

广西柳州杉木种源树轮宽度对温度与湿度的年际响应

朱安明, 段爱国*, 张建国, 张雄清

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 为选择适合试验区域未来气候变化条件下生长的杉木种源, [方法] 运用年轮气候学方法, 研究 52 个杉木地理种源 3 个树轮宽度指标对气候因子的响应。[结果] 整轮宽度、早材宽度和晚材宽度与年平均气温的响应呈强负相关关系, 相关系数最大值分别为 -0.515 、 -0.590 和 -0.451 ; 整轮宽度、早材宽度和晚材宽度与年最高气温均呈强负相关关系, 相关系数最大值分别为 -0.482 、 -0.624 和 -0.499 。[结论] 未来试点年平均气温有升高的趋势, 这将会在一定程度上抑制杉木的径向生长, 而选择对温度响应不太敏感的湖南江华、广西博白和广西资源种源在试验林所在区域进行造林, 将是解决这一问题的有效途径。

关键词: 杉木; 种源; 树轮; 气候

中图分类号: S791.27

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)01-0053-10

Response to Annual Value of Temperature and Humidity for Tree Ring Width of *Cunninghamia lanceolata* Provenance Trial Stand in Liuzhou, Guangxi

ZHU An-ming, DUAN Ai-guo, ZHANG Jian-guo, ZHANG Xiong-qing

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To select the provenances adaptive to future's climate change. [Method] The different responses of tree ring width of fifty-two provenances to climate were studied by the method of dendroclimatology. [Result] It indicated that the response of the whole tree ring width, earlywood width and latewood width to mean annual temperature was obvious, the maximum correlation coefficients are -0.515 , -0.590 and -0.451 respectively. The response of the whole tree ring width, earlywood width and latewood width to the maximum annual temperature was also obvious. The maximum correlation coefficients are -0.482 , -0.624 and -0.499 respectively. [Conclusion] In recent years, there is an increasing trend of mean annual temperature of test plot, which will be unfavorable to tree growth to a certain extent. It will be an effective way to solve this problem to select appropriate provenance in the process of afforestation.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; provenance; tree ring; climate

杉木是我国重要的速生用材树种, 广泛分布于我国南方 18 个省区。由于地理、生殖隔离与长期的

自然选择和人工选择, 形成了不同的杉木地理种源^[1]。为选择优良种源用于造林, 于 20 世纪 70 年

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“杉木不同地理种源树轮对气候变化的响应(31370629)”；国家 863 计划专题“杉木地理种源生长期评价及优良无性系选育(2011AA100203-3)”及江苏高校协同创新计划项目

作者简介: 朱安明(1992—), 男, 中国林业科学研究院林业所, 硕士研究生。主攻方向: 人工林定向培育。

* 通讯作者: 段爱国, 男, 中国林业科学研究院林业研究所, 研究员。E-mail: duanag@163.com

代中期,由中国林科院林业研究所牵头组织开展了杉木全分布区的地理种源试验,系统展开杉木种源生长性状、抗性及适应性评价研究^[2]。

通过树种种源选择以主动适应气候变化,已成为人类应对气候变化的重要途径。以种源试验为基础,结合树木年轮学研究方法研究树木不同种源对气候的响应差异受到国外学者的广泛关注,并取得一定的成果^[3-12]。国内基于地理种源试验开展树木树轮对气候变化响应研究尚未见报道,且国外相关研究亦存在选择种源数量较少,树轮指标较为单一,多树轮指标结合分析研究少见等问题^[13]。

以广西柳州武宣县包含207个杉木全分布区地理种源的成熟龄种源试验林为研究对象,本研究首次探讨杉木种源试验林树轮宽度对温度与湿度年值的响应,以揭示不同杉木地理种源径向生长对气候变化的响应差异,为未来气候变化条件下杉木造林种源选择提供依据。

1 试验地概况

试验地位于广西壮族自治区柳州市武宣县六峰山林场,为桂中丘陵地区,23°42'N,109°50'E,年平

均气温21.1℃,年降水量1418.5mm(图1),年蒸发量1969mm,相对湿度76%,全年日照时数1823.7h,试验地海拔210m,地势平缓,土层深厚,结构良好。

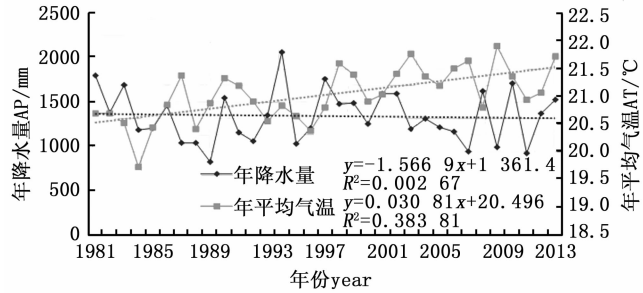


图1 广西柳州武宣试验点种源林主要气候因子变化趋势
Fig.1 The change trend of the annual mean temperature and the total precipitation at the test site of Wuxuan county in Guangxi

2 研究方法

2.1 试验设计

杉木种源试验林栽植于1981年春季,参试地理种源为207个(图2),基本覆盖杉木全分布区。随机区组设计,每小区4株,10次重复,造林株行距2m×2m,12年生时试验林实施了对角疏伐1次,以

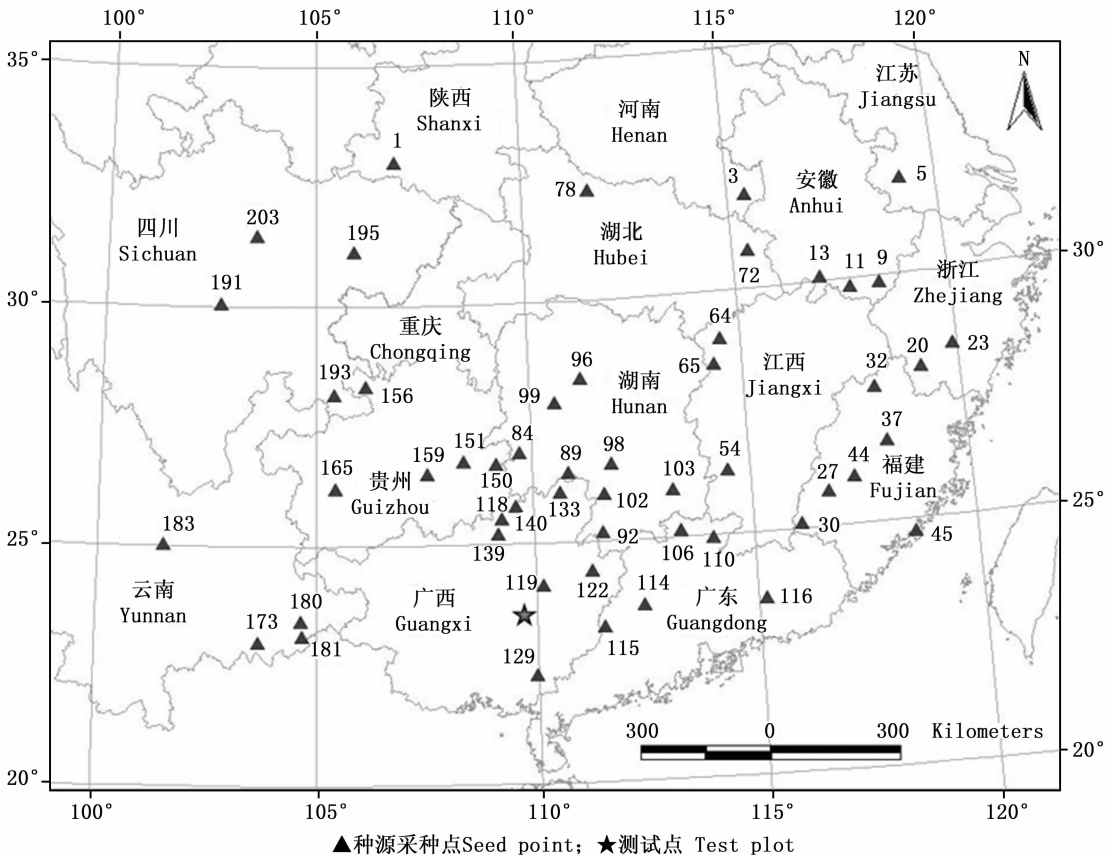


图2 参试杉木种源地及采样信息

Fig.2 The location distribution of 52 Chinese fir proveniences

消除林木彼此间竞争对不同种源生长的差异性影响。所有参试种源均采用相同的栽培技术措施。

2.2 样品采集与年表建立

2013年秋季进行圆盘采样,试验林34年生,林分生长健康,处于郁闭状态,林分平均胸径20.23 cm,生长量最小的种源平均胸径16.18 cm,生长量最大的种源平均胸径达24.41 cm。结合商业采伐,不同种源每个单株各取1个0号圆盘(伐根处),共采集2874个圆盘样品。依据圆盘数大于10个,且形状规则、经纬度分布均匀的原则,筛选出52个种源(图2)共614个圆盘进行扫描、定年。

采用LignoStation年轮分析仪对不同种源各圆盘样本进行扫描,应用年轮分析仪自带软件进行年轮界线的划分,并量测树轮自髓心往外各年轮宽度,后借助交叉定年软件COFECHA程序对所有定好年的序列作检验^[14],保证用于年表建立的树轮序列与试验林实际树龄对应无误。定年后,取年轮内最大密度和最小密度中间值作为早晚材划分界线,运用年轮分析仪自带软件标记,并精确扫描获取不同种源各单株树轮整轮宽度、早材宽度、晚材宽度3个树轮宽度指标。

为消除遗传特性在树木生长中对树轮序列的影响,运用hugershoff生长曲线^[15]对树轮宽度每条序列逐个进行生长趋势拟合,剔除自身生长趋势的影响,进而计算得到树轮宽度指数序列,按种源将种源内单株树轮宽度指数序列平均获得每一种源的树轮宽度标准化年表,再利用标准化序列的自回归模型,去除序列的自相关性,获得每一种源的树轮宽度差值年表,该过程采用通用软件ARSTAN完成^[16]。根据年表统计特征,标准化年表的统计特征普遍高于差值年表,因此本文采用标准化年表进行分析^[17]。

2.3 气象资料获取与数据分析

气候资料来源于国家气象信息中心(<http://www.cma.gov.cn/>),种源试验林栽植地气候数据采用广西来宾站点(国家标准气象台站)数据,该站点离种源试验林距离在100 km内,中间无高山阻隔;气候因子选择年降水量(AP)、年平均气温(MAT)、年最高气温(MaxAT)、年最低气温(MinAT)和年湿润度指数(AHM)5个气象因子,其中,湿润度指数是一个能反映温度与降水量相互作用的因子,具有一定生理意义^[9],区间为1981—2013年,该站点气象数据可靠,气象资料变化相对单一。

$$AHM = (MAT + 10) / (AP / 1000)$$

年表与气候要素之间的相关分析用SPSS 19.0软件来计算。

3 结果与分析

3.1 整轮宽度与气候因子的相关性

据表1可知:参试种源的整轮宽度与年平均气温均负相关,其中,河南商城、江苏句容、浙江丽水、福建南平、湖北罗田、广东郁南、广西博白、云南楚雄、四川天全和四川古蔺种源的整轮宽度与年均气温呈显著负相关;而贵州六枝种源($r = -0.472$)和云南屏边种源($r = -0.515$)整轮宽度与年平均气温呈极显著负相关,因二者地处云贵高原区,海拔较高,属于杉木分布区的边缘产区,气候较不适宜杉木生长,对气候变化较为敏感,不适应试点的气候,所以整轮宽度随年平均气温的变化而明显变化。

整轮宽度与年最高气温呈较为明显的负相关关系,其中,陕西南郑、江苏句容、安徽祁门、浙江龙泉、浙江丽水、福建崇安、江西修水、湖北罗田、湖北谷城、湖南祁阳、广东紫金、广西融水四荣、广西融水白云、贵州剑河、贵州麻江和云南麻栗坡种源的整轮宽度与年最高气温显著负相关;福建连城、福建永安、湖南江华、湖南叙浦、广东郁南、广西贺县和四川天全种源的整轮宽度与年最高气温呈极显著的负相关,这些种源多分布在杉木中心产区,种源地温度较适于杉木生长,而试点地处南亚热带,年最高气温比种源地高,而年平均气温越高反而不利于整轮宽度的生长。

整轮宽度与年降水量之间的相关性较弱,年降水量对不同种源整轮宽度的影响不同,其中,安徽东至和江西遂川等13个种源整轮宽度与年降水量不显著负相关,其他种源与年降水量呈不显著正相关。绝大多数种源整轮宽度与年最低气温呈不显著正相关,仅少量种源(6个)整轮宽度与年最低气温呈不显著负相关;整轮宽度与年湿润度指数的相关性也较弱,其中,江西铜鼓和湖南新宁等15个种源整轮宽度与年湿润度指数呈不显著正相关,其他种源整轮宽度与之呈不显著负相关。

种源地的经纬度是影响种源树轮差异的重要气候因素^[26],通过对整轮宽度与各年际气候因子的相关系数随种源地经纬度变化的研究发现(图3):随经度的升高,整轮宽度与年平均气温的相关系数呈上升趋势,整轮宽度与年平均气温的负相关程度随经度的升高而变弱;整轮宽度与年降水量的正相关

表1 整轮宽度(年表)与气候因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the whole tree ring width (chronology) and climatic factors

种源编号 Provenance No.	种源名称 Provenance name	整轮宽度 The whole ting width/mm	年降水量 AP	年平均气温 MAT	年最高气温 MaxAT	年最低气温 MinAT	湿润度指数 AHM
1	陕西南郑	2.56	0.116	-0.156	-0.406 *	0.135	-0.084
3	河南商城	2.38	0.027	-0.351 *	-0.336	0.016	-0.023
5	江苏句容	2.94	0.078	-0.406 *	-0.394 *	0.102	-0.060
9	安徽歙县	2.59	0.052	-0.235	-0.305	0.038	-0.063
11	安徽祁门	3.10	0.051	-0.197	-0.389 *	0.146	-0.059
13	安徽东至	3.37	-0.018	-0.221	-0.310	0.166	0.025
20	浙江龙泉	2.97	0.019	-0.314	-0.356 *	0.047	-0.043
23	浙江丽水	2.72	0.084	-0.385 *	-0.345 *	0.257	-0.038
27	福建连城	3.01	0.192	-0.157	-0.455 **	0.272	-0.195
30	福建武平	3.30	0.010	-0.209	-0.296	0.009	-0.024
32	福建崇安	3.59	0.208	-0.096	-0.442 *	0.085	-0.224
37	福建南平	3.01	0.032	-0.416 *	-0.305	0.060	-0.020
44	福建永安	2.87	0.063	-0.209	-0.447 **	0.232	-0.060
45	福建长汀	3.34	0.048	-0.139	-0.132	0.070	-0.040
54	江西遂川	3.07	-0.012	-0.107	-0.319	0.116	-0.013
64	江西修水	2.70	0.045	-0.010	-0.348 *	0.176	-0.037
65	江西铜鼓	3.07	-0.172	-0.263	-0.210	0.088	0.189
72	湖北罗田	2.97	0.105	-0.356 *	-0.390 *	0.036	-0.107
78	湖北谷城	2.94	-0.072	-0.194	-0.350 *	0.124	0.051
84	湖南会同	3.36	0.070	-0.335	-0.338	0.085	-0.085
89	湖南新宁	2.55	-0.061	-0.019	-0.296	0.255	0.071
92	湖南江华	3.18	0.173	-0.257	-0.482 **	0.174	-0.190
96	湖南安化	3.13	0.019	-0.188	-0.248	0.039	-0.009
98	湖南祁阳	2.92	0.008	-0.237	-0.419 *	0.050	-0.006
99	湖南叙浦	2.89	0.050	-0.334	-0.464 **	0.072	-0.040
102	湖南双牌	2.77	0.098	-0.085	-0.343	0.055	-0.075
103	湖南资兴	2.87	0.098	-0.085	-0.343	0.055	-0.075
106	广东乐昌	2.78	0.050	-0.187	-0.301	0.251	0.007
110	广东始兴	2.87	0.104	-0.239	-0.334	0.176	-0.071
114	广东广宁	2.50	-0.171	-0.301	-0.095	-0.076	0.169
115	广东郁南	3.11	0.043	-0.363 *	-0.463 **	0.067	-0.025
116	广东紫金	2.75	0.140	-0.228	-0.357 *	0.180	-0.137
118	广西三江	3.54	0.004	-0.256	-0.319	0.082	0.005
119	广西金秀	3.06	-0.201	-0.174	-0.271	0.152	0.197
122	广西贺县	2.98	0.246	-0.238	-0.448 **	0.284	-0.210
129	广西博白	3.03	-0.124	-0.387 *	-0.317	0.075	0.117
133	广西资源	2.88	-0.023	-0.308	-0.288	0.216	0.026
139	广西融水四荣	3.17	0.018	-0.168	-0.379 *	0.213	-0.002
140	广西融水白云	3.45	0.119	-0.086	-0.379 *	0.031	-0.147
150	贵州锦屏	3.46	0.007	-0.216	-0.276	0.164	0.007
151	贵州剑河	3.17	0.230	-0.226	-0.364 *	0.203	-0.197
156	贵州习水	3.03	0.016	-0.120	-0.301	0.225	-0.019
159	贵州麻江	3.06	0.086	-0.288	-0.391 *	0.078	-0.105
165	贵州六枝	2.45	-0.021	-0.472 **	-0.201	-0.099	0.012
173	云南屏边	2.50	-0.102	-0.515 **	-0.209	-0.071	0.133
180	云南西畴	2.82	0.049	-0.284	-0.260	-0.017	-0.068
181	云南麻栗坡	3.01	0.108	-0.340	-0.368 *	0.198	-0.076
183	云南楚雄	3.45	-0.125	-0.427 *	-0.227	-0.110	0.091
191	四川天全	2.49	0.176	-0.377 *	-0.448 **	0.059	-0.146
193	四川叙永	3.15	-0.023	-0.284	-0.279	0.121	0.015
195	四川古蔺	2.69	0.058	-0.425 *	-0.288	-0.021	-0.091
203	四川汶川	3.12	0.158	-0.264	-0.316	0.008	-0.141

程度随经度的升高呈不明显增强趋势,整轮宽度与年最低气温的正相关程度随经度升高而显著增强($r = 0.285$),而与年最高气温、湿润度指数之间的负相关程度随经度升高具不显著增强趋势;随纬度升高,整轮宽度与年平均气温、年最低气温的相关系数变化不明显,与年降水量的正相关程度随纬度的升高

而增强,与年最高气温、湿润度指数之间的负相关程度也随纬度的升高而不显著增强。地理种源整轮宽度虽与年平均气温和年最高气温呈较强负相关关系,但这种相关性随经、纬度的变化趋势并不显著;而高经度即东部地区种源整轮宽度较中西部地区种源更易受到年最低气温高低的影响。

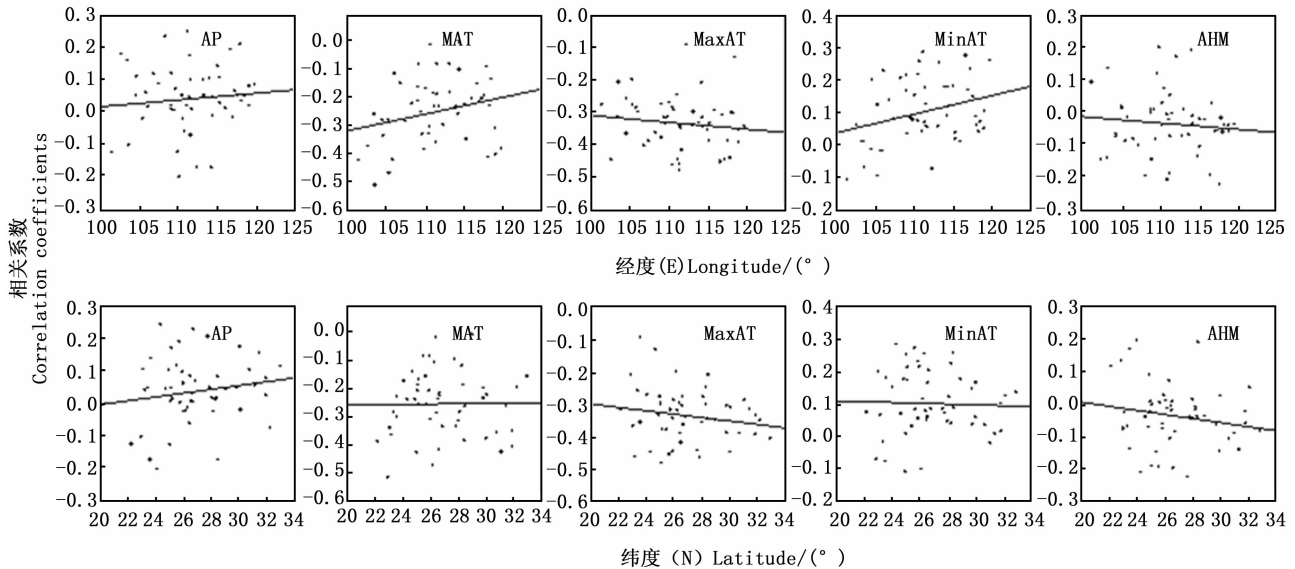


图3 不同种源整轮宽度与气候因子的相关系数随经(纬)度的变化

Fig. 3 Scatter diagram of correlation coefficients between the whole tree ring width and interannual climatic factors along with longitude and latitude of provenances

3.2 早材宽度与气候因子的相关性

从表2可知:早材宽度与年平均气温呈较明显的负相关关系,其中,江苏句容、浙江龙泉、福建南平、湖南双牌、广东乐昌、广东紫金、广西贺县、广西资源、云南麻栗坡和云南楚雄种源的早材宽度与年平均气温之间呈显著负相关;广西博白($r = -0.455$)、贵州六枝($r = -0.543$)、云南屏边($r = -0.590$)、四川天全($r = -0.480$)和四川古蔺($r = -0.470$)种源早材宽度与年平均气温呈极显著负相关,这些达显著水平的地理种源地处杉木分布区中带和南带西部边缘,对气候变化较为敏感,且不适应试点的气候,所以早材宽度与气候要素之间的关系极显著;而广西融水白云种源早材宽度与年平均气温呈弱正相关关系,因为广西融水白云种源年平均气温 $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,高于试点年平均温,所以试点温度升高有利于该种源树轮早材宽度的生长,早材宽度与年平均气温正相关。

早材宽度与年最高气温呈较明显的负相关关系,陕西南郑、安徽祁门、安徽东至、浙江丽水、福建连城、福建崇安、福建永安、湖南江华、湖南叙浦、广东紫金、贵州剑河、贵州麻江和四川天全种源的早材

宽度与年最高气温显著负相关,广东郁南($r = -0.624$)和贵州锦屏($r = -0.459$)种源的早材宽度与年最高气温极显著负相关;而福建长汀和广东广宁种源的早材宽度与年最高气温正相关不显著,这可能与试验地和种源地的温度差异有关;早材宽度与年最低气温的相关性较弱,其中,福建南平和广东乐昌等13个种源早材宽度与年最低气温负相关不显著,其他种源早材宽度与年最低气温呈不显著正相关关系。

早材宽度与年降水量之间的相关性较弱,不同种源早材宽度对年降水量的响应不同,其中,福建永安和湖北谷城等24个种源早材宽度与年降水量呈不显著负相关,其他种源早材宽度与年降水量之间呈正相关;早材宽度与湿润度指数之间的相关性也较弱,其中,福建长汀和江西铜鼓等24个种源早材宽度与湿润度指数呈不显著正相关,其他种源早材宽度与之呈不显著负相关关系。

通过对早材宽度与各年际气候因子的相关性随种源地经纬度变化的研究发现(图4):早材宽度与年平均气温的相关系数随经度的升高而极显著上

表 2 早材宽度(年表)与气候因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the earlywood width (chronology) and climatic factors

种源编号 Provenance No.	种源名称 Provenance name	早材宽度 The earlywood width/mm	年降水量 AP	年平均气温 MAT	年最高气温 MaxAT	年最低气温 MinAT	湿润度指数 AHM
1	陕西南郑	1.31	0.144	-0.286	-0.422 *	0.091	-0.127
3	河南商城	1.21	-0.029	-0.253	-0.248	0.048	0.047
5	江苏句容	1.58	0.049	-0.387 *	-0.275	0.057	-0.028
9	安徽歙县	1.47	0.068	-0.188	-0.332	0.113	-0.058
11	安徽祁门	1.58	0.091	-0.170	-0.355 *	0.110	-0.074
13	安徽东至	1.87	0.064	-0.024	-0.348 *	0.250	-0.051
20	浙江龙泉	1.61	-0.011	-0.353 *	-0.244	0.069	-0.007
23	浙江丽水	1.52	0.083	-0.325	-0.367 *	0.251	-0.065
27	福建连城	1.63	0.146	-0.212	-0.412 *	0.157	-0.144
30	福建武平	1.87	0.016	-0.169	-0.180	0.028	-0.027
32	福建崇安	2.14	0.136	-0.018	-0.435 *	0.105	-0.160
37	福建南平	1.71	-0.169	-0.390 *	-0.037	-0.087	0.114
44	福建永安	1.66	-0.074	-0.170	-0.386 *	0.094	0.062
45	福建长汀	1.85	-0.078	-0.036	0.004	-0.024	0.047
54	江西遂川	1.84	-0.112	-0.115	-0.150	0.020	0.108
64	江西修水	1.51	0.048	-0.002	-0.182	0.077	-0.067
65	江西铜鼓	1.66	-0.118	-0.229	-0.281	0.123	0.135
72	湖北罗田	1.69	0.158	-0.298	-0.314	0.094	-0.141
78	湖北谷城	1.61	-0.151	-0.063	-0.234	-0.112	0.136
84	湖南会同	1.83	-0.083	-0.226	-0.245	0.075	0.079
89	湖南新宁	1.45	0.075	-0.093	-0.116	0.209	0.000
92	湖南江华	1.92	0.109	-0.265	-0.382 *	0.130	-0.123
96	湖南安化	1.66	-0.067	-0.295	-0.022	0.013	0.077
98	湖南祁阳	1.54	0.193	-0.247	-0.343	0.135	-0.194
99	湖南叙浦	1.66	-0.071	-0.296	-0.381 *	0.044	0.086
102	湖南双牌	1.55	-0.099	-0.432 *	-0.162	0.043	0.073
103	湖南资兴	1.70	0.083	-0.112	-0.312	0.154	-0.026
106	广东乐昌	1.63	-0.122	-0.356 *	-0.039	-0.010	0.157
110	广东始兴	1.73	0.021	-0.274	-0.300	0.165	0.018
114	广东广宁	1.43	-0.091	-0.328	0.062	-0.061	0.150
115	广东郁南	1.72	0.120	-0.213	-0.624 **	0.077	-0.099
116	广东紫金	1.35	0.166	-0.357 *	-0.390 *	0.128	-0.146
118	广西三江	1.88	-0.036	-0.337	-0.118	-0.038	0.031
119	广西金秀	1.68	-0.270	-0.245	-0.099	0.052	0.283
122	广西贺县	1.48	0.085	-0.367 *	-0.342	0.144	-0.063
129	广西博白	1.62	-0.008	-0.455 **	-0.157	0.021	0.024
133	广西资源	1.61	-0.128	-0.388 *	-0.074	0.049	0.124
139	广西融水四荣	1.86	-0.050	-0.233	-0.326	0.135	0.025
140	广西融水白云	2.02	0.021	0.075	-0.300	0.102	-0.043
150	贵州锦屏	2.19	0.070	-0.191	-0.459 **	0.275	-0.049
151	贵州剑河	1.83	0.201	-0.201	-0.394 *	0.119	-0.168
156	贵州习水	2.01	0.080	-0.128	-0.244	0.237	-0.075
159	贵州麻江	1.71	0.146	-0.316	-0.429 *	0.074	-0.138
165	贵州六枝	1.28	-0.144	-0.543 **	-0.090	-0.238	0.130
173	云南屏边	1.33	-0.088	-0.590 **	-0.096	-0.127	0.125
180	云南西畴	1.64	-0.028	-0.224	-0.179	-0.019	0.041
181	云南麻栗坡	1.68	0.074	-0.434 *	-0.197	0.031	-0.058
183	云南楚雄	2.01	-0.034	-0.431 *	-0.264	-0.132	-0.025
191	四川天全	1.30	0.110	-0.480 **	-0.360 *	-0.079	-0.069
193	四川叙永	1.80	0.004	-0.315	-0.230	0.082	-0.003
195	四川古蔺	1.54	-0.025	-0.470 **	-0.194	-0.018	0.003
203	四川汶川	1.60	0.099	-0.267	-0.195	-0.090	-0.079

升($r=0.390$),但因为二者之间存在负相关,所以早材宽度与年平均气温的负相关程度随经度升高而变弱。同理可知,早材宽度与年最低气温的正相关程度随经度的升高而极显著增强($r=0.383$),与年最高气温、年降水量和湿润度指数之间的相关程度随经度的变化不大;随纬度升高,早材宽度与年平均气

温、年最低气温相关系数的变化不明显,与年最高气温的负相关程度呈不显著增强的趋势,与年降水量的正相关程度有所增强,与湿润度指数之间的负相关程度也有所增强。值得指出的是,随经度的升高,早材宽度与年平均气温的负相关性明显减弱,而与年最低气温的正相关性明显增强。

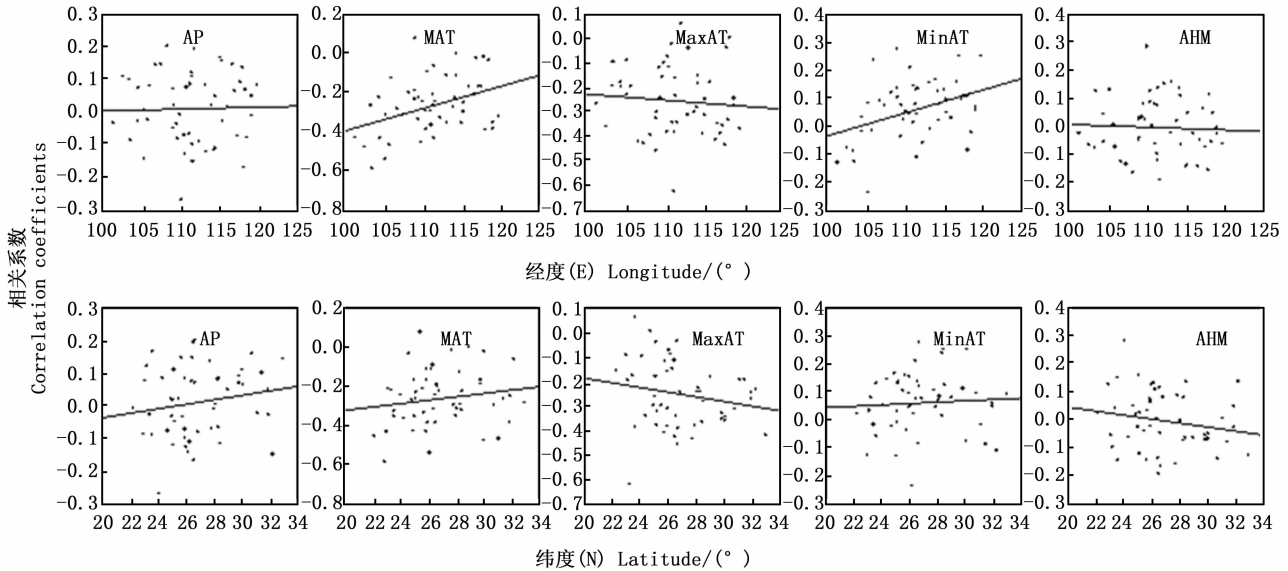


图4 不同种源早材宽度与气候因子的相关系数随经(纬)度的变化

Fig. 4 Scatter diagram of correlation coefficients between the earlywood width and interannual climatic factors along with longitude and latitude of provenances

3.3 晚材宽度与气候因子的相关性

由表3可看出:参试种源的晚材宽度与年平均气温均为负相关关系,其中,浙江丽水、福建武平、江西铜鼓、湖北罗田、湖南会同、湖南双牌、广东郁南、广西博白、贵州六枝、云南屏边、云南麻栗坡和云南楚雄种源的晚材宽度与年平均气温均显著负相关;而江苏句容种源($r=-0.451$)晚材宽度与年平均气温均极显著负相关,该种源地处杉木分布区北带北缘,对气候变化较敏感,原地气候与试点气候差异较大,不适应试点气候,表现出晚材宽度与年平均气温极显著负相关。

晚材宽度与年最高气温呈较为明显的负相关关系,其中,江苏句容、福建南平、福建永安、湖南祁阳、广东郁南、广西三江、广西融水白云和四川古蔺种源的晚材宽度与年最高气温均显著负相关,湖北罗田($r=-0.470$)、湖南江华($r=-0.498$)、湖南溆浦($r=-0.493$)和四川天全($r=-0.499$)种源晚材宽度与年最高气温均极显著负相关。年最高气温的变化可以反映夏季温度的变化,因试点温度较这些种源地高,当夏季温度过高导致蒸腾作用强烈,不利于杉木

树轮的生长^[31];晚材宽度与年最低温的相关性较弱,其中,福建武平和湖北罗田等17个种源的晚材宽度与年最低气温呈不显著负相关,其他种源晚材宽度与年最低气温呈不显著正相关。

晚材宽度与年降水量之间的相关性较弱,年降水量对不同种源晚材宽度的影响不同,其中,安徽祁门和福建南平等16个种源晚材宽度与年降水量呈不显著正相关,其他种源晚材宽度与年降水量呈不显著负相关;晚材宽度与湿润度指数的相关性也较弱,其中,福建崇安和湖南会同等16个种源晚材宽度与湿润度指数呈不显著负相关,其他种源与湿润度指数呈不显著正相关。

研究发现(图5):随经度的升高,晚材宽度与各指标间的相关系数变化趋势均不明显;随纬度的升高,晚材宽度与年降水量、年平均气温、年最低气温和湿润度指数的相关系数变化不明显,而与年最高气温的负相关程度随纬度升高而呈显著增强的趋势($r=0.272$)。这表明高纬度地理种源的晚材宽度较低纬度种源更易受到年最高气温的限制。

表3 晚材宽度(年表)与气候因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between the latewood width (chronology) and climatic factors

种源编号 Provenance No.	种源名称 Provenance name	晚材宽度 The latewood width/mm	年降水量 AP	年平均气温 MAT	年最高气温 MaxAT	年最低气温 MinAT	湿润度指数 AHM
1	陕西南郑	1.24	-0.049	-0.242	-0.260	0.013	0.071
3	河南商城	1.17	-0.043	-0.312	-0.290	0.025	0.027
5	江苏句容	1.37	-0.055	-0.451**	-0.359*	0.001	0.068
9	安徽歙县	1.13	-0.013	-0.295	-0.340	-0.183	-0.048
11	安徽祁门	1.52	0.029	-0.322	-0.264	0.101	0.002
13	安徽东至	1.39	-0.143	-0.250	-0.265	0.063	0.126
20	浙江龙泉	1.36	-0.021	-0.298	-0.204	0.016	0.024
23	浙江丽水	1.20	-0.032	-0.384*	-0.221	0.117	0.075
27	福建连城	1.38	0.000	-0.271	-0.198	0.186	0.003
30	福建武平	1.46	-0.127	-0.396*	-0.227	-0.133	0.094
32	福建崇安	1.45	0.118	-0.289	-0.317	0.011	-0.128
37	福建南平	1.30	0.003	-0.282	-0.370*	0.076	0.029
44	福建永安	1.22	-0.007	-0.343	-0.357*	0.093	0.020
45	福建长汀	1.49	-0.127	-0.224	-0.091	-0.056	0.125
54	江西遂川	1.25	-0.102	-0.208	-0.306	0.189	0.123
64	江西修水	1.19	-0.156	-0.177	-0.266	0.068	0.156
65	江西铜鼓	1.41	-0.230	-0.364*	-0.064	0.035	0.224
72	湖北罗田	1.28	-0.012	-0.415*	-0.470**	-0.036	-0.026
78	湖北谷城	1.33	-0.124	-0.297	-0.265	0.124	0.116
84	湖南会同	1.35	0.085	-0.410*	-0.273	0.065	-0.116
89	湖南新宁	1.10	-0.272	-0.134	-0.113	0.090	0.272
92	湖南江华	1.26	0.182	-0.274	-0.498**	0.143	-0.182
96	湖南安化	1.11	-0.247	-0.202	-0.164	-0.107	0.204
98	湖南祁阳	1.29	-0.070	-0.273	-0.411*	0.028	0.109
99	湖南叙浦	1.23	0.159	-0.191	-0.493**	0.165	-0.139
102	湖南双牌	1.22	-0.115	-0.347*	-0.192	0.028	0.111
103	湖南资兴	1.17	0.169	-0.195	-0.304	-0.077	-0.162
106	广东乐昌	1.15	-0.083	-0.334	-0.075	0.064	0.097
110	广东始兴	1.14	-0.099	-0.275	-0.172	0.050	0.118
114	广东广宁	1.09	-0.165	-0.172	-0.051	-0.292	0.080
115	广东郁南	1.41	-0.005	-0.417*	-0.380*	0.063	0.027
116	广东紫金	1.40	-0.007	-0.314	-0.183	0.097	0.022
118	广西三江	1.57	0.088	-0.236	-0.434*	0.092	-0.073
119	广西金秀	1.37	-0.179	-0.275	-0.308	0.066	0.145
122	广西贺县	1.48	0.161	-0.227	-0.326	0.270	-0.146
129	广西博白	1.41	-0.150	-0.400*	-0.074	-0.066	0.101
133	广西资源	1.27	-0.040	-0.174	-0.206	0.205	0.030
139	广西融水四荣	1.31	-0.054	-0.191	-0.186	0.197	0.096
140	广西融水白云	1.43	0.068	-0.064	-0.380*	0.044	-0.090
150	贵州锦屏	1.27	-0.106	-0.044	-0.277	0.234	0.077
151	贵州剑河	1.33	0.184	-0.204	-0.287	0.191	-0.192
156	贵州习水	1.02	-0.240	-0.334	-0.193	-0.115	0.214
159	贵州麻江	1.35	0.039	-0.268	-0.263	-0.011	-0.033
165	贵州六枝	1.19	0.010	-0.355*	-0.236	-0.025	-0.017
173	云南屏边	1.17	-0.033	-0.408*	-0.180	-0.051	0.022
180	云南西畴	1.20	-0.079	-0.272	-0.236	-0.137	0.003
181	云南麻栗坡	1.33	-0.003	-0.354*	-0.293	0.117	0.020
183	云南楚雄	1.45	-0.100	-0.392*	-0.145	-0.177	0.075
191	四川天全	1.22	0.191	-0.269	-0.499**	0.122	-0.162
193	四川叙永	1.35	-0.163	-0.333	-0.110	-0.064	0.172
195	四川古蔺	1.15	0.068	-0.261	-0.383*	-0.017	-0.081
203	四川汶川	1.48	-0.016	-0.236	-0.252	-0.120	-0.010

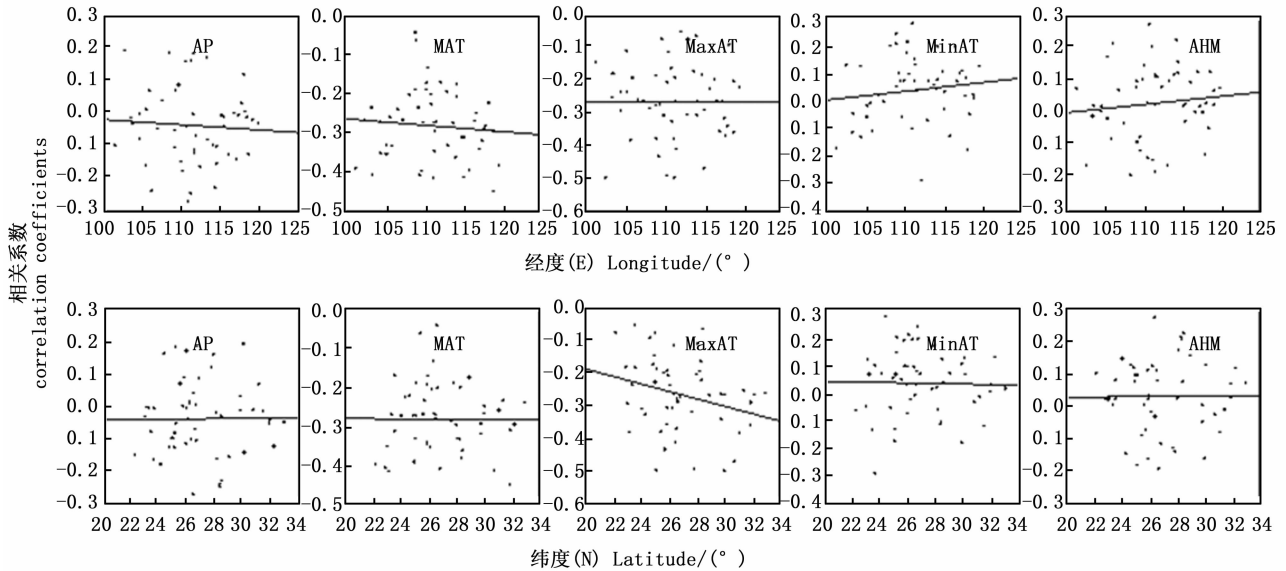


图5 不同种源晚材宽度与气候因子的相关系数随经(纬)度的变化

Fig. 5 Scatter diagram of correlation coefficients between the latewood width and interannual climatic factors along with longitude and latitude of provenances

4 讨论

树轮宽度指标与年最高气温的相关性最强,与年平均气温的相关性次之,但也达到显著程度。年最高气温反映的是极端温度对树轮宽度生长的影响,而当前气候变化对树木生长的研究多侧重年平均气温对树木生长的研究,所以进行年平均气温与树轮宽度——对应的相关分析十分必要。研究表明,降水对干旱、半干旱地区的年轮宽度影响较大,降水量越少,越不利于树轮生长^[32]。Savva 等^[22,25]在研究加拿大短叶松 16 个群体单测试点的树轮整轮宽度单一指标时,发现种源因素导致的树轮宽度生长的变异不明显,而整轮宽度的生长与上年 12 月、当年 3 月和 6 月的降水呈显著正相关关系,因其试点地处温带大陆性气候,干燥少雨,所以降水成为其限制因子;而本文试验地地处亚热带季风气候区,降水丰沛,当降水充足时,降水量就不再是年轮宽度的限制因子^[19],气候对杉木生长的影响主要表现在温度对树轮宽度各指标的影响。此外,在寒冷地区,树木生长随温度的升高而加快^[20],Gindl 等^[23]对挪威云杉树轮的研究发现,整轮宽度与夏季的温度和降水呈显著正相关,这是因为在高纬度等寒冷地区,由于温度较低,树木在生长季光合作用较弱,蒸腾作用和呼吸作用则相对较强,此时温度越高,光合作用越强,养分的消耗越少,升温可以促进树木的生长,而本试验地所处亚热带,冬夏温度普遍较高,此时温度不再是光合作用的限制因子,温度升高反而加剧

蒸腾作用,造成水分丧失,反而不利于杉木生长。年最低气温对各树轮宽度的影响不显著,在不同的气候区,树轮指标对气候因子的响应不一致。本研究弥补了在南亚热带气候区种源响应气候变化树轮学研究的空白。

已有的研究^[24-30]限于种源数较少,且指标较为单一,并未对树轮指标与气候因子的相关性随种源地经纬度的变化进行系统的多指标联合分析,本文所研究的种源数达 52 个,涵盖杉木全分布区,经纬度分布均匀,涉及的树轮指标包括整轮宽度、早材宽度和晚材宽度,发现经度对杉木不同种源各指标与气候因子相关性的影响较纬度更明显,且早材宽度对年平均气温和年最低气温的响应随经度的变化尤其显著,这样可以更深入的研究不同种源杉木一年内不同时间的树轮生长状况。由经纬度的变化引起的种源地温度、降水的差异是导致不同树轮指标与气候因子的相关系数变化的主要因素。

5 结论

通过分析 52 个杉木种源单测试点 3 个树轮宽度指标对年际气候因子的响应^[21],发现整轮宽度、早材宽度和晚材宽度与年平均气温和年最高气温的响应呈强负相关关系。大部分种源整轮宽度、早材宽度和晚材宽度与年平均气温和年最高气温之间的相关性显著,部分种源树轮宽度指标与年平均气温和年最高气温之间的相关性极显著;各种源树轮宽度指标与年降水量和湿润度指数均不显著负相关,

与年最低气温的正相关关系也不显著。近年来,在全球气候变暖的大背景下,本研究中试验地年平均气温有升高的趋势,这将会在一定程度上抑制杉木的径向生长,而选择对于温度的响应不太敏感且生长量相对较高的湖南江华、广西博白和广西资源种源在所研究的试验地进行造林,将是解决这一问题的潜在途径。

参考文献:

- [1] 吴中伦. 杉木[M]. 北京:中国林业出版社,1984:17-22.
- [2] 洪菊生. 全国杉木种源试验专刊[J]. 林业科学研究,1994,7(专刊):117-129.
- [3] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京:气象出版社,1990:56-59.
- [4] Fritts H C. Tree rings and climate[M]. London: Academic Press Inc, 1976.
- [5] Dütthorn E, Holzkämper S, Timonen M, *et al.* Influence of micro-site conditions on tree-ring climate signals and trends in central and northern Sweden[J]. *Trees*, 2013, 27(5): 1395-1404.
- [6] Huang J G, Bergeron Y, Berninger F, *et al.* Impact of future climate on radial growth of four major boreal tree species in the eastern Canadian boreal forest[J]. *Plos one*, 2013, 8(2): 56-58.
- [7] Jansen K, Sohr J, Kohnle U, *et al.* Tree ring isotopic composition, radial increment and height growth reveal provenance-specific reactions of Douglas-fir towards environmental parameters[J]. *Trees*, 2013, 27(1): 37-52.
- [8] Skroppa T, Steffenrem A. Selection in a provenance trial of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) produced a land race with desirable properties[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015: 1-11.
- [9] Fredrick C, Muthuri C, Ngamau K, *et al.* Provenance variation in seed morphological characteristics, germination and early seedling growth of *Faidherbia albida*[J]. *Journal of Horticulture and Forestry*, 2015, 7(5): 127-140.
- [10] Wernicke J, Hochreuther P, Bräuning A, *et al.* Evaluating tree-ring climate relationships from various climate data sources as predictors: A case study from the South-Eastern Tibetan Plateau[J]. *Trees*, 2013,29(3): 1493-1502.
- [11] Mora F, Saavedra J. Combining genetic gain and diversity under an individual selection method in a selected provenance of *Eucalyptus cladocalyx*[J]. *Cienc e Investig Agraria*, 2012, 39: 177-184.
- [12] Linán I D, Gutiérrez E, Heinrich I, *et al.* Age effects and climate response in trees: a multi-proxy tree-ring test in old-growth life stages[J]. *European Journal of Forest Research*, 2012, 131(4): 933-944.
- [13] 朱安明, 段爱国, 张雄清, 等. 不同地理种源树轮对气候的响应研究进展[J]. 林业科技通讯, 2015(9): 3-7.
- [14] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. *Tree-ring bulletin*, 1983, 43(1): 69-78.
- [15] Fang K, Gou X, Peters K, *et al.* Removing biological trends from tree-ring series: testing modified Hegershoff curves[J]. *Tree-Ring Research*, 2010, 66(1): 51-59.
- [16] Cook E R, Holmes R L. Users manual for program ARSTAN[J]. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, USA, 1986(9):15-23.
- [17] 郭明明, 张远东, 王晓春, 等. 川西米亚罗林区主要树木生长对气候响应的差异[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2237-2243.
- [18] Wang T, O'Neill G A, Aitken S N. Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate[J]. *Ecological applications*, 2010, 20(1): 153-163.
- [19] 李军龙, 徐雯. 树轮宽度对气候变化响应的研究进展[J]. 西南林学院学报, 2011, 31(3): 86-91.
- [20] Xuemei S, Lei H, Hongbin L, *et al.* Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005(6):36-42.
- [21] Zhang X, Lei Y, Pang Y, *et al.* Tree mortality in response to climate change induced drought across Beijing, China[J]. *Climatic change*, *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2014, 124(1-2): 179-190.
- [22] Savva Y, Denneler B, Koubaa A, *et al.* Seed transfer and climate change effects on radial growth of jack pine populations in a common garden in Petawawa, Ontario, Canada[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2): 636-647.
- [23] Gindl W, Grabner M, Wimmer R. The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width[J]. *Trees*, 2000, 14(7): 409-414.
- [24] Oleksyn J, Tjoelker M G, Reich P B. Adaptation to changing environment in Scots pine populations across a latitudinal gradient[J]. *Silva Fennica*, 1998, 32: 129-140.
- [25] Savva Y, Bergeron Y, Denneler B, *et al.* Effect of interannual climate variations on radial growth of jack pine provenances in Petawawa, Ontario[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(3): 619-630.
- [26] Savva Y, Schweingruber F, Milyutin L, *et al.* Genetic and environmental signals in tree rings from different provenances of *Pinus sylvestris* L. planted in the southern taiga, central Siberia[J]. *Trees*, 2002, 16(4-5): 313-324.
- [27] Savva Y, Koubaa A, Tremblay F, *et al.* Effects of radial growth, tree age, climate, and seed origin on wood density of diverse jack pine populations[J]. *Trees*, 2010, 24(1): 53-65.
- [28] Briffa K R, Schweingruber F H, Jones P D, *et al.* Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes[J]. *Nature*, 1998, 391: 678-682.
- [29] Briffa K R, Bartholin T S, Eckstein D, *et al.* A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia[J]. *Nature*, 1990, 346: 434-439.
- [30] Li C, Barclay H J, Hawkes B C, *et al.* Lodgepole pine forest age class dynamics and susceptibility to mountain pine beetle attack[J]. *Ecological Complexity*, 2005, 2(3): 232-239.
- [31] 侯爱敏, 彭少麟, 周国逸. 树木年轮对气候变化的响应研究及其应用[J]. 生态科学, 1999, 18(3):27-35.

(责任编辑:詹春梅)