ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

第 34 卷 第 6 期 Vol.34 No.6 2014

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 6 期　　2014 年 3 月　(半月刊)

目　　次

前沿理论与学科综述

全球气候变暖对凋落物分解的影响…… 宋　飘,张乃莉,马克平,等 (1327)

从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 …… 张晓刚,曾　辉 (1340)

论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法…… 宋豫秦,张晓蕾 (1352)

保幼激素在昆虫中的分子作用机理…… 金敏娜,林欣大 (1361)

岩画和壁画类文物微生物病害研究进展…… 李　强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)

基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 …… 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)

跨界保护区网络构建研究进展…… 王　伟,田　瑜,常　明,等 (1391)

个体与基础生态

速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率…… 邱　权,潘　昕,李吉跃,等 (1401)

三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响…… 褚延梅,杨　健,李景吉,等 (1411)

气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 …… 刘　文,张　强,贾亚男 (1418)

施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响…… 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)

基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 …… 刘　帅,吴舒辞,王　红,等 (1436)

近自然毛竹林空间结构动态变化…… 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)

基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究…… 刁松锋,邵文豪,姜景民,等 (1451)

不同林分起源的相容性生物量模型构建…… 符利勇,雷渊才,孙　伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响…… 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)

温度和 CO_2 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响 ……

…… 陈　婧,陈法军,刘满强,等 (1481)

中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 …… 李　洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)

遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价…… 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)

秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响…… 陆　斌,张胜利,李　侃,等 (1512)

磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响…… 马剑敏靳　萍,郭　萌,等 (1520)

普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型…… 何宗祥,刘　璐,李　诚,等 (1527)

北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 …… 修　晨,欧阳志云,郑　华 (1535)

基于河流生境调查的东河河流生境评价…… 王　强,袁兴中,刘　红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 …… 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异…… 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系…… 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应…… 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素…… 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 …… 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ￥90.00 * 1510 * 30 * 2014-03

封面图说:图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail:cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210121415
陈力,尹云鹤,赵东升,苑全治,吴绍洪.长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异.生态学报,2014,34(6):1568-1574.
Chen L, Yin Y H, Zhao D S, Yuan Q Z, Wu S H.Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China.Acta Ecologica Sinica,2014,34(6):1568-1574.

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异

陈 力[1],尹云鹤[1],赵东升[1],苑全治[2],吴绍洪[1,*]
(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘要:以长白落叶松和红松为例,探讨了长白山地区不同海拔树木生长对气候变化的响应。利用长白山北坡不同海拔 4 个长白落叶松样点和 6 个红松样点的树轮宽度资料建立差值年表,通过聚类分析、相关分析和响应分析等方法,研究树木生长特征及其气候响应。结果表明:两个树种年表的平均敏感度、树轮宽度指数的年际变率、信噪比等特征值较高,反映年表含有较强的环境信息。随海拔升高,长白落叶松年表特征值呈先下降后增加的趋势,红松年表特征值则呈先增加后下降的趋势。聚类分析将长白落叶松年表分成高、低海拔两类,红松年表分成高、中、低海拔三类。树木生长对气候响应存在海拔差异。高海拔长白落叶松生长受当年气温影响;低海拔长白落叶松生长对气候存在"滞后响应"。高海拔红松不仅受降水限制,且对气温有"滞后响应";中海拔红松不仅受气温限制,且对降水有"滞后响应";低海拔红松生长主要受气温限制。

关键词:长白落叶松;红松;海拔;树木年轮;气候变化;响应

Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China

CHEN Li[1], YIN Yunhe[1], ZHAO Dongsheng[1], YUAN Quanzhi[2], WU Shaohong[1,*]
1 *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*
2 *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094, *China*

Abstract: Trees growing at the margins of their species' distributional ranges are considered to be the most sensitive to environmental factors. In tree species distributed across wide elevational gradients and playing vital roles in local ecosystems, altitudinal variation in growth conditions may be of great importance for sustainable forest management. The importance of altitudinal gradients is thus often emphasized. To investigate climate-growth relationships at different elevations, tree-ring width chronologies of *Larix olgensis* and *Pinus koraiensis* were developed from four and six sampling sites, respectively, at different elevations of a north-facing slope in the Changbai Mountains of northeastern China. Ten final residual chronologies were produced. Mean sensitivity (MS) and standard deviation (SD) were used to describe interannual variability in ring width as a proportion of local mean ring width. The signal-to-noise ratio (SNR) served as an expression of the strength of the observed common signal among trees. All chronologies had relatively high MS, SD, and SNR values, which reflected the sensitivities of trees to environmental conditions. There were no consistent trends in statistical characteristics of tree-ring chronologies along the elevational gradient. For *L. olgensis*, all values decreased with increasing elevation, reaching a minimum at the mid-elevation site; increases in these values were then observed above the mid-elevation site, which suggested that trees in the mid-elevation site had a complacent growth pattern. For *P. koraiensis*, all values increased with increasing elevation, reaching a maximum at the mid-elevation site, and then decreasing. Hierarchical

基金项目:中国科学院战略先导科技专项(XDA05090300); 国家科技支撑计划资助项目(2012BAC19B02)
收稿日期:2012-10-12; **修订日期**:2013-07-29

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wush@ igsnrr.ac.cn

clustering analysis was used to highlight differences in radial growth among sites and to determine radial growth associations. For *L. olgensis*, chronologies were classified into two groups—low and high elevation—, while *P. koraiensis* chronologies at large were categorized into three groups—low, intermediate, and high elevation. Correlation and response functions were analyzed to determine primary climatic influences on growth. The bootstrap method was used to test significance. Monthly mean temperature and monthly total precipitation were used for the analysis. Our results suggest that along the elevational gradient, both species may respond in different ways to local climate change. March and June temperatures and previous November temperatures appeared to be the primary limitations to *L. olgensis* growth under either high or low elevation chronologies. Our data demonstrate that temperature is the dominant factor limiting growth at high elevations. At low elevations, no significant correlations with the current year's climatic conditions were discerned. The previous year's October temperatures and June precipitation affected *P. koraiensis* at high elevations. This lag in response suggests that a relatively warm autumn may favor the following year's growth. Precipitation in the previous year, temperature of the current year, and current spring temperatures had the greatest contributions to *P. koraiensis* growth at either intermediate or low elevations. In both species, lag effects were observed in growth responses to climate forces. Comparing the two species, *L. olgensis* is cold-tolerant, whereas *P. koraiensis* is warm-loving. The elevational differences in responses of *L. olgensis* and *P. koraiensis* to climate that were uncovered in this study should assist future regional dendroclimatological studies.

Key Words: *Larix olgensis*; *Pinus koraiensis*; altitudinal gradient; tree ring; climate change; climate response

由于树木年轮具有定年准确、分辨率高、分布广泛和易于获取等特点,因此成为气候变化研究的重要资料之一。研究表明,山地垂直带对气候变化反应的灵敏度远高于水平带[1],在山区树木生长对气候响应可能与海拔梯度相关[2-4]。通常认为高海拔或近林线处的树木对夏季气温有较强的响应,而低海拔的树木对降水有正响应[5-6]。但在中亚干旱和半干旱地区[7-8]以及阿根廷西北部地区[9]等地开展研究所得的结果与普遍认识并不一致,诸如高海拔树线处树木生长受降水而非夏季气温影响[9]。这些案例表明不同海拔树木生长变率还受到区域气候变率的影响。因而充分认识海拔梯度上树木生长对气候的响应机制对树轮气候学研究具有科学意义,同时也有助于评价和预测森林生态系统对未来气候响应。

东北地区是近年来气候变化较为敏感的区域之一[10]。长白山是东北地区最高山,垂直梯度大,目前有针对上限/下限树木生长对气候变化响应研究[11-14],但是针对整个海拔梯度的树木响应研究并不多见。已有研究发现红松分布下限对春季气温响应明显[11],上限长白落叶松对当年气温和降水均有较好响应[13],红松和长白落叶松分布上限/下限对气候响应差异明显[14]。本研究通过获取长白山北坡不同海拔长白落叶松(*Larix olgensis*)和红松(*Pinus koraiensis*)树轮资料,研究在海拔梯度上树木生长变化,探讨不同海拔树木生长对气候的响应,以期丰富该地区树轮气候学研究内容。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

长白山气候特征是具有温带大陆性山地气候,夏季温暖多雨,冬季寒冷漫长。因山体高,气候随海拔变化较大,山下年均温约 2.8 ℃,而山顶年均温约 -7.3 ℃,山下年降雨量为 600—900 mm,山顶为 1300—1500 mm。随海拔上升,植被呈现垂直分布带谱,大致分为:低山针阔叶混交林带(500—1100 m)、山地针叶林带(1100—1800 m)、亚高山岳桦林带(1800—2100 m)和高山苔原带(2100 m 以上)。

长白落叶松是长白山乡土树种,垂直分布范围在海拔 500—1950 m[15],4 个采样点分别为 L1、L2、L3 和 L4(其中 L4 样点的样本源于参考文献[11])。红松是长白山建群树种,垂直分布范围在海拔 500—1300 m,6 个采样点分别为 H1、H2、H3、H4、H5 和 H6。采样点位于天然次生林,郁闭度达 0.7。利用生长锥取样,在每棵树胸高处不同方向取两个树芯作为样本,个别树木取了 3 个树芯,取样时考虑满足大样本量的要求,每个采样点采集 20—30 棵树。树芯取出后,放进事先卷好的纸管中,做好编号。采样点

概况见表 1。

表 1 树轮采样点概况

Table 1 Description of the sampling sites

样点代号 Site code	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Elevation	时段 Time span	样本量(棵/样芯) No. trees/radii
L1	42°22′	128°23′	730	1816—2007	27/54
L2	42°22′	128°01′	794	1824—2007	29/62
L3	42°08′	128°27′	1258	1809—2007	24/49
L4	42°04′	128°04′	1790	1745—2002	29/59
H1	42°45′	127°58′	598	1893—2007	29/58
H2	42°24′	128°05′	760	1869—2007	32/65
H3	42°22′	128°23′	772	1856—2007	30/60
H4	42°21′	128°21′	830	1802—2007	33/66
H5	42°23′	128°22′	995	1747—2007	33/68
H6	42°08′	128°27′	1258	1818—2007	30/61

1.2 树轮年表建立

将样本晾干、粘贴和打磨,直至达到树木年轮学分析的要求,然后进行交叉定年和树轮宽度量测。量测采用德国 Frank Rinn 公司生产的 LINTAB 轮宽量测仪,精度为 0.01 mm。为确保定年和量测的准确性,用 COFECHA 程序[16]对量测结果进行检查,剔除不能交叉定年的序列。

由于本研究采样时间是 2008 年 6 月,所以树轮完整宽度的最后一年是 2007 年。通过 ARSTAN 程序[17],采用步长为 2/3 序列长度的样条函数去掉生长趋势和树木之间因竞争造成的低频波动,最终得到标准年表(STD)和差值年表(RES)。为了评价年表的质量,计算了年表的平均敏感度(MS)、标准差(SD)和一阶自相关系数(AC1)等,并对年表进行了共同区间分析,选取时段 1900—2002 年(长白落叶松,因 L4 年表截止年份是 2002 年),1900—2007 年(红松)。

1.3 气象资料

本研究采用的气象资料来自二道气象站(42°53′N,128°25′E,海拔 591 m,原为松江气象站,2005 年迁站并更名)。在气候分析之前,采用 Mann-Kendall[18]法对气象数据进行均一性检验,经过检验确认数据可靠,气温和降水数据资料变化相对均一。考虑到前一年的气候状况对当年树木生长的影响,分析时选取上年 7 月到当年 9 月的逐月平均气温和降水量。

1.4 研究方法

利用统计软件 SPSS19 分别对长白落叶松年表(1900—2002 年)、红松年表(1900—2007 年)进行聚类分析,检测树种空间格局的一致性[19]。根据相似系数的距离来衡量采样点之间的亲疏关系,分别选择不转换数据、皮尔逊相关和最远邻法等选项设置数据转换方式、聚类相似性和聚类方法等系统聚类参数。

利用软件 DendroClim2002[20]对年表与气候因子进行相关分析和响应分析。响应分析是通过主成分分析去除气候因子间自相关,再与年表做逐步回归,并将各主分量的回归系数转换成对应原始气候资料的回归系数,以回归系数的大小和正负表示树木生长对气候因子的响应程度。显著性检验用 Bootstrap 方法[21]随机执行 500 次。

2 结果与讨论

2.1 沿海拔梯度的树轮年表统计特征

表 2 列出长白落叶松和红松差值年表的统计量及共同区间分析结果。

对于长白落叶松,由表 2 可见在共同区间内,相关系数(r1, r2, r3)和样本总体代表性(EPS)值较高,表明树木生长所指示的环境一致性较好。平均敏感度(MS)衡量相邻年轮之间宽度变化,可以反映包括气候因子在内的环境的短期(或高频)变化,MS 值高可以指示年表所保留的气候信息丰富。L4 年表敏感度高于其他年表,反映生长在高海拔的树木对环境变化的敏感性高。针对马尾松(*Pinus massoniana*)[22]、青海云杉(*Pcicea crassifolia*)[23]等树种的年表分析也得出类似结论。年表间信噪比

(SNR)差异较大,其中 L2 年表最高,L1 年表最低。各年表 pc1 范围是 34%—50%,表明其共性较强。L2 与 L4 的 EPS、SNR 和第一主成分解释方差量(pc1)较大,L1 与 L3 较小。L1 与 L2 样点海拔差异不大,但是二者的统计量(MS、r1、r2、r3 和 SNR)差别明显,可能原因是 L1 样点位于沼泽苔草地带,小环境造成树木生长同步性不强。总体而言,随海拔增高,长白落叶松年表特征值表现出先下降后增加的趋势。

对于红松,比较表 2 各样点差值年表可见,平均敏感度(MS)范围是 0.141—0.217,其中 H5 年表最高 0.217,其余样点年表 MS 都不高于 0.20,H6 年表最低 0.141,表示生长在亚高海拔的红松对环境变化的敏感性更高。对于参数 SNR、EPS、PC1, H4 最高,H2 次之,H1 最小。总体而言,随海拔增高,红松年表特征值呈先增加再下降的趋势。

由上述分析可知两个树种对环境的敏感性均较强,但在空间尺度上,两个树种年表特征随海拔变化有所不同,分布高海拔的长白落叶松比林内的树木对环境响应更敏感,而红松则是相反的情况。这可能反映了树木遗传学特点不同。

表 2　树轮年表及共同区间统计量

Table 2　Statistics of common interval of residual chronologies

样点代号 Site code	L1	L2	L3	L4	H1	H2	H3	H4	H5	H6
mean	0.991	0.990	0.999	0.991	0.986	0.989	0.991	0.987	0.992	0.995
MS	0.176	0.229	0.168	0.284	0.171	0.185	0.198	0.190	0.217	0.141
SD	0.149	0.185	0.154	0.233	0.145	0.150	0.169	0.155	0.181	0.120
ac1	0.134	0.072	0.034	0.078	0.006	0.136	0.103	0.101	0.210	0.101
r1	0.300	0.478	0.346	0.433	0.347	0.400	0.389	0.435	0.359	0.319
r2	0.561	0.697	0.532	0.623	0.570	0.560	0.616	0.618	0.621	0.536
r3	0.295	0.474	0.341	0.429	0.341	0.397	0.384	0.431	0.353	0.314
SNR	20.186	46.770	21.162	42.783	17.039	38.690	28.590	46.142	29.154	22.062
EPS	0.953	0.979	0.955	0.977	0.945	0.975	0.966	0.979	0.967	0.957
pc1/%	34.4	49.7	37.1	45.1	37.6	41.8	40.9	45.0	38.1	34.2

* mean:年表指数平均值;MS:平均敏感度 Mean Sensitivity;SD:标准差 Standard Deviation;ac1:一阶自相关系数 Autocorrelation Order 1st ;r1:所有序列相关系数 Mean correlations among all radii;r2:树内相关系数 Between trees;r3:树间相关系数 Within trees;SNR:信噪比 Signal-to-Noise Ratio;EPS:样本量总体代表性 Express Population Signal;pc1:第一主成分解释方差量 Variance 1st Eigenvector

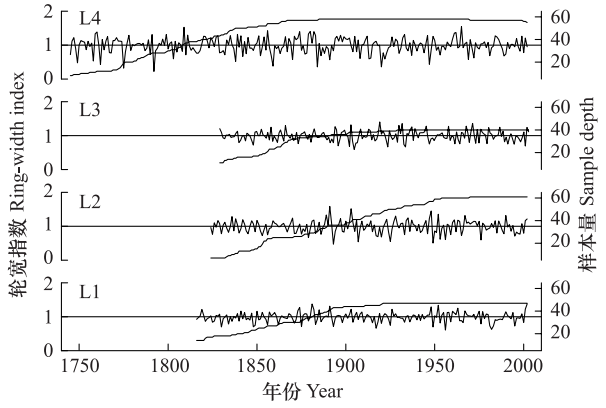

图 1　长白落叶松各样点树轮宽度差值年表

Fig.1　Ring-width chronologies of *Larix olgensis*

通常认为 EPS 值大于 0.85 的时段为可信时段,图 1、图 2 分别为长白落叶松和红松各样点自 EPS>0.85 时段起的差值年表及各时期样本量。L4 年表同其他样点年表表现出不同的变化特征,各曲线的峰值不一致(图 1)。在年际变化上,H3、H4 波动幅度较强,而 H6 波动幅度微弱(图 2)。

2.2　树木生长空间格局

海拔变化造成热量与降水的重新分布,可能影响树木生长格局,图 3 是反映长白落叶松聚类全过程的树形图。4 个年表聚为两类时,类间距离较大,表示样点间树木生长亲疏关系不同。第 1 类是高海拔年表 L4,第 2 类是中低海拔年表 L1、L2 和 L3。高海拔树轮年表序列明显长于低海拔。使用 ARSTAN

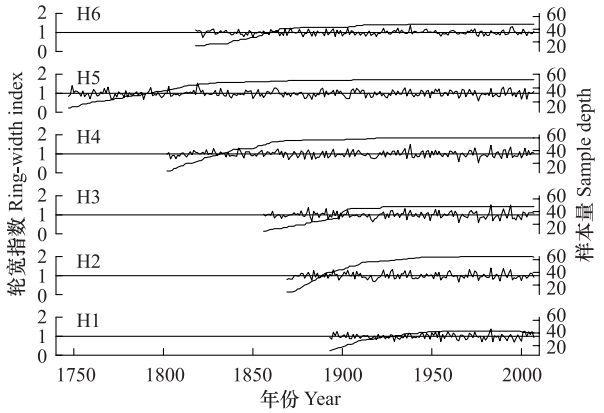

图 2 红松各样点树轮宽度差值年表

Fig.2 Ring-width chronologies of *Pinus koraiensis*

程序将第 2 类的各样点年表融合,建立新年表。

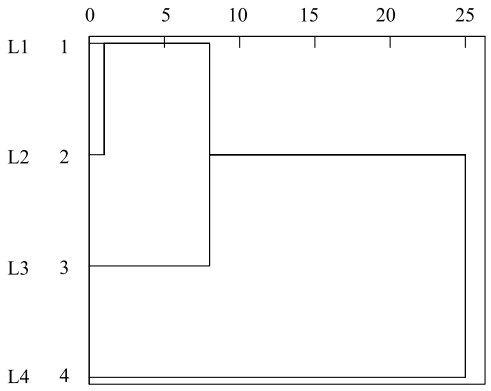

图 3 长白落叶松年表聚类分析树形图

Fig. 3 Dendrogram of hierarchical clustering analysis of chronologies of *Larix olgensis*

图 4 是反映红松聚类全过程的树形图。6 个年表聚为三类时,类间距离较大。各类组成为:第 1 类是高海拔年表 H5 和 H6;第 2 类是中海拔年表 H3、H4、H2;第 3 类是低海拔年表 H1。采用 ARSTAN 程序分别将第 1、2 类的各样点年表融合,建立新年表。

2.3 不同海拔树木生长对气候变化的响应

长白落叶松两类年表与气候要素响应分析结果如图 5 所示。第 1 类年表(即高海拔长白落叶松)与当年 3 月、6 月气温分别呈显著负、正相关(图 5)。上年气候要素与年表的相关系数均未达到显著水平。这与以往研究[12-13]发现生长在高海拔的长白落叶松包含较强的温度信号的结果相符。在高海拔样点处,3 月是冬末,气温在-10 ℃左右,冬季气温增加使得树木呼吸作用增加,养分消耗增加,不利于物质累积。6 月气温在 8 ℃左右,气温增高促进形成层活

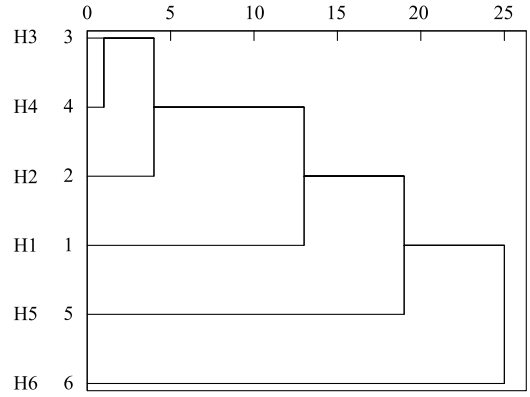

图 4 红松年表聚类分析树形图

Fig. 4 Dendrogram of hierarchical clustering analysis of chronologies of *Pinus koraiensis*

动能力,增加光合产物,形成宽轮。

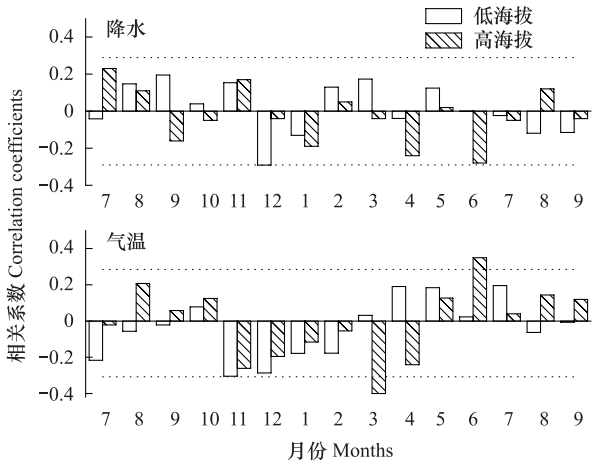

图 5 长白落叶松年表与气候要素相关分析结果

Fig. 5 Results of correlation analysis for the relationships between the residual chronologies of *Larix olgensis* and monthly climatic factors

图中虚线:$P < 0.05$;7—9: 上年 7 月—当年 9 月

第 2 类年表(即低海拔长白落叶松)与上年 11 月气温、上年 12 月降雪均呈显著负相关(图 5)。年表与当年气温、降水的相关系数均未达到显著水平。由于长白山冬季寒冷多雪,如果 11 月气温偏高,则呼吸作用加剧,消耗累积光合产物,不利于来年径向生长[24]。同理,12 月降雪偏多,树木呼吸作用增加,使冬季处于休眠状态的树木消耗增加,不利于营养物质存积,形成窄轮,这可能也体现长白落叶松耐旱性。

整体而言,水分能满足长白落叶松的生理要求,气温成为树木生长的主要限制因子,高海拔长白落

叶松生长受当年气候影响,低海拔长白落叶松生长对气候存在“滞后响应”。长白落叶松采样点最高海拔 1790 m,接近云冷杉林植被类型的上限,树轮中包含较强温度信号,这对重建历史温度也有一定的借鉴意义。

红松三类年表与气候要素响应分析结果如图 6 所示。第 1 类年表(即高海拔红松)与当年 6 月降水呈显著正相关,与上年 10 月气温呈显著正相关(图 6)。6 月份红松进入生长期,充沛的雨水能促进其生理活动能力,产生宽轮。上年 10 月气温(在 2 ℃左右)对红松生长起限制作用,这可能表明秋季气温越高,光合作用越强,形成的光合产物就越多,有利于细胞壁物质的形成。

第 2 类年表(即中海拔红松)与当年 4 月、9 月气温显著正相关,与上年 7 月降水显著负相关(图 6)。在中海拔处,4 月高温加速地温升高,促进根系活动和地上部分萌动;9 月是红松晚材形成时期,高温有利于红松生长;7 月进入生长季,是全年降水最多的月份,多雨影响光合作用的效率,相应缩短了生长时间,树体内存储的营养物质少,对来年生长不利。

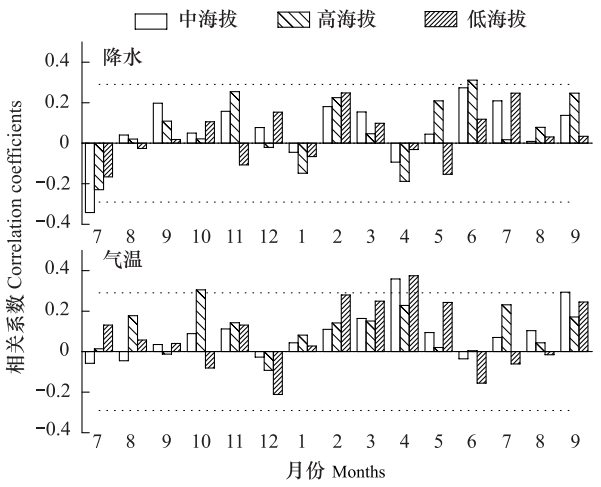

图 6　红松年表与气候要素相关分析结果

Fig. 6　Results of correlation analysis for the relationships between the residual chronologies of *Pinus koraiensis* and monthly climatic factors

第 3 类年表(即低海拔红松)与当年 4 月气温显著正相关(图 6)。结合中海拔红松响应结果,反映红松对初春气温较为敏感。王晓明等[25]发现 4 月最高气温升高有助于红松树轮生长。

整体看,气候影响整个海拔红松生长,高海拔红松不仅受降水限制,还对气温有“滞后响应”,中海拔红松不仅受气温限制,还对降水有“滞后响应”,低海拔红松生长主要受气温限制。红松采样点最高海拔 1258 m,是针阔混交林植被类型的上限,但不是整个森林上限,因此研究结果不适用“高海拔或近林线处的树木对夏季气温有较强的响应”结论。

高海拔长白落叶松样点比红松的高约 532 m,该样点的长白落叶松与气温显著相关,而对应的红松与气温、降水显著相关。低海拔长白落叶松样点与红松的高度相似,该样点长白落叶松生长与气温、降雪显著相关,红松生长与气温显著相关。该现象在一定程度上反映了长白落叶松耐寒,红松喜温的特点。

3　结论

基于树木年轮气候学分析方法,针对长白山地区的长白落叶松和红松生长对气候变化响应随海拔梯度变化进行了初步研究,得出如下结论:

(1)长白山北坡整个坡面各个采样点树木包含丰富的环境信息。随海拔升高,长白落叶松年表特征值呈先下降后增加的趋势,红松年表特征值呈先增加后下降的趋势。

(2)气候影响长白落叶松生长,其中气温作用更大。高海拔长白落叶松生长受当年气候要素影响,低海拔长白落叶松对气候要素有“滞后响应”。

(3)气候影响红松生长,高海拔红松不仅受降水限制,还对气温有“滞后响应”;中海拔红松不仅受气温限制,还对降水有“滞后响应”;低海拔红松生长主要受气温限制。

References:

[1] Walter H. Vegetation of the earth. New York: Spring-Verlag, 1984.

[2] Fritts H C, Smith D G, Cardis J W, Budelsky C A. Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in northern Arizona. Ecology, 1965, 46(4): 393-401.

[3] Hughes M K, Funkhouser G. Frequency-dependent climate signal in upper and lower forest border tree rings in the mountains of the Great Basin. Climate Change, 2003, 59(1/2): 233-244.

[4] Tardif J, Camarero J J, Ribas M, Gutierrez E. Spatiotemporal variability in tree growth in the Central Pyrenees: climatic and site influences. Ecological Monographs, 2003, 73(2): 241-257.

[5] Dittmar C, Zech W, Elling W. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and

environmental conditions in Europe—a dendroecological study. Forest Ecology and Management, 2003, 173(1/3): 63-78.

[6] Leal S, Melvin T M, Grabner M, Wimmer R, Briffa K R. Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate. Boreas, 2007, 36(4): 426-440.

[7] Liu L S, Shao X M, Liang E Y. Climate signals from tree ring chronologies of the upper and lower treelines in the Dulan region of the Northeastern Qinghai - Tibetan Plateau. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, 48(3): 278-285.

[8] Esper J, Frank D C, Wilson RJS, Buntgen U, Treydte K. Uniform growth trends among central Asian low- and high-elevation juniper tree sites. Trees, 2007, 21(2): 141-150.

[9] Morales M S, Villalba R, Grau H R, Paolini L. Rainfall-controlled tree growth in high-elevation subtropical treelines. Ecology, 2004, 85(11): 3080-3089.

[10] Wang Z Y, Ding Y H, He J H, Yu J. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. Acta Meteorogical Sinica, 2004, 62(2): 228-236.

[11] Zhu H F. A Temperature Reconstruction for Eastern Part of Northeast China Based on a Tree Ring Width Network [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2006.

[12] Wu X D, Shao X M. A preliminary study on impact of climate change on tree growth using tree ring-width data. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(Supplement): 92-101.

[13] Yu D P, Wang S Z, Tang L N, Dai L M, Wang Q L, Wang S X. Relationship between tree ring chronology of *Larix olgensis* in Changbai Mountains and the climate change. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(1): 14-20.

[14] Chen L, Wu S H, Dai E F. Analysis of the tree-ring width chronologies of *Pinus koraiensis* and *Larix olgensis* on Changbai Mountains, Northeast China. Geographical Research, 2011, 30(6): 1147-1155.

[15] Wang Z, Xu Z B. Major forest types and the community structure characteristics in the northern slope of Changbai Mountain (I)// Wang Z, ed. Forest Ecosystem Study. Shenyang: China Forestry Publishing House, 1980.

[16] Holmes R L. Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurements. Tree-ring Bulletin, 1983, 43: 69-78.

[17] Cook E R, Holmes R L. Guide for computer program ARSTAN// Grissino-Mayer H D, Holmes R L, Fritts H C, eds. The International Tree-ring Data Bank Program Library Version 2.0 User's Manual. Tucson: University of Arizona, 1996.

[18] Kendall M G, Gibbons J D. Rank Correlation Methods. London: Edward Arnold, 1990.

[19] Friedrichs D A, Neuwirth B, Winiger W, Löffler L. Methodologically induced differences in oak site classifications in a homogeneous tree-ring network. Dendrochronologia, 2008, 27(1): 21-30.

[20] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C^{++} program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers and Geosciences, 2004, 30(3): 303-311.

[21] Guio J. The bootstrapped response function. Tree-Ring Bulletin, 1991, 51:39-41.

[22] Lei J P, Xiao W F, Huang Z L, Zeng L X, Wang H Q, Li L J. Analysis of the tree-ring width chronology of *Pinus massoniana* in Yunyang County. Forest Research, 2009, 22(2): 269-273.

[23] Gou X H, Chen F H, Yang M X, Peng J F, Qiang W Y, Chen K. Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevation. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 172-176.

[24] Chen L, Wu S H, Pan T. Variability of climate-growth relationships along an elevation gradient in the Changbai Mountain, northeastern China. Trees, 2011, 25(6): 1133-1139.

[25] Wang X M, Zhao X H, Gao L S, Jiang Q B. Age-dependent growth responses of *Pinus koraiensis* to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6378-6387.

参考文献:

[1] 沃尔特 H. 世界植被: 陆地生物圈的生态系统. 中国科学院植物研究所生态室, 译. 北京: 科学出版社, 1984.

[10] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 虞俊. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.

[11] 朱海峰. 利用树轮宽度网络重建我国东北地区东部温度变化[D]. 北京: 北京师范大学, 2006.

[12] 吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试. 地理学报, 1996, 51(增刊): 92-101.

[13] 于大炮, 王顺忠, 唐立娜, 代力民, 王庆礼, 王绍先. 长白山北坡落叶松年轮年表及其与气候变化的关系. 应用生态学报, 2005, 16(1): 14-20.

[14] 陈力,吴绍洪,戴尔阜. 长白山红松和落叶松树轮宽度年表特征. 地理研究, 2011, 30(6): 1147-1155.

[15] 王战,徐振邦.长白山北坡主要森林类型及其群落结构特点(之一)// 王战.森林生态定位研究.沈阳:中国科学院长白山森林生态系统定位站,1980.

[22] 雷静品, 肖文发, 黄志霖, 曾立雄, 王怀情, 李良俊. 云阳马尾松树轮宽度年表特征研究. 林业科学研究, 2009, 22(2): 269-273.

[23] 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 彭剑锋, 强维亚, 陈拓. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化. 生态学报, 2004, 24(1): 172-176.

[25] 王晓明, 赵秀海, 高露双, 姜庆彪. 长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应. 生态学报, 2011, 31(21): 6378-6387.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Impacts of global warming on litter decomposition ..... SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)

From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ..... ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)

A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation ..... SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)

Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone ..... JIN Minna, LIN Xinda (1361)

Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings ..... LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)

Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology ..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)

A review oftransboundary protected areas network establishment ..... WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow seedlings ..... QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)

Three warming scenarios differentially affect themorphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides* ..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)

The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer and winter in a typical karst valley ..... LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)

Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco ..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)

The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram ..... LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)

Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands ..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)

Phenotypic diversity in natural populationsof *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits ..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)

Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtonema* in extensively managed *Phyllostachys edulis* plantation ..... FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)

Short-term effects of CO_2 concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and nitrogen, and nematode communities ..... CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et alg (1481)

Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961 ..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)

Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing ..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)

Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the Qinling Mountains ..... LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* …… MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)

Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species …… HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)

Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China …… XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)

Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method …… WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

Landscape, Regional and Global Ecology

Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China …… GUO Junting, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)

Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China …… CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)

The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang …… LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)

The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe …… YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)

Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region …… WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

Resource and Industrial Ecology

Transnational land use and its potential environmental consequence …… LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933　　CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址: 100085 北京海淀区双清路 18 号　**电　　话**:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@ rcees.ac.cn　**网　　址**: www.ecologica.cn

本期责任副主编　薛建辉　　**编辑部主任**　孔红梅　　**执行编辑**　刘天星　段　靖

生　态　学　报
(SHENGTAI　XUEBAO)
(半月刊　1981 年 3 月创刊)
第 34 卷　第 6 期　(2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34　No. 6 (March, 2014)

编　　辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@ rcees.ac.cn
主　　编	王如松
主　　管	中国科学技术协会
主　　办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085
出　　版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717
印　　刷	北京北林印刷厂
发　　行	科学出版社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@ cspg.net
订　　购	全国各地邮局
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044
广告经营许可证	京海工商广字第 8013 号

Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@ rcees.ac.cn
Editor-in-chief	WANG Rusong
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@ cspg.net
Domestic **Foreign**	All Local Post Offices in China China International Book Trading Corporation Add:P.O.Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933　CN 11-2031/Q　　国内外公开发行　　国内邮发代号 82-7　　国外发行代号 M670　　定价 90.00 元