳桦的生长:

$$Y(t) = ae^{-bt}$$

式中, t 为树木的年龄,从 1~ n 。

3 结果分析

3.1 大海林地区近期气候的变化

20 世纪 60 年代以来,温度升高是总的趋势,不同的季节增温幅度有所不同。一年中温暖时期(6~9 月份)的温度是除热带地区外林线海拔高度的主要控制因子;而一年中寒冷时期(12 月份、翌年 1、2 月份)的温度影响着林线树木的主要生活型^[13]。一年中温暖时期控制林线海拔高度,而在老秃顶子地区的温暖时期温度上升,从而使老秃顶子林线的海拔高度可能会有所增加;另一方面寒冷时期的温度影响林线树木的生活型,温度越高越倾向于被阔叶树木占据,温度低越易被针叶树种占据,老秃顶子地区寒冷时期温度升高非常明显,这更表明林线地区将更适宜阔叶树木生长(岳桦),导致岳桦的更新增加,另外使一些针叶树的生长不利,像偃松等针叶树种分布将减少,最后可能消失。

从图 1 看出,大海林地区近 30a 温暖时期月平均温度,虽然不同年代有所波动,但总的增加趋势非常明显,从 1967 年到 2000 年增温近 2℃,年均增温 0.07℃;而寒冷时期的增温更明显,增温近 4℃,年均增温 0.11℃。月最低和最高温度值也是影响植物分布的重要指标,月最高温度近 30a 虽然有增加,但是增温不是特别明显,从 1967 年到 2000 年增温不到 1℃;而月最低温的升高却十分明显,近 30a 增温 4℃多。近 20a 的积温($\geq 5^\circ\text{C}$ 和 $\geq 10^\circ\text{C}$)总趋势也是稍有增加。冬夏温差是一年中最热月和最冷月月平均温度差异,从图 1 看出,近 30a 来冬夏温差有所减少,表明冬季和夏季温度之间的差异正在逐渐缩小,全年的热量正在增加,这也和近年来的全球变暖相一致。另外热量的季节性增加,可能导致林线倾向于阔叶树种占优势,其次是常绿针叶树种,最后是落叶针叶树种,使原有的林线格局发生改变。可以预测如果全球变暖的趋势继续加大,在未来数十年后,老秃顶子林线岳桦林带可能大量向山顶苔原侵入,最终可能导致林线消失。

由图 2 可知,月最高温度的年平均值增幅不大,近 30a 增温 1℃左右。月最高温度增幅最大的是 2 月份,最大的年增温为 10.9℃,增温趋势最大(0.34℃/a)。其次是 1 月份(0.29℃/a)和 12 月份(0.21℃/a)。春季、夏季和秋季的温度变化较为平和。月最低温度(如图 2)增幅最高的是 12 月份,最大的年增温为 11.9℃,增温趋势也最大(0.37℃/a)。其次是 2 月份(0.36℃/a)和 1

月份(0.34℃/a)。3月和11月的增温幅度也较明显。与月最高温度不同的是,月最低气温的年平均值增加明显,最高与最低值之差为7.4℃。这些记录表明,最大增温出现在冬季而不是春季和夏季。即最冷月平均温度值比最热月平均温度值升高明显。这对植物的分布有重要影响。

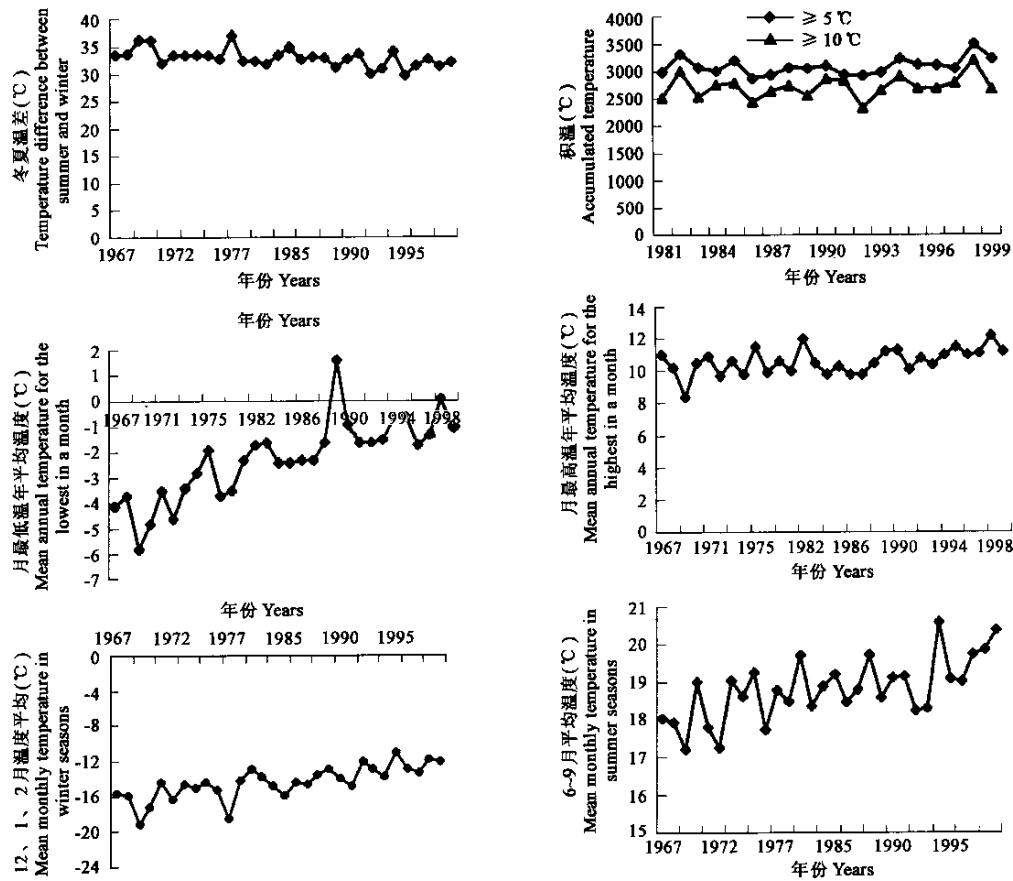


图1 近30a大海林地区温度变化

Fig. 1 The variation of temperature in recent 30 years in Dahailin

3.2 林线过渡带内的格局变化

为了研究全球变暖与老秃顶子林线结构特征的关系,从山顶向下垂直于林线的样带内依次选取了4块样地。1号样地选在山顶林线最边缘处,2号样地选在山顶偏下,3号、4号样地的海拔高度依次降低,具体样地情况见表1。

表1 老秃顶子林线样地基本特征

Table 1 Basic characteristic at the timberline ecotone plots in Laotuding Mountain				
特征 Characteristics	1号样地 No. 1 plot	2号样地 No. 2 plot	3号样地 No. 3 plot	4号样地 No. 4 plot
海拔 Altitude(m)	1650	1633	1602	1582
坡向 Aspect	西北 West-North	西南 West-South	西南 West-South	西 West
坡度 Slope	5°	18°	10°	22°
优势树种 Dominant tree species	岳桦 <i>B. ermanii</i>	岳桦 <i>B. ermanii</i>	岳桦 <i>B. ermanii</i>	岳桦、云冷杉 <i>B. ermanii</i> , spruce-fir
灌木 Shrub	高山绣线菊 <i>S. alpine</i> Pall	蓝靛果忍冬 <i>L. caerulea</i>	—	高山绣线菊 <i>S. alpina</i>
草本盖度 Herbage coverage(%)	50	60	90	100
苔藓盖度 Moss coverage(%)	25	5	1	—
地衣盖度 Lichen coverage(%)	5	1	—	—
灌木及幼树盖度 Shrub & seedling coverage(%)	5	10	0.5	—
郁闭度 Canopy coverage(%)	30	80	50	30
蕨类盖度 Pteridophyte coverage(%)	—	—	0.5	—

从图3和表1可以看出,随着海拔高度逐渐降低,在林线过渡带内岳桦的平均年龄逐渐增大,密度逐渐降低,树高呈增加趋势。从近30a的气候分析可知,气温的总趋势是增加,气温的增加使得林线的环境条件有所改善,使得原本不能生存和更新的种子和幼苗得以生存和更新,因此更新数量的增多是林线增温的一大重要表现,更新数量增多使得林线的平均年龄从低海拔到高海拔逐渐降低,而林线样地内的种群密度却逐渐增大。

在树木年轮的气候研究中,把年轮宽度逐年变化状况作为树木对气候反映的敏感度。当敏感度的值很大时,一般来说,气候因子的限制作用就非常明显,相关性很好,只有极个别的例外。敏感度较好的植株一般生长在悬崖石壁、陡坡的地方,那里供根生长的土壤空间少,土壤质地较粗糙。而林线地带的气候、土壤条件通常都比较严酷,气候条件的变动更容易反映在树木的生长上,因此,林线是一个很理想的敏感度分析的场所。敏感度的区间范围为 $0 \leq MS \leq 2$,若所有年轮值都是相同的宽度,则 $MS = 0$,这种情况,在实际年轮生长中是不存在的,若计算前一年的年轮差值很大,而当年年轮宽度值几乎很窄或缺轮,那么平均敏感度应为2。这种情况,少数年轮在特殊情况下是会出现的,但对整个样本来说,却绝不会出现的。所以平均敏感度的实际取值范围应为 $0 < MS < 2$ 。从实际统计计算中,该值一般都小于1,常见为0.1~0.6之间,大量的值集中在0.1~0.4之间。在实际工作中一般取 $MS > 0.2$ 。

显然,平均敏感度是度量相邻年轮之间年轮宽度的变化情况的,所以它主要反映气候的短期变化或高频变化。研究表明,平均敏感度大的标本保持的气候信息就多,相应的噪声就少,而且与大气变化的关系也密切。

从图3可知,岳桦林线年轮的平均敏感度相对变化不大,只有样地1的敏感度相对较小(低于0.2),这主要是因为样地1岳桦的平均年龄相对较小,对气候的变化不是特别敏感,而从样地2到样地4的敏感度增加,但增加的幅度也不是很大。而且从图4中也可知,无论是岳桦还是云杉都是中年树木对气候的变化最敏感,而幼年和老年的敏感度相对较低。从岳桦和云杉比较来看,岳桦的平均敏感度比云杉要高,这主要是因为岳桦的生长位

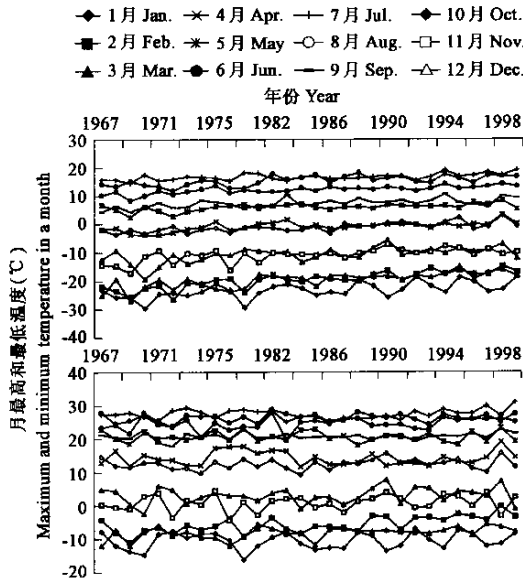


图2 近30a不同月份月极端温度变化
Fig. 2 The variation of the extreme temperature in recent 30 years

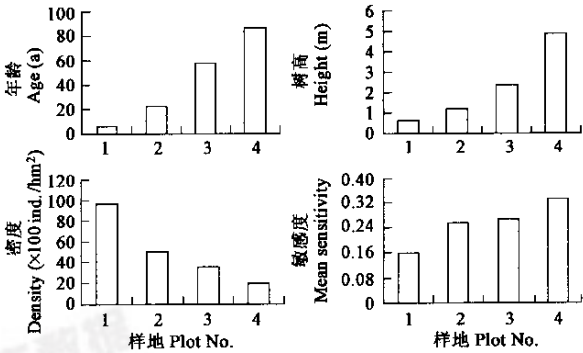


图3 林线内不同样地年龄、树高、密度和敏感度变化
Fig. 3 The variation of the age, height, density and mean sensitivity at different plots in the timberline ecotone plots

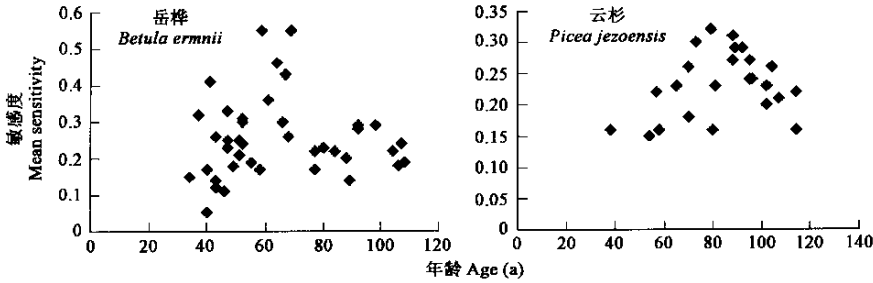


图4 岳桦、云杉年龄与敏感度关系
Fig. 4 The relationship between the mean sensitivity and the age of *Betula ermanii* and *Picea jezoensis*

置是林线,生长条件处于极限状态,对气候变化比较敏感,而云杉主要分布在老秃顶子的中海拔地带,与岳桦分布的下限相接,

对气候变化的反应相对较弱,造成岳桦的平均敏感度要比云杉高。因此,用林线过渡带中岳桦的年轮与种群结构特征研究全球变暖最容易找到证据和反应实例。

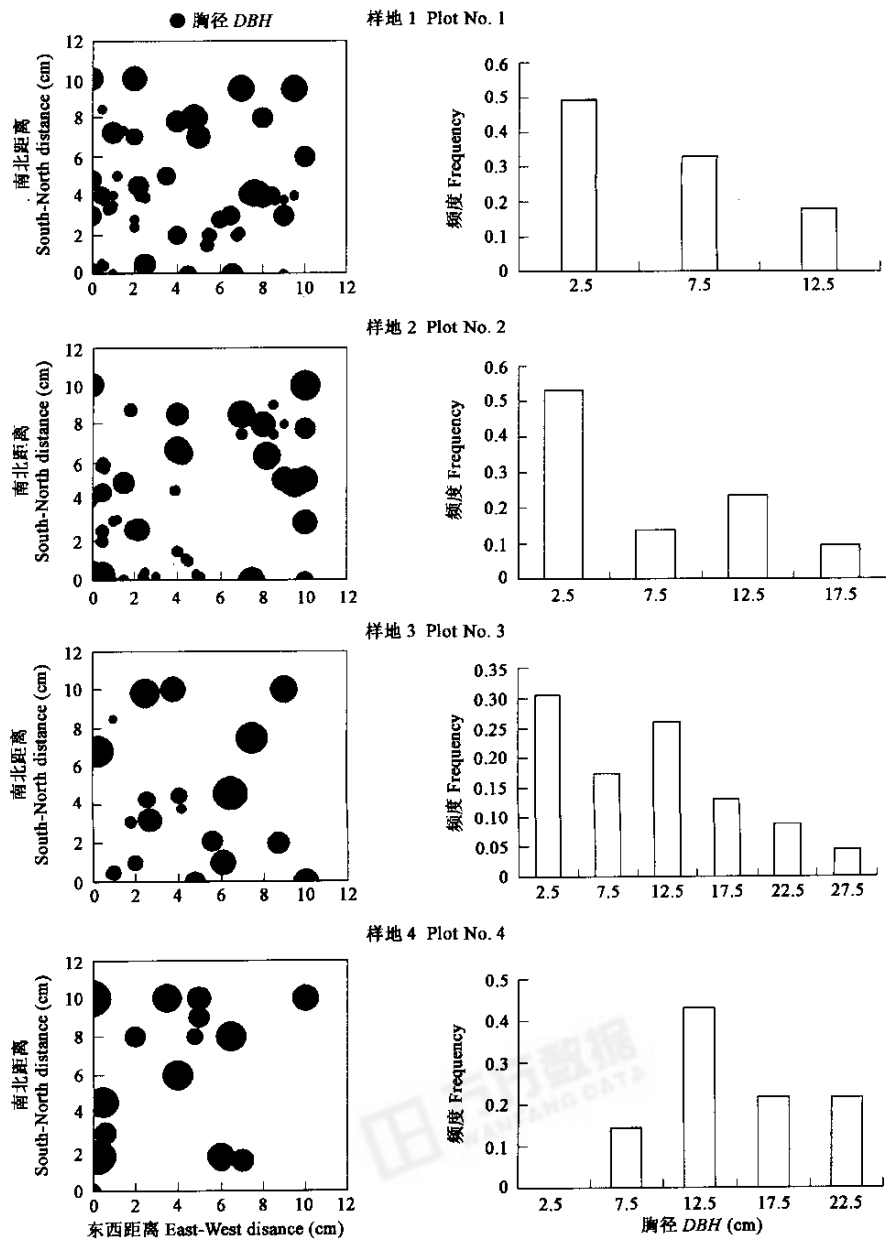


图5 不同样地岳桦格局与径阶分布

Fig. 5 The pattern and DBH distribution of *Betula ermanii* at different plots

从图5中和图6中可以看出,在林线较低海拔处岳桦年龄较大,树高和年龄成正比,随着海拔升高,林线岳桦年龄不断变小,说明在海拔较低处主要以大树为主,中树、幼树很少或没有,这表明在此处的岳桦林为过熟林,呈现出衰退趋势;在林线中海拔岳桦的径级株数呈正态分布,表明此处岳桦林为成熟林,呈现出稳定态势;在林线高海拔以幼树为主,说明岳桦正处于成长期。并且从图4还可以看出,在林线高海拔处岳桦分布较密,并且多呈聚集分布,而在林线低海拔处岳桦分布较稀疏,并且分布相对较随机。从这一结果也可以看出岳桦正在不断向上攀升,岳桦在林线高海拔更新较多,岳桦这种分布的原因是环境因子和岳桦生物学特性共同作用的结果。造成岳桦向上攀升和林线密度增大的主要原因可能是近年来全球气候变暖,从图1和图2可以看出该地区从1967年到2000年气温平均升高近2℃,使海拔较高处逐渐有利于岳桦生长,这使岳桦林线过渡带向上移动。同时,气

候变暖,较低海拔处的云冷杉开始不断向岳桦林带侵入,和岳桦产生竞争对岳桦幼苗的更新造成一定的影响,从而出现海拔较高处密度大,较低处密度低的结果。由于环境条件开始对岳桦生长有利,所以岳桦向苔原带入侵,造成整体向上攀升。另外,岳桦是阳性先锋树种,原始分布区就可能在现在的苔原带上,由于山崩、火山喷发或冰期等原因可能造成苔原带的岳桦消失,现在气候恢复,岳桦又要占领原来的生存区域^[14]。

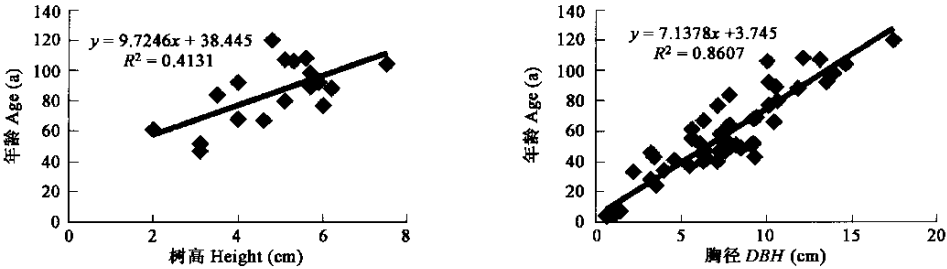


图6 岳桦年龄与胸径、树高关系

Fig. 6 The relationship between the DBH, height and age of *Betula ermanii*

3.3 树木高生长与径生长变化

年轮宽度的逐年变化是衡量气候对年轮限制的一项很好的指标。正如前面所述,产生这种逐年变化的主要原因是随气候变化引起的,在限制地点,作为对气候的反应,树木年轮就会出现逐年较大的变化。如果气候没有明显的逐年变化,年轮宽度也就不会出现大的变化。尤其在林线,年轮宽度是温度变化的一个很好的指示物。一般来说,树木直径生长量随年龄增长而下降,较高生长速度的持续时间以及生长降低程度和速度受遗传因子控制,但也因不同生长条件而有差异。在运用年轮资料分析历史气候因素时,必须排除年龄因素的影响,树木年轮学采用对年轮生长进行标准化的方法来消除遗传因素的影响,即用年轮指数来反映年轮生长而不用年轮生长的实际值。为求得径向生长期望值,经模拟得岳桦的生长趋势模型为: $Y(t)=3.3793e-0.01989t$ 用此模型对岳桦计算年轮指数,求得4株岳桦的平均年轮指数(图7),以平均年轮指数序列与气候因素进行相关分析。从图7林线过渡带内4个样地中岳桦年轮指数的变化可以看出,虽然4个年轮序列的长度不同,但从它们共同的部分可以看到,1965、1980、1990和2000年左右的年轮指数有所降低外,年轮指数从1965年到现在一直呈增加趋势,其中以样地2中1996年的岳桦增加最明显,年轮指数年平均增加0.01,而这正与这些年的温度变化相一致(图1),而且还可以看出,4个样地中年轮指数与气候变化一致性最好的也是样地2,因为它所处的位置既不是林线的最边缘,也不是林线的下部而是对气候变化最敏感的中上部。

分析产生这一变化的主要原因,树木的生长要求一定的温度条件,不同树种的生长适宜温度有明显差异。当低于某一温度时,树木就停止生长,温度太高也不利于树木生长,在下限温度和最适宜温度之间,树木随温度升高而生长加快,超过最适温度,生长减慢。温度对树木生理活动也有明显影响,它直接影响光合作用,并间接调整呼吸和蒸腾。当温度升高到临界值时,呼吸强度增加而使光合作用受阻,温度增高蒸腾速度加快,引起树木内部水分亏缺因而使气孔关闭,导致光合作用速度下降。温度高低直接影响着树干形成层生长的速度和持续时间,从而影响了年轮的宽度。

由于全球变暖改变了林线树木的生长温度,岳桦处在森林分布的上限,因为温度过低限制了其向上生长。因此,温度也是限制岳桦生长的主要因子,由于全球气温升高,改善了岳桦的生长条件,生长时间延长,使岳桦生长加速,年轮宽度变宽,而不同年份的增温情况虽然有所差异,使得其年轮宽度的变化也各不相同,但总的趋势是温度一直升高。因此,年轮指数的变化也与温度相一致的增加,全球变暖使年轮宽度变宽。

3.4 年轮指数与气候因子相关性分析

气候对树木生长的影响是不言而喻的,在不同的气候条件下,树木生长的差异往往很大,这种影响是综合的,即日照、温度、降水、风、湿度等要素同时对树木年轮生长状况起作用,甚至还受到包括生长前期若干气候要素变化的制约,也就是说,每一年树木年轮的形成都取决于当年及生长前期的许多气候因子的综合影响。那么究竟哪一个气候因子是林线结构的主要影响因子呢?为此作了年轮指数与气候因子的相关性分析,结果如表2。

从表2可以看出,岳桦年轮指数与气候因子存在相关性,依据偏相关矩阵,年轮指数与温度的相关性较强,而与降水的相关性较弱;而且年轮指数与温暖时期(6~9月份)温度和积温(>0℃)呈正相关,而与年均温和寒冷时期(12月份、翌年1、2月份)温度呈负相关,表明林线结构特征的主要影响因子是温度,降水的影响相对次要,降水中6~9月份的降水影响相对较强,而年平均降水和1、2月份降水影响相对较弱。寒冷时期林线树木处于休眠状态,虽然处于休眠状态但也有一定的生理

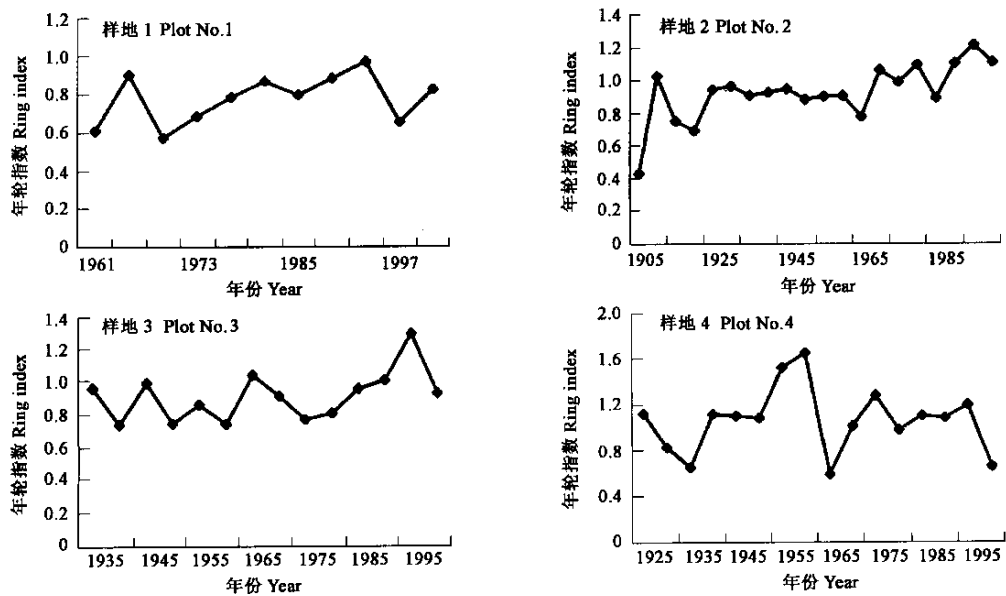


图 7 不同年代岳桦年轮指数变化

Fig. 7 The temporal variation of ring indices of *Betula ermanii*

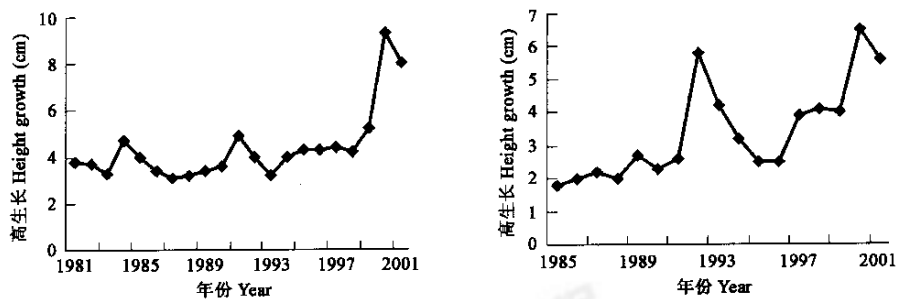


图 8 不同年代偃松高生长变化

Fig. 8 The temporal variation of the height growth of *Pinus pumila*

表 2 年轮指数与气候因子的偏相关矩阵($N=30, P<0.05$)

Table 2 The correlation matrix between annual ring index and climatic factors

变量 Variable	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
y	1.00							
x_1	-0.92	1.00						
x_2	0.95	-0.76	1.00					
x_3	-0.96	0.97	-0.83	1.00				
x_4	0.96	-0.77	0.98	-0.88	1.00			
x_5	0.33	-0.49	0.10	-0.56	0.27	1.00		
x_6	0.60	-0.74	0.38	-0.79	0.51	0.95	1.00	
x_7	0.50	-0.77	0.22	-0.72	0.31	0.85	0.92	1.00

* y 为年轮指数, x_1 为年平均温度, x_2 为 6~9 月份月平均温度, x_3 为 12、1、2 月份月平均温度, x_4 为 $>0^{\circ}\text{C}$ 积温, x_5 为年平均降水量, x_6 为 6~9 月份月平均降水量, x_7 为 12、1、2 月份月平均降水量。y is the ring index; x_1 is the mean annual temperature; x_2 is the mean temperature in summer seasons; x_3 is the mean monthly temperature in winter seasons; x_4 the accumulated temperature above zero; x_5 is the mean annual precipitation; x_6 is the mean monthly precipitation in summer seasons; x_7 is the mean monthly precipitation in winter seasons

代谢, 温度升高使这种代谢加大(消耗加大), 另外温度突然高于某一数值时, 可能会打破休眠, 打破休眠后温度并不能持续保持

在这一数值,当温度降低时会对树木造成一定的伤害,从而使年轮指数减小,所以寒冷时期温度与年轮指数呈负相关。因此,全球变暖对于林线的影响是显著的。

4 结论与讨论

通过对近 30a 来的气候因子分析表明,老秃顶子地区升温明显,尤其是月最低温、寒冷时期温度和温暖时期温度升温非常明显;积温也有所增加,但增温幅度不是很大;月增温以 2 月份增温幅度最大,季节增温中,以冬季增温最明显,其它季节增温幅度相对较小;冬季和夏季之间的温度差异降低,季节热量分布有所差异,但全年的总量有所增加。

温度增加对老秃顶子林线格局产生重要影响。由于气候变暖使林线上部森林密度加大,并且使森林的格局趋于聚集分布;而在林线的下部,森林的密度较小,森林格局趋于零散分布。在老秃顶子林线上部,由于增温使得更新状况改善,树木以幼苗、幼树居多,平均年龄偏低。

通过对老秃顶子林线内树木年轮结构特征分析,不同年龄树木对气候变化的反应程度不一,其中以中年树木对气候变化最为敏感,而且不同树种和林线不同位置对气候的响应也不一致,在老秃顶子岳桦的敏感度相对比云冷杉要大,这可能与岳桦分布在林线位置有极大的相关;而岳桦中又以林线的中上部敏感度最好,而非林线的最上部。近 30a 的气候变暖造成岳桦直径生长增加,而且年轮指数的增加趋势也与温度变化的情形相一致,年轮指数的增加以中龄树木的增加最为明显,这与敏感度的分析相一致。

通过对年轮指数与气候因子相关性分析表明,温度对林线的影响明显,而降雨的影响相对较弱,并且 6~9 月份温度和积温与年轮指数呈正相关,主要影响着林线的海拔高度,而寒冷时期的温度与年轮指数呈负相关,主要对林线树种类型起着决定性的作用。

通过对历史资料、仪器观测资料及替代气候资料的分析表明,在最近的 30a 中老秃顶子地区年平均温度升高了约 1.5℃,且 20 世纪的夏季温度明显高于最近 800a 中任何时期的夏季温度。这些资料说明,20 世纪末期的气候条件是很罕见的,已经导致了一些林线的响应,如果温度继续升高的话,这种响应将加速。详细的研究和各种观测表明,其它几个研究站点处的森林线也向上坡迁移,但这种向上迁移的特点、速率及范围主要受局地微气候学和现有品种的影响。

本研究的对象是整个山脉景观的较小部分,即该景观的某些部分(林线过渡带),一般认为对气候变化特别敏感的部分。根据林线结构特征的变化给出气候变化对亚高山或高山森林响应的证据,这个问题在很长时间内是极其重要的。研究表明林线区域的植被格局确实发生了变化,气候变化是造成这一改变的主要原因,另一方面,也是由于长时间没有发生严重火灾的结果。所以,一方面应继续研究高山林线过渡带以揭示气候对这些高山环境的影响,这是十分重要的;另一方面,还应该考虑到气候以外的因素,如火灾等其它干扰对林线结构特征的影响也不容忽视。

References:

- [1] Zhang X S, Zhou G S, Gao Q, *et al.* Study of global change and terrestrial ecosystems in China. *Earth Science Frontiers*, 1997, **4**(1~2): 137~144.
- [2] Zhou X F, Zhang Y D, Sun H Z, *et al.* The effect on climate change on population dynamics of *Quercus mongolica* in north Greater Xing'an Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(7): 980~985.
- [3] Li W H, Liao G J. Translated. *Physiological ecology of the alpine timberline*. Beijing: China Environmental Science Press, 1986. 13~15.
- [4] Kullman L. 20th century climate warming and tree-limit rise in the southern Scandes of Sweden. *Ambio*, 2001, **30**(2): 72~80.
- [5] Payette S & Filion L. White spruce expansion at the tree line and recent climate change. *Can. J. For. Res.*, 1985, **15**: 241~251.
- [6] Cui H T. On the demarcation of the alpine and subalpine zone in North China. *Sci. Bull.*, 1983, **28** (8): 494~497.
- [7] Cui H T, Dai J H, Tang Z Y, *et al.* Stability of alpine timberline ecotone on Taibai mountain, China. *J. Environ. Sci.*, 1999, **11**: 207~210.
- [8] Zhou X F, Wang X C, Han S J, *et al.* The effect of global climate change on the dynamics of *Betula ermanii*-tundra ecotone in Changbai Mountain. *Earth Science Frontiers*, 2002, **9**(1): 227~231.
- [9] Yu P T, Liu H Y, Cui H T. Vegetation and its relation with climate conditions near the timberline of Beitai, Xiaowutai Mts., Northern China. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, **13**(5): 523~528.
- [10] Wang X C, Han S J, Zou C J, *et al.* Geostatistical analysis of the pattern of *Betula ermanii* population in Changbai Mountain. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, **13**(7): 781~784.
- [11] Li J F, 万方数据, 周 X R, *et al.* *Tree-ring hydrology theory and application*. Beijing: Science Press, 2000. 97~101.
- [12] Wu X D. *Tree ring and climate change*. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 67~74.

[13] Jobbagy E G & Jackson R B. Global controls of forest line elevation in northern and southern hemispheres. *Global Ecology & Biogeography*, 2000, **9**: 253~268.

参考文献:

[1] 张新时,周广胜,高琼,等. 中国全球变化与陆地生态系统关系研究. 地学前缘, 1997, **4**(1~2): 137~144.

[2] 周晓峰,张远东,孙慧珍,等. 气候变化对大兴安岭北部蒙古栎种群动态的影响. 生态学报, 2002, **22**(7): 980~985.

[3] 李文华,廖俊国译. 高山林线生理生态学. 北京: 中国环境科学出版社, 1986. 13~15.

[6] 崔海亭. 关于华北山地高山和亚高山带的划分问题. 科学通报, 1983, **28** (8): 494~497.

[7] 崔海亭,戴君虎,唐志尧,等. 太白山高山林线的稳定性研究. 环境科学杂志, 1999, **11**: 207~210.

[8] 周晓峰,王晓春,韩士杰,等. 长白山岳桦苔原过渡带动态与气候变化. 地学前缘, 2002, **9**(1): 227~231.

[9] 于澎湃,刘鸿雁,崔海亭. 小五台山北台林线附近的植被及其与气候条件的关系分析. 应用生态学报, 2002, **13**(5): 523~528.

[10] 王晓春,韩士杰,邹春静,等. 长白山岳桦种群格局的地统计学分析. 应用生态学报, 2002, **13**(7): 781~784.

[11] 李江风,袁玉江,由希尧,等. 树木年轮水文学研究与应用. 北京: 科学出版社, 2000. 97~101.

[12] 吴祥定. 树木年轮气候学. 北京: 气象出版社, 1990. 67~74.

