

DOI: 10.5846/stxb201409231886

李露露, 李丽光, 陈振举, 周永斌, 张先亮, 白学平, 常永兴, 肖建强. 辽宁省人工林樟子松径向生长对水热梯度变化的响应. 生态学报, 2015, 35 (13): 4508-4517.

Li L L, Li L G, Chen Z J, Zhou Y B, Zhang X L, Bai X P, Chang Y X, Xiao J Q. Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to gradient change of hydrothermal in plantations in Liaoning Province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (13): 4508-4517.

辽宁省人工林樟子松径向生长对水热梯度变化的响应

李露露^{1,2}, 李丽光³, 陈振举^{1,2,4,*}, 周永斌^{1,2,4}, 张先亮^{1,2}, 白学平^{1,2}, 常永兴^{1,2}, 肖建强^{1,4}

1 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866

2 中国森林生态系统监测网络辽宁辽河平原森林生态系统定位研究站, 昌图 112500

3 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016

4 中国科学院清原森林生态实验站, 沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016

摘要: 基于树轮年代学的理论和方法, 建立辽宁地区人工林樟子松年轮宽度年表网络, 研究人工林樟子松树木年轮生长变化, 探讨樟子松生长与气候变化的关系以及其对水热梯度变化的响应规律。结果表明, 研究区各采样点人工林樟子松的径向生长变化呈现较为一致的显著下降趋势 ($P < 0.05$), 并且下降趋势由西北至东南降低。空间上水平上, 研究区樟子松的径向生长与研究区降水和相对湿度的空间梯度变化吻合 ($P < 0.05$), 均呈西北至东南增加的特点; 各采样点樟子松年轮宽度变化的平均敏感度与降水量、相对湿度显著负相关关系 ($P < 0.05$), 但与温度的正相关关系不显著。各样点樟子松径向生长与月降雨量和月平均相对湿度多呈正相关关系, 与月平均温度多呈负相关关系, 进一步表明区域水分因子对人工林樟子松生长的限制作用明显。

关键词: 人工林; 樟子松; 年轮宽度年表; 径向生长; 水热梯度

Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to gradient change of hydrothermal in plantations in Liaoning Province

LI Lulu^{1,2}, LI Liguang³, CHEN Zhenju^{1,2,4,*}, ZHOU Yongbin^{1,2,4}, ZHANG Xianliang^{1,2}, BAI Xueping^{1,2}, CHANG Yongxing^{1,2}, XIAO Jianqiang^{1,4}

1 College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2 Research Station of Liaohe-River Plain Forest Ecosystem, Chinese Forest Ecosystem Research Network, Changtu 112500, China

3 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China

4 Qingyuan Experimental Forest/State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: A network of *P. sylvestris* var. *mongolica* tree-ring chronologies for plantations in Liaoning province were developed based on the dendrochronological theory and methodology to study the variation of tree growth of artificial forest, and to investigate the mechanisms of the relationships between tree ring growth and climate variations, and the response variations of tree-ring growth and climate factors along regional hydrothermal gradient. The results showed that a consistently and significantly declining trend was found in the radial growth of *P. sylvestris* var. *mongolica* from all sample sites in the study region ($P < 0.05$), generally showed a regional decrease profile from northwest to southeast of the study area. Coincided with the regional gradient variations of moisture condition like precipitation and relative humidity ($P < 0.05$), the spatial

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271066, 31100327, 41071035); 沈阳农业大学“天柱山学者”计划项目

收稿日期: 2014-09-23; **修订日期:** 2015-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenju chen@hotmail.com

variation of *P. sylvestris* var. *mongolica* radial growth showed a stepwise increase from northwest to southeast in study area; the variation of mean sensitivity of these *P. sylvestris* var. *mongolica* chronologies in study area negatively correlated with variation of regional annual mean precipitation and annual mean relative humidity ($P < 0.05$), but the positive correlation with regional annual mean temperature was insignificant. The pine's radial growth in each sampling site was positively correlated with local monthly mean precipitation and monthly mean relative humidity, while negatively with monthly mean temperature, which indicated that moisture condition is an obvious limiting factor for *P. sylvestris* var. *mongolica* growth.

Key Words: plantations; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; tree-ring width chronology; radial growth; gradient change of hydrothermal

近百年来,由于人类活动的增加,我国的森林资源和森林生态系统损失、破坏严重^[1]。1960 年以来,为了恢复和重建森林,增加森林覆盖率,各个地区的人工林迅速发展起来。第八次全国森林资源清查时,我国人工林面积已经达到森林总覆盖面积的 33%^[2],并在提供林木产品、减缓全球变化等^[3-4]方面发挥着重要的作用。由于人工林中树种组成和结构简单,并且多数人工林是引种造林,其在生态系统稳定性和对当地环境因子的适应性方面都存在着一定的问题^[5]。然而,作为影响人工林树木生长最重要的环境因子,近 50 年来温度和降水的变化显著。尤其是在我国北方,温度不断升高以及降水趋于减少^[6-7],区域气候呈明显暖干化趋势^[8]。这种水热条件的变化必然会影响到人工林树木的径向生长。因此研究人工林生态系统对水热梯度变化的响应,对于人工林造林及营林具有重要意义。

我国人工林生态系统,如“三北”防护林体系,在我国北方的起着最重要的防风固沙和农田保护等作用^[9-10]。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)因其较强的耐寒、耐旱、耐贫瘠土壤和较速生等优良特性被选作“三北”防护林等人工林体系的主要树种。然而,经过半个世纪的培育、经营发现:早期营建的沙地人工林樟子松可以很好的适应环境,生长良好;经过几十年的生长以后,人工林樟子松出现了生命周期缩短、生产力水平降低等现象^[11-12]。提高人工林樟子松生产力、保持并加强其生态功能,使其得以可持续利用成为当前急需解决的重要问题之一^[13]。

研究发现,樟子松树木年轮可以作为良好的自然资料来反映树木生长与环境的关系^[14-17]。已有的研究表明,不同地区樟子松对水热变化的敏感性不同,限制樟子松生长的环境因子也不相同,如生长季温度是限制大兴安岭山地樟子松生长的主要因子^[18-19];而呼伦贝尔草原和大兴安岭森林交错带,生长季降水量则是樟子松径向生长的主要限制因子^[15-16,20]。无论是温度还是水分限制起主导作用,樟子松的生长均表现出不同程度的下降趋势,并且指示出一系列生态系统功能的变化。因此,选择我国主要樟子松人工林建植地区为研究区,通过研究区域人工林樟子松树木年轮生长变化,探讨樟子松生长与气候变化的关系以及水热梯度变化对它的影响。研究结果可用于了解当前樟子松的衰退机制,提高类似樟子松人工林生态系统的其它森林生态系统的稳定性和生产力,预测气候变化背景下人工林生态系统未来可能发生的变化,为人工林的经营管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区主要在我国辽宁省,其地处欧亚大陆东岸,我国东北地区南部,属于温带大陆性季风气候区,域内分属温带-暖温带、湿润-半湿润气候,具有典型的冷暖、干湿地理梯度(图 1):年平均降水量 438—1089mm,分布趋势自东南向西北递减;年均气温 5.2—10.8℃,自西南向东北或自沿海向内陆递减。总的气候特点为:四季分明,寒冷期长;雨量集中,东湿西干。辽宁省地势从东南部和西北部向中央倾斜;山地丘陵多分列于东西两侧;中部为东北向西南缓倾的平原。因此,省内各地气候不尽相同(图 1)。植物区系处于华北、长白、内蒙古等 3 个植物区系的交汇地带,植物种类繁多,生态系统结构复杂。

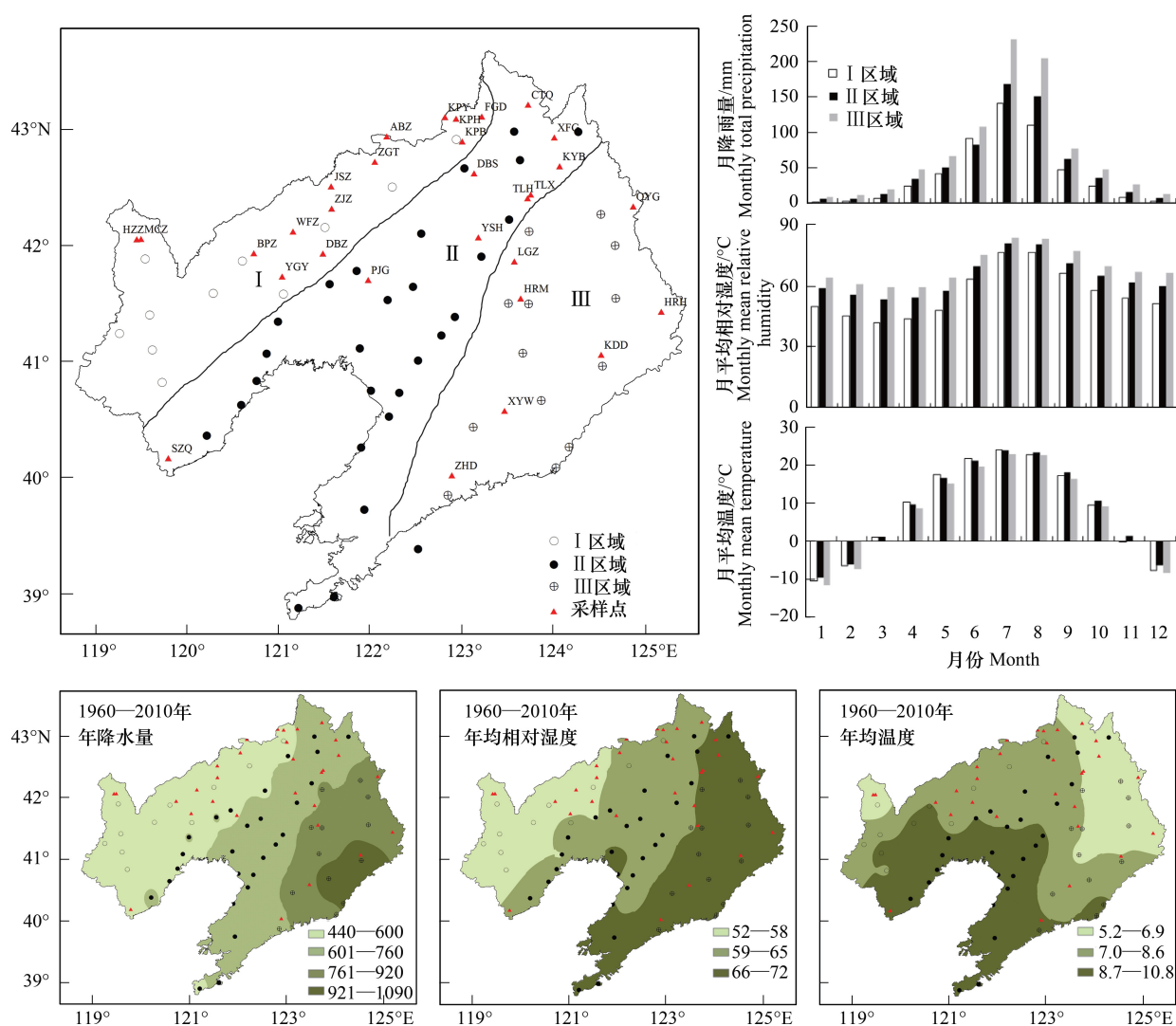


图1 研究区位置、气象站、采样点分区和对应各分区的主要气象数据。

Fig. 1 Study area, meteorological station and sampling site location, regional meteorological variables

▲为树木年轮采样点,○ I 区域气象站,●为 II 区域气象站,⊕ III 区域气象站

辽宁省是我国较早的引入樟子松进行人工林生态系统建设的省份^[21]。樟子松人工林经过近半个世纪的培育发展形成典型人工林体系,所以选择辽宁省的人工林樟子松为案例进行人工林生态系统对水热梯度变化响应的研究。

1.2 采样与年表的建立

根据国际年轮数据库(International Tree-ring Data Bank, ITRDB)标准,在辽宁省范围内选取具有典型区域特征的 30 个地区进行样本采集(图 1,表 1)。选择受干扰较小、生长良好、年龄较大的樟子松,在胸径处(因一些地区树木年龄较小,为获得较长年限的树芯,距地面约 0.5 m 左右)用生长锥钻取树芯样本,每棵树取 1—2 个样芯。共采集 697 棵树,1365 个样芯。将采集到的树芯带回实验室干燥、固定、打磨,对打磨好的样本进行交叉定年^[22-23],然后用测量精度为 0.001 mm 的 LINTAB5 年轮宽度测量仪测量样本每一轮的宽度,最后用 COFECHA 软件^[24]对测量结果进行最后的交叉定年检验,以保证树芯样本的测量和定年准确无误。

利用 ARSTAN 程序^[25]对交叉定年过的年轮序列进行去趋势和标准化处理。为了尽可能多的体现年表的区域特征,采用区域曲线标准化(Regional Curve Standardization, RCS)方法去趋势,建立 RC 生长曲线^[26-27]。

表 1 辽宁地区樟子松采样点及样本信息

Table 1 Sampling sites and sample information of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Liaoning province

采样点 Sampling sites	样芯量 Number of cores(<i>n</i>)	序列平均 相关性 Corr with master	样本总体 代表性 Expressed population signal (EPS)	时段 Time span (years *)	海拔 Elevation/m
建平黑水林场 Heishui plantation, Jianping (HZZ)	65	0.784	0.929	1972—2013(42)	517
朝阳马场林场 Machang plantation, Chaoyang (MCZ)	62	0.753	0.994	1991—2013(22)	684
北票大青山林场 Daqingshan plantation, Beipiao (BPZ)	26	0.702	0.989	1974—2013(39)	213
阜新周家点林场 Zhoujiadian plantation, Fuxin (ZJZ)	58	0.809	0.984	1971—2013(42)	206
阜新大阪林 Daban plantation, Fuxin (DBZ)	52	0.821	0.981	1982—2013(32)	383
阜新王府林场 Wangfu plantation, Fuxin (WFZ)	61	0.840	0.984	1986—2013(28)	318
阜新建设林场 Jianshe plantation, Fuxin (JSZ)	70	0.831	0.992	1975—2013(38)	286
章古台 Zhanggutai (ZGT)	29	0.668	0.975	1980—2011(30)	226
彰武阿尔乡 Aerxiang, Zhangwu (ABZ)	39	0.598	0.951	1985—2013(27)	254
康平海洲乡 Haizhou, Kangping (KPH)	49	0.724	0.928	1983—2013(30)	148
康平育林 Yulin, Kangping (KPY)	48	0.803	0.942	1984—2013(30)	150
康平八家子林场 Bajiazi plantation, Kangping (KPB)	48	0.686	0.918	1982—2013(31)	110
调兵山 Diaobinghan (DBS)	48	0.672	0.938	1988—2013(26)	160
昌图桥口村 Qiaokoucun, Changtu (CTQ)	39	0.572	0.831	1987—2013(25)	128
昌图傅家林场 Fujia plantation, Changtu (FGD)	49	0.687	0.958	1973—2013(39)	153
西丰邵家店林场 Gaojiadian plantation, Xifeng (XFG)	41	0.775	0.966	1991—2013(23)	234
铁岭熊官屯林场 Xiongguan屯 plantation, Tieling (TLX)	50	0.659	0.936	1984—2013(29)	131
铁岭红峰林场 Hongfeng plantation, Tieling (TLH)	49	0.764	0.926	1985—2013(28)	145
开原八棵树林场 Bakeshu plantation, Kaiyuan (KYB)	39	0.623	0.819	1980—2013(32)	177
沈阳 Shenyang (YSH)	20	0.326	0.296	1990—2013(24)	65
抚顺拉古林场 Lagu plantation, Fushun (LGZ)	40	0.672	0.862	1993—2013(21)	122
清原甘井子林场 Ganjingzi plantation, Qingyuan (QYG)	36	0.677	0.922	1973—2013(40)	477
桓仁木孟子 Muyuzi, Huanren (HRM)	31	0.479	0.774	1963—2013(50)	487
桓仁沙尖子 Houjiabao, Huanren (HRH)	48	0.668	0.969	1978—2013(35)	288
盘锦高升镇 Gaoshengzhen, Panjin (PJG)	29	0.563	0.734	1980—2013(33)	151
岫岩大营子镇 Dayingzizhen, Xiuyan (XYW)	43	0.602	0.921	1990—2013(23)	195
庄河大营镇 Dayingzhen, Zhuanghe (ZHD)	46	0.616	0.915	1976—2013(37)	154
义县高台镇 Gaotaizhen, Yixian (YGY)	43	0.755	0.980	1985—2013(28)	208
绥中前卫林场 Qianwei plantation, Suizhong (SZQ)	48	0.615	0.859	1984—2013(30)	151
宽甸大川头镇 Dachuantouzhen, Kuandian (KDD)	45	0.554	0.935	1987—2013(26)	415
I 区(ZJD HSS BPZ JSZ ZGT DBZ KPB KPH KPY ABZ YGY WFZ MCZ)	650	0.487	0.989	1971—2013(42)	—
II 区(CTQ FJA KYB XFG TLH TLX YSH PJG SZQ DBS)	412	0.489	0.959	1973—2013(39)	—
III 区(HRM QYG HRH XYW KDD LGZ ZHD)	289	0.411	0.914	1963—2013(50)	—

* 为有效年份

1.3 气象资料

气象资料来源于辽宁省内的 52 个气象站点(图 1),资料时间长度为 1960—2010 年。选取温度、降水量和相对湿度作为本研究的主要气候因子。根据研究区各气象站点近 50 年的气温、降雨量和相对湿度进行区域层次聚类分析,将气候属性相近的站点划分为同类地区,总体上分为 3 个主要的气候区域(图 1)。对个别特殊站点根据站点所处的特殊地理位置和气候特点进行气候分区调整。同时,将 30 个采样点根据所在气候类型分区(表 1)。

1.4 数据处理及图表制作

使用 Dendroclim2002 软件分析年表与气候因子之间的相关关系,使用 Excle2007、SPSS20.0 软件进行数据分析和相关图表的制作,利用 Arcgie9.3 软件进行空间插值分析和相关图表制作。

2 结果与分析

2.1 区域气候与梯度变化

研究区的年降水量由东南向西北递减(图 1),其中西北地区的建平县最低(438mm),东南地区的草河口最高(1089mm);秋季月平均降水量由东南向西北下降明显。年均相对湿度也由东南向西北递减,其中西北地区的朝阳最低(51%),东南地区的东港最高(72%)。年均温度由西(南)向东(北)降低,其中东北地区的新宾县(5.2℃)最低,最南部的大连(10.8℃)最高(图 1)。

近 50(1960—2010 年)年来,区域 I、区域 II、区域 III 年降水量均呈下降趋势(I: $-5.05\text{mm}/10\text{a}$, II: $-9.92\text{mm}/10\text{a}$, III: $-17.2\text{mm}/10\text{a}$)。3 个区域年均温度均呈显著上升趋势($P < 0.05$)(I: $0.26^\circ\text{C}/10\text{a}$, II: $0.29^\circ\text{C}/10\text{a}$, III: $0.27^\circ\text{C}/10\text{a}$)。

2.2 树木径向生长特点

研究区人工林樟子松的生长存在较强的区域一致性,同时又具有局地差异性,如,各年表第一主成分的释量达到了 56.98%,第一、二主成分累积释量达到 84.7%;区域 I 和 II 的 STD 年表显著相关($r = 0.395$, $P < 0.05$),区域 II 和 III 的 STD 年表之间极显著相关($r = 0.476$, $P < 0.01$),但由于区域 I 和 III 的在空间上距离较远,气候差异较大,因此两个 STD 年表间没有达到显著的相关关系($r = 0.121$)。另外, I、II、III 各区域的各 STD 年表的第一主成分的释量分别为 40.54%、53.24%、41.50%,说明各年表包含一定的气候信息。所有年表的样本总体代表性(EPS)的平均值为 0.908,因此可以认为样本能够代表该研究区樟子松树木的总体生长情况,适用于和气候因子相关性分析。

研究区各样点人工林樟子松胸高断面面积增量(BAI)的变化可以看出 BAI 指示的樟子松生长量与水分(降水和相对湿度)梯度的变化较为一致($P < 0.05$)(图 2),如区域 I < 区域 II < 区域 III(图 3)。但樟子松 BAI 与年

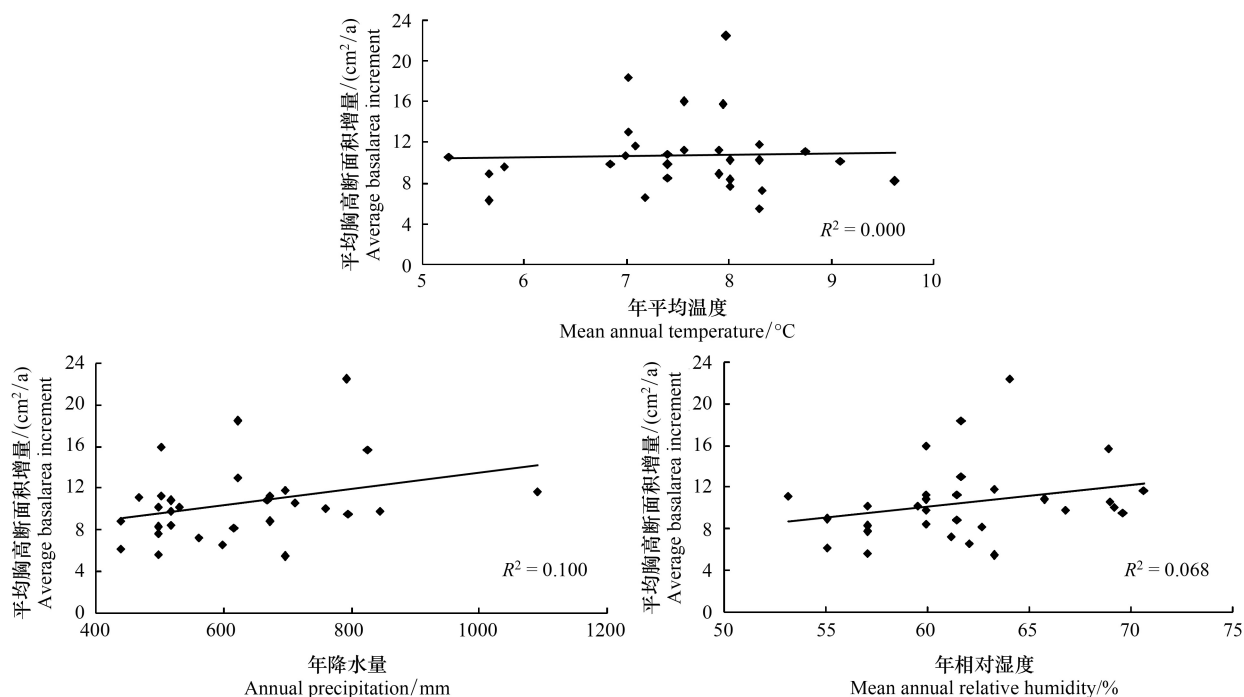


图 2 人工林樟子松各样点平均 BAI 和年均温度、年降水量、年均相对湿度空间变化的关系(按照气象站点应与采样点距离最近的原则选择气象站点)

Fig. 2 Spatial variation of linear relationship between average radial increment of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in plantation and mean annual temperature, annual precipitation, and mean annual relative humidity (the nearest meteorological station to every sampling site was selected to this study)

平均温度的空间梯度变化(图 2)未表现出类似的结果。各区域樟子松 BAI 年际变化总体较为一致,呈增加趋势(图 4),其中区域Ⅲ($0.473 \text{ cm}^2/\text{a}$, $P<0.05$)要比区域Ⅰ($0.249 \text{ cm}^2/\text{a}$)和区域Ⅱ($0.265 \text{ cm}^2/\text{a}$, $P<0.05$)增加明显。另外,除区域Ⅲ外,区域Ⅰ和区域Ⅱ的樟子松 BAI 在 2003 年均出现明显的低值点(Ⅰ: 6.11 cm^2 , Ⅱ: 15.51 cm^2)。

近 20 年(1993—2013 年)研究区樟子松生长趋势下降幅度总体呈由西北至东南降低的趋势(图 5),其中最南部的岫岩、宽甸等地下降趋势较缓,西北地区的建平、章古台等地下降趋势明显。同样,樟子松径向生长的平均敏感度的变化趋势也呈现由西(北)向东(南)降低的特点(图 5),其中西部的阜新、建平等地较高,南部宽甸、清原等地较低。

研究区各采样点年轮宽度年表的平均敏感度(Mean Sensitivity, M.S.)在空间上(图 6)随温度、降水量和相对湿度变化而变化,其中年表平均敏感度与降水量、相对湿度的关系为显著负相关($P<0.05$),与温度的关系呈正相关但不显著。并且年表平均敏感度和各气象因子之间的变化更趋向于指数分布,如指数分布时年表平均敏感度与降水量之间的方差解释量 $R^2 = 0.537$ (图略)。

2.3 树木(径向)生长与气候因子的关系

各样点年轮数据与其最近的气象站点的线性相关呈现与上述气候分区一致的区域性变化。不同气候分区的樟子松树木年轮与气象资料的相关性不完全相同,但多数与月平均降雨量和月平均相对湿度呈正相关关系,与月平均温度呈负相关关系,与降水量和相对湿度的正相关和与温度的负相关主要在夏季显著(图 7)。

区域Ⅰ年轮宽度变化与当年 6、7 月份温度呈显著负相关($P<0.05$);区域Ⅱ年轮宽度变化与当年 2、5、8 月份温度显著负相关($P<0.05$);区域Ⅲ年轮宽度变化与温度的相关性较弱,仅与当年 6 月份温度显著负相关($P<0.05$)。区域Ⅰ、区域Ⅱ年轮宽度变化与上年 11 月的温度呈显著正相关($P<0.05$)(图 7a)。

区域Ⅰ年轮宽度变化与当年 2、4、5、7 月份的降水量呈显著正相关关系($P<0.05$);区域Ⅱ年轮宽度变化与前一年 12 月份降水显著正相关($P<0.05$),与当年 1 月份降水显著负相关($P<0.05$);区域Ⅲ年轮宽度变化与前一年 10 月份、当年 2、4 月份的降水量显著正相关($P<0.05$)(图 7b)。

区域Ⅰ年轮宽度变化当年 4、5、6、7 月份的月平均相对湿度显著正相关($P<0.05$);区域Ⅱ年轮宽度变化与当年 4、6、7 月份的月平均湿度显著正相关($P<0.05$);区域Ⅲ年轮宽度变化与当年 6($P<0.05$)月份的月平均相对湿度显著正相关($P<0.05$),与前一年 12 月的相对湿度显著负相关($P<0.05$)(图 7c)。

3 讨论

3.1 水分梯度对樟子松人工林生态系统的影响

近半个世纪以来,樟子松作为耐旱树种资源,被大规模用作我国干旱、半干旱区人工林生态系统建

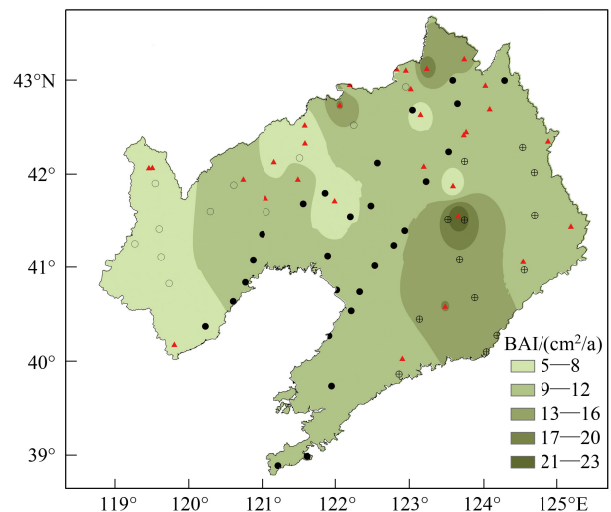


图 3 人工林樟子松平均 BAI 的空间变化

Fig.3 Spatial variation of average radial increment of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* for plantations

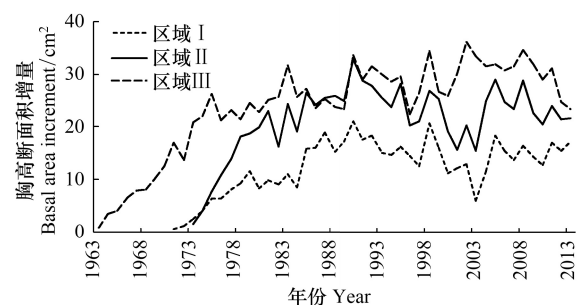


图 4 各区域人工林樟子松胸高断面面积增量(BAI)的年际变化

Fig.4 The variation of basal area increment of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in its regional plantations

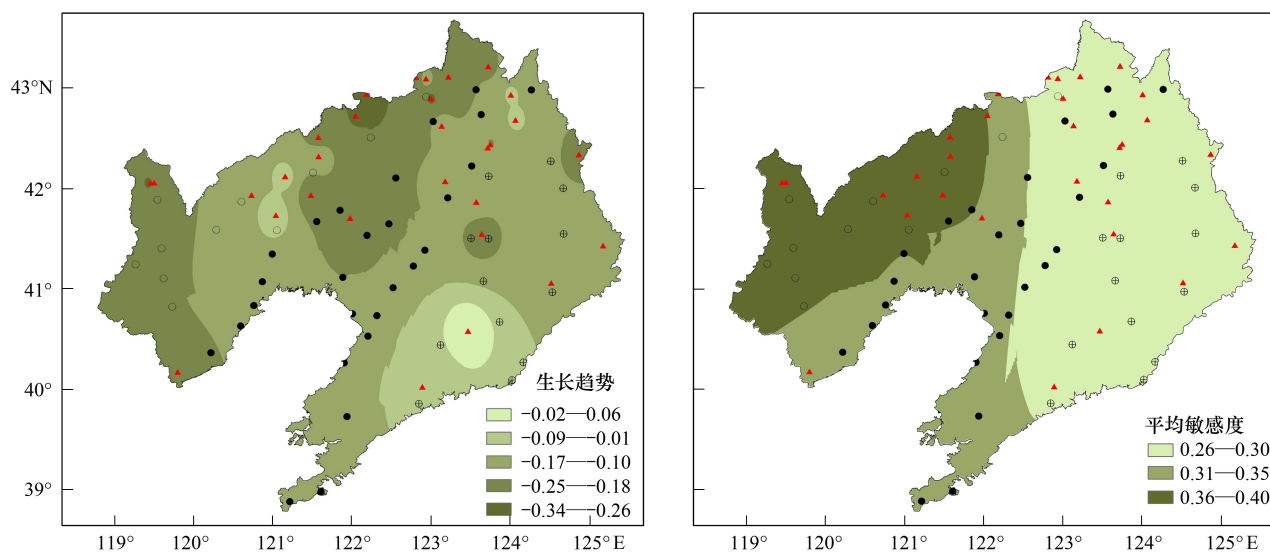


图5 人工林樟子松生长趋势和平均敏感度空间变化

Fig.5 Spatial variations of growth trend and Mean sensitivity of the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in plantations

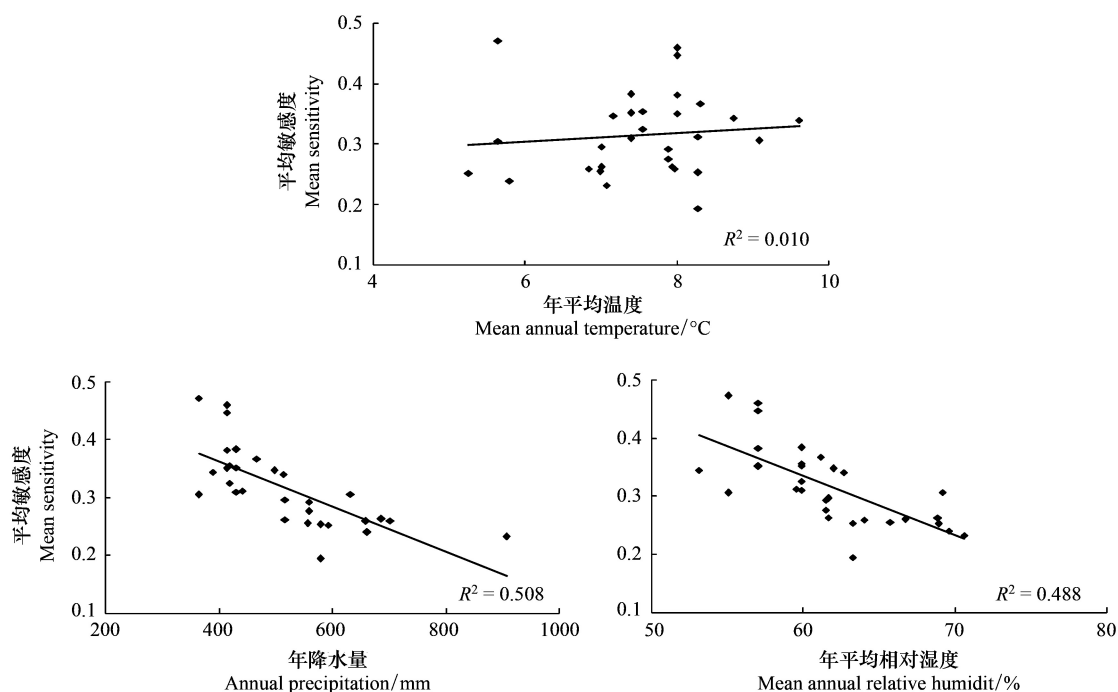


图6 各采样点人工林樟子松年表平均敏感度和气候因子的关系

Fig.6 The relationship between the chronology Mean sensitivity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* for each single sampling site in plantations and its nearest meteorological records

植^[28-29]。由温度相对冷凉、降水相对稀少的内蒙古沙地和北部大兴安岭森林-草原过渡区异地引种至温度相对温和、降水相对丰沛的地区是最初成功引种的必要条件和关键依据之一^[30],如樟子松分布核心区之一的红花尔基 1971—2000 年的年均温和降水量分别为 -0.4°C 和 404mm,最早引入地的辽宁章古台地区的年均温和降水量分别为 7.5°C 和 424mm。

本研究结果显示樟子松径向生长指示的生长量/森林生产力在地理空间水平上随着降水的增加而显著增加($P<0.05$),呈明显的梯度变化(图 3),表明樟子松人工林生产力大小受水分控制。降水梯度与树木生长量

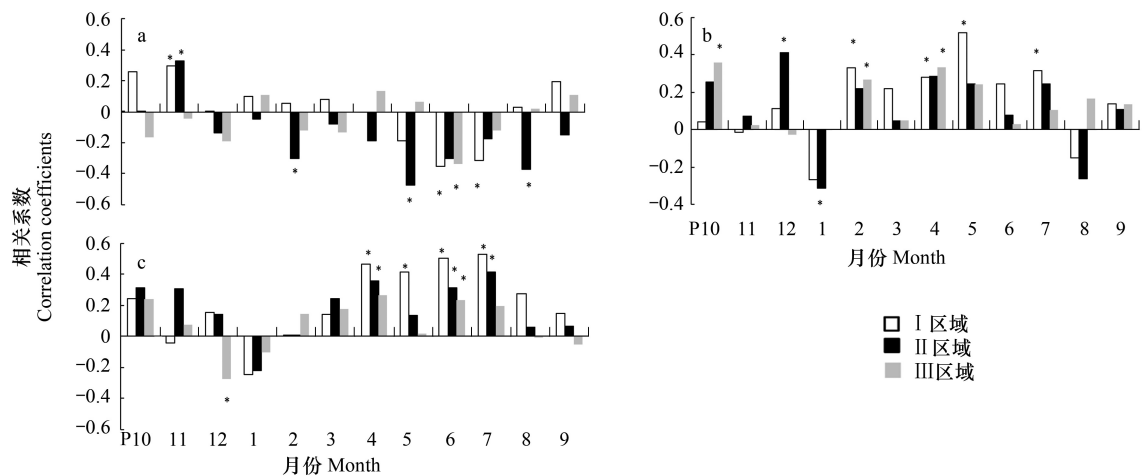


图7 各区域人工林樟子松年表(STD)与月平均温度(a)、月平均降水量(b)和月平均相对湿度(c)的 Bootstrap 相关

Fig.7 Bootstrap correlation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* chronology (STD) and monthly mean temperature (a), monthly mean precipitation (b), monthly mean relative humidity (c) in each sub-regional plantations

“*”代表气候因子对年轮指数影响显著($P < 0.05$), p 代表“前一年”

(生产力)梯度的吻合支持关于樟子松引种与水分有关的判断^[31]。但研究区人工林樟子松生长成熟化的趋势要明显早于原产地,例如区域 I 和区域 II 均在 36a 时生长趋势稳定(基于一元二次回归方程对生长曲线拟合,拟合曲线一阶导数等于 0 的点为生长趋势稳定的起始年份),而原产地红花尔基樟子松在 100a 左右生长趋势稳定^[28],这也与以往发现的章古台地区樟子松人工林在 35—40a 左右出现生长稳定的现象^[28,32]一致。这可能是由于引种区的特定水热条件(温暖、干旱)引起樟子松自身生长规律发生变化:高峰生长期提前、峰值高、峰期短、旺盛生长期缩短^[28]。要达到和原产地一样的生长模式,区域平均的年降水应在 729mm 左右(假定研究区相对湿度和温度不变的情况下,利用伊万洛夫湿润度指数(K)^[33]计算得到: $P_{\text{降雨量}} = K_{\text{原产地}} \times E_{\text{研究区年蒸发量}}$)。

原产地天然林樟子松的生长近半个世纪以来一直处于暖干化气候下的胁迫之中,并导致出现生长衰退的迹象^[15,18]。再加之研究区的蒸发量和降水量的比值要远大于原产地,该区人工林樟子松从引入起一直处于较原产地更严重的水分胁迫过程之中。长期、持续的干旱对树木的生理生态过程具有重要的作用^[34],可以影响/改变树木的生活史进程。因此可以从降水在时间和空间上丰亏变化的角度解释樟子松衰退的水分驱动机制,并为耐旱品系的定向培育提供理论基础。降水量增加提高了樟子松林生产力的同时也降低了对环境变化的敏感性,即增强了其对环境胁迫的抵抗力(忍耐力),使其对环境因子的变化不敏感,表现为统计学上的相关系数降低。因此,不同地区树木受到水分胁迫的程度不一致的同时,也暗示其对干旱加剧的响应程度和方式会有差异。同时表明研究区内发生缺水干旱的频率、时间和强度关乎上述响应程度和方式的差异^[35]。

水分对樟子松个体树木生长和人工林生态系统生产量的作用在生长季表现得最为显著(图 7b),在红花尔基^[15]沙地樟子松和大兴安岭山地樟子松^[18]天然林中樟子松的生长与降水的关系也表现出同样的特征。但是本研究中樟子松生长对水分的敏感性自西(北)向东(南)沿水份梯度显著降低($P < 0.05$)也存在物候差异(图 7b,c),如辽东半岛 4 月中下旬树木即开始展叶生长,而辽西地区 5 月下旬树木才开始展叶生长^[36]。

3.2 温度对樟子松人工林生态系统的影响

温度作为影响树种分布的关键因子,在本研究中并没有发现温度梯度变化与树木生长参数存在显著关系,但这并不能掩盖其在生态系统水热循环中的驱动作用,如沙地樟子松大于 10℃ 有效积温最低需 2000℃ 左右^[21]。首先,温度增加可导致潜在蒸发量增大,蒸散量加大,加剧水分胁迫,如本研究近 10 年由于升温导致的潜在蒸发量增加 6%。尤其是生长季前期由于升温导致的水分亏缺致使树木较原产地过早的发生生理干旱。其次,升温加大了生长季的高温胁迫,导致树木水分胁迫加剧^[37],树木的蒸腾和土壤蒸发作用加强^[38],

树木的净光合速率的降低,抑制树木的生长。另外,随着樟子松林龄的增加,树高逐渐接近其最大值,温度的升高导致水分在体内的运输距离和高度增加,这种与温度有关的水分胁迫又能够导致气孔过早关闭,影响树木叶片的光合能力和树体与外界的气体交换,进而限制树木生长。

樟子松是耐寒耐旱的树种,对高温的忍耐力偏低^[39]。生长季是樟子松树轮径向生长最主要的时期,此时温度的升高不利于树木径向生长^[37,40](图 7a),如果此时增加降雨可补充因高温增加引起的水分流失,满足植物所需的水热条件。另外,樟子松早材细胞的生长主要在生长季初期(春末夏初),此时气温直接影响光合作用,并间接调节呼吸和蒸腾作用,温度偏低会抑制树木的径向生长(图 7a)。同样,樟子松在气温过高、降水偏少的夏末初秋同样会发生生理干旱,树木光合作用效率降低,形成层活动就会受到抑制,从而不利于树木生长^[41]。

3.3 气候变化背景下樟子松人工林生产力评估

研究区樟子松生长量下降,可能的原因有环境、树木本身遗传因子及其综合作用。其中,也可能一定程度上与土壤营养元素的下降相关^[42];研究区自东向西逐渐沙化,土壤的营养元素供应量减少,导致林分生产力的降低^[43]。但关于气候变化引起樟子松人工林的生产力衰退并表现出上述空间上和时间上的动态变化仍是一个值得研究的问题。

近 50 年来,研究区气候特征和树木生长都呈现出明显的趋势变化,并且不同的气候条件会影响樟子松生产力对气候因子的响应。如,1983 年以来温度每升高 1℃,区域 I 的康平地区樟子松径向生长量降低 1.2mm,而区域 III 的桓仁地区的则降低 0.6mm,并且樟子松径向生长在未来一段时期内还会随着温度升高而呈下降趋势。另外,根据伊万诺夫湿润度^[33]的结果,暖干化气候下未来研究区的植物地理景观特征将发生连锁式的显著梯度变化,如研究区西部地区有从半干旱/半湿润的森林草原交错区向更干旱的草原或荒漠发展变化的趋势,这将势必影响到人工森林的经营和发展。有前瞻性的、科学系统的应对策略研究将是诸如樟子松一类的人工林生态系统经营和培育的重点。

参考文献 (References):

- [1] 樊宝敏, 李智勇. 过去 4000 年中国降水与森林变化的数量关系. 生态学报, 2010, 30(20): 5666-5676.
- [2] 徐济德. 我国第八次森林资源清查结果及分析. 林业经济, 2014, (3): 6-8.
- [3] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [4] Silver W L, Ostertag R, Lugo A E. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. Research Ecology, 2000, 8(4): 394-407.
- [5] 沈国舫. 森林培育学. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [6] Qian W H, Lin X. Regional trends in recent temperature indices in China. Climate Research, 2004, 27(2): 119-134.
- [7] Qian W H, Lin X. Regional trends in recent precipitation indices in China. Meteorology and Atmospheric Physics, 2005, 90(3/4): 193-207.
- [8] 翟盘茂, 潘晓华. 近五十年中国极端温度和降水事件变化规律的研究. 地理学报, 2003, 58(S): 1-10.
- [9] Bao G. Mongolian pines (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in the Hulun Buir steppe, China, respond to climate in adjustment to the local water supply. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(1): 1-10.
- [10] Wang X M, Zhang C X, Hasi E, Dong Z B. Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China? Journal of Arid Environments, 2010, 74(1): 13-22.
- [11] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 朱教君. 樟子松人工固沙林稳定性的研究. 应用生态学报, 1996, 7(4): 337-343.
- [12] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹, 薛杨, 邱素芬. 樟子松人工固沙林衰退的主要特征. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2221-2224.
- [13] 孙长忠, 沈国舫. 我国人工林生产力问题的研究 (I) ——影响我国人工林生产力的自然因素评价. 林业科学, 2001, 37(3): 72-77.
- [14] Bao G, Liu Y, Liu N. A tree-ring-based reconstruction of the Yimin River annual runoff in the Hulun Buir region, Inner Mongolia, for the past 135 years. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 4765-4775.
- [15] Chen Z J, Zhang X L, Cui M X, He X Y, Ding W H, Peng J J. Tree-ring based precipitation reconstruction for the forest-steppe ecotone in northern Inner Mongolia, China and its linkages to the Pacific Ocean variability. Global and Planetary Change, 2012, 86-87: 45-56.
- [16] Liu Y, Bao G, Song H M, Cai Q F, Sun J Y. Precipitation reconstruction from Hailar pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) tree rings in the Hailar region, Inner Mongolia, China back to 1865 AD. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 282(1/4): 81-87.

- [17] Zhang T W, Yuan Y J, Wei W S, Yu S L, Zhang R B, Shang H M, Chen F, Fan Z, Qin L. Tree-ring-based temperature reconstruction for the northern Greater Hinggan Mountains, China, since A. D. 1717. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(2): 422-429.
- [18] 张先亮, 何兴元, 陈振举, 崔明星, 黎娜. 大兴安岭山地樟子松径向生长对气候变暖的响应——以满归地区为例. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3101-3108.
- [19] 王晓春, 宋来萍, 张远东. 大兴安岭北部樟子松树木生长与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2011, 35(3): 294-302.
- [20] 尚建勋, 时忠杰, 高吉喜, 徐丽宏, 吕世海, 冯朝阳, 王鲁秀. 呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应. *生态学报*, 2012, 32(4): 1077-1084.
- [21] 朱教君, 曾德慧, 康宏樟, 吴祥云, 范志平. 沙地樟子松人工林衰退机制. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [22] Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976.
- [23] Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree-ring Dating*. Arizona: University of Arizona Press, 1996.
- [24] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [25] Cook E R, Holmes R L. *Users Manual for Program ARSTAN*. Tucson, USA: Laboratory of Tree-Ring Research. Tucson, USA: University of Arizona, 1986.
- [26] Briffa K R, Jones P D, Bartholin T S, Eckstein D, Schweingruber F H, Karlén W, Zetterberg P, Eronen M. Fennoscandian summers from AD 500: Temperature changes on short and long timescales. *Climate Dynamics*, 1992, 7(3): 111-119.
- [27] Esper J, Cook E R, Krusic P J, Schweingruber F H. Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies. *Tree-Ring Research*, 2003, 59(2): 81-98.
- [28] Zhu J J, Fan Z P, Zeng D H. Comparison of stand structure and growth between plantation and natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land. *Journal of Forestry Research*, 2003, 14(2): 103-111.
- [29] Zhu J J, Kang H Z, Tan H, Xu M L, Wang J. Natural regeneraiton characterisites of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests on sandy land in Honghuaerji, China. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(4): 253-259.
- [30] 李胜功. 樟子松适宜气候生态区的模糊聚类分析. *中国沙漠*, 1991, 11(3): 61-66.
- [31] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹, 薛杨, 邱素芬. 樟子松人工固沙林衰退的规律和原因. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2225-2228.
- [32] 焦树仁. 章古台固沙林生态系统的结构和功能. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1989.
- [33] Ivanov N N. Landscape Climatic Zones of the Earth Surface // *Proc. of the All Soviet Geographical Conference, New series, Vol. 1. Academy of Sciences of the URSS, Leningrad*, 1948.
- [34] Rennenberg H, Loreto F, Polle A, Brilli F, Fares S, Beniwal R S, Gessler A. Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biology*, 2006, 8(5): 556-571.
- [35] Mazza G, Manetti M C. Growth rate and climate responses of *Pinus pinea* L. in Italian coastal stands over the last century. *Climatic Change*, 2013, 121(4): 713-725.
- [36] 于信芳, 庄大方. 基于 MODIS NDVI 数据的东北森林物候期监测. *资源科学*, 2006, 28(4): 111-117.
- [37] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P. On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3/4): 289-305.
- [38] Campelo F, Nabais C, Freitas H, Gutiérrez E. Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Annals of Forest Science*, 2006, 64(2): 229-238.
- [39] Pichler P, Oberhuber W. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2/3): 688-699.
- [40] Liang E Y, Shao X M, Hu Y X, Lin J X. Dendroclimatic evaluation of climate-growth relationships of Meyer spruce (*Picea meyeri*) on a sandy substrate in semi-arid grassland, north China. *Trees Structure and Function*, 2001, 15(4): 230-235.
- [41] Driscoll W W, Wiles G C, D'Arrigo R D, Wilmking M. Divergent tree growth response to recent climate warming, Lake Clark National Park and Preserve, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(20): L20703.
- [42] Martin T A, Jokela E J. Stand development and production dynamics of loblolly pine under a range of cultural treatments in north-central Florida USA. *Forest Ecology and Management*, 2004, 192(1): 39-58.
- [43] 毛培利, 曹帮华, 田文侠, 孟凤芝. 人工林生产力年龄效应及衰退机理研究进展. *生态学报*, 2011, 31(11): 3208-3214.