

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0020

ZHANG Xuanwen, YANG Li, LIU Xiaohong, et al. Study of the difference in climate response of *Dahurian Larch* and *Pinus sylvestris* growth in the north Great Hingan Mountains of permafrost regions, Northeast China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 165-174. [张轩文, 杨丽, 刘晓宏, 等. 兴安岭北部多年冻土区落叶松和樟子松生长的气候响应差异研究 [J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 165-174.]

大兴安岭北部多年冻土区落叶松和樟子松生长的气候响应差异研究

张轩文^{1,2}, 杨 丽³, 刘晓宏^{1*}, 张秋良³, 王文志⁴, 曾小敏^{1,2}, 吴国菊^{1,2}

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 4. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要: 以大兴安岭北部根河、呼中和汗马冻土区落叶松和樟子松为样本, 建立了五个树轮宽度年表, 并计算获取了五个样点的树轮截面积指数(BAI)序列。树轮BAI-气候响应关系分析表明, 气温为这一地区落叶松和樟子松生长的主要限制因子; 但落叶松和樟子松对气候变化的响应存在差异。落叶松BAI与3月平均气温, 樟子松BAI与前一年12月至当年4月平均气温均呈显著负相关。考虑到水热综合影响, 落叶松BAI控制因子由1957-1990年与其呈显著正相关的1月份SPEI转变为1991-2013年与其呈显著正相关的1-4月SPEI和与其呈显著负相关的3月份平均气温; 樟子松BAI控制因子则由1957-1990年与其呈显著负相关的2月和8月份平均气温转变为1991-2013年与其呈显著正相关的7月份降水量和6-7月SPEI。结果表明, 在全球变暖背景下, 水热环境改变使得冻土区树木生长限制因子发生变化。

关键词: 落叶松; 樟子松; 种间差异; 树木生长; 多年冻土区; 全球变暖

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2017)01-0165-10

0 引言

根据 IPCC 的第五次报告^[1], 1880-2012 年全球气温升高了约 0.85 °C, 并且升温可能会加速; 而中国东北地区的平均气温在 20 世纪上升了约 1.43 °C^[2]。英国 Hadley 气候预测与研究中心的区域气候模式 PRECIS 的结果表明 2015-2050 年东北大兴安岭地区的温度会增加 1.44~1.89 °C^[3-4]。并且该区位于中国高纬度多年冻土分布区^[5], 处于欧亚大陆冻土带南缘, 冻土厚度较薄^[6]。无论从全球尺度, 还是从局地尺度上看, 该区域均为气候变化的敏感区域^[7]。该地区森林面积占全国林地面积的 30%^[8]。随着气候的持续变暖, 多年冻土退化, 地下冰融化, 积雪深度、面积等高纬度冻土区

的水热环境的变化^[9]对该区域森林生长、结构和动态^[10-11]有显著影响。因此, 对大兴安岭森林动态变化及其对气候变化的响应研究不仅具有重要的理论意义, 也能为该区森林资源的科学管理和合理利用提供科学依据, 具有重要的实践意义。

目前, 对中国东北多年冻土区落叶松和樟子松的研究集中在生长-气候响应关系研究和利用树轮作为代用指标重建气候要素变化历史这两个方面, 张先亮等^[12]、王晓春等^[13]、尚建勋等^[14]、吕姗姗等^[15]分别对大兴安岭不同区域落叶松和樟子松生长气候的响应关系进行了分析; Liu 等^[16]和 Zhang 等^[17]分别利用年轮宽度在树轮-气候响应关系的基础上, 进行了长时间尺度的气温重建; Gao 等^[18]用年轮宽度对降水量变化进行了重建。目前该区域的

收稿日期: 2016-08-09; 修订日期: 2016-12-07

基金项目: 国家重大科学研究计划(973计划)项目(2013CBA01808); 国家自然科学基金项目(41571196); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCSS-ZZ-2016)资助

作者简介: 张轩文(1989-), 男, 甘肃庆城人, 2012年在成都信息工程大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事树轮气候学方面的研究。E-mail: zhangxw-08@163.com

* 通讯作者: 刘晓宏, E-mail: liuxh@lzb.ac.cn.

研究主要基于单一种树种,较少涉及种间差异的探讨,森林对气候的响应研究中对控制因子的转化特征也鲜有涉及。本研究利用大兴安岭北部落叶松和樟子松的五个宽度年表及在此基础上计算得到的截面积指数(Basal Area Index, BAI)序列,分析了树木生长对气候变化的响应特征,着重探讨了相同气候变化背景下,落叶松和樟子松对气候响应的差异,以期在全球气候变化的背景下,为我国高纬度冻土区的森林生长动态研究提供基础数据,为高纬度冻土区森林管理提供新的线索。

1 研究区域和方法

1.1 采样点概况

研究区位于中国东北大兴安岭北部属于中国第二大冻土区的兴安-长白冻土区^[19](图1),DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。该区域年均温约为 $-3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月为1月,极端最低温达 $-52.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;最热月为7月,极端最高温达 $40.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量约为 450.1 mm ,主要集中于5-9月,约占全年总降水总量的85%(图2a)。年均温和生长季(5-9月)温度的变化率分别为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,年降水总量和生长季降水量的变化率分别为 $7.3\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $9.8\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ (图2)。

该区的主要树种是落叶松和樟子松。落叶松多为纯林,间有云杉,赤杨等树种;林下土壤以生草

灰化土或泥炭质土壤为主,间有沼泽土和草甸土^[20]。樟子松林地的面积不大,间或混有少量的兴安落叶松,其下灌木主要包括兴安杜鹃,山刺玫和小叶杜香等。土壤主要以酸性或微酸性的淋溶黑土、薄层粗骨土及风积沙土为主^[21]。落叶松和樟子松耐寒抗旱,适应能力强,是我国最耐寒的松属树种。

1.2 样本采集与年表特征

在大兴安岭北部根河、汗马和呼中三地以一树两芯的方式对落叶松和樟子松进行了样品采集(表1)。共采集落叶松树芯样本112棵,樟子松82棵(图3)。样芯经风干、打磨,直至在显微镜下可以清晰分辨出每一年轮的细胞。对样芯进行初步定年后,利用LINTAB 6年轮宽度测量仪(精度为 0.01 mm)测量树轮原始宽度。然后利用COFECHA程序^[22]对定年结果进行检验,并校正,最后利用ARSTAN软件通过负指数方法和线性函数方法^[23]去除树轮宽度的生长趋势,得到落叶松和樟子松的原始宽度年表(RAW)、标准年表(STD)和差值年表(RES)。

落叶松和樟子松年轮序列长度在 $224\sim 348\text{ a}$ 。落叶松的平均敏感度均高于 0.26 ,樟子松平均敏感度相对较低,但仍在 0.2 以上。较高的敏感度表明样本可以较好地保存气候信息(表1)。落叶松和樟子松的宽度序列均呈现显著的种内相关($p < 0.01$)。基于此,将同一树种不同样点的宽度数据合并,得到该区域落叶松和樟子松树轮宽度原始年表和标准年表。

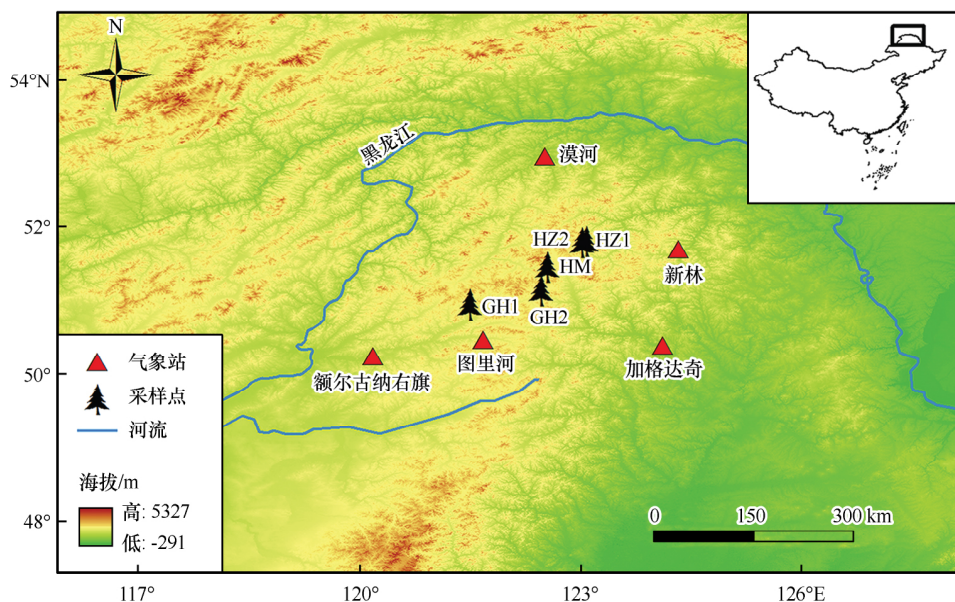


图1 大兴安岭北部采样点和邻近气象站点分布

Fig. 1 Locations of the sampling sites and weather stations in the Greater Hinggan Mountains

表 1 大兴安岭北部采样点信息
Table 1 Information of the sampling sites in the northern Great Higgan Mountains

样点编号	地点	树种	纬度/N	经度/E	海拔/m	年表长度	RBAR	MS	树/树种
GH1	根河	落叶松	50°57′	121°30′	850	1722–2013 年	0.671	0.312	27/43
HM	汗马	落叶松	51°27′	122°33′	850	1783–2013 年	0.586	0.265	21/39
HZ1	呼中	落叶松	51°47′	123°01′	780	1790–2013 年	0.682	0.315	24/30
HZ2	呼中	樟子松	51°48′	123°05′	900	1666–2013 年	0.564	0.203	24/44
GH2	根河	樟子松	51°08′	122°28′	900	1683–2013 年	0.584	0.209	21/38

注: RBAR 表示序列间平均相关性; MS 表示平均敏感性

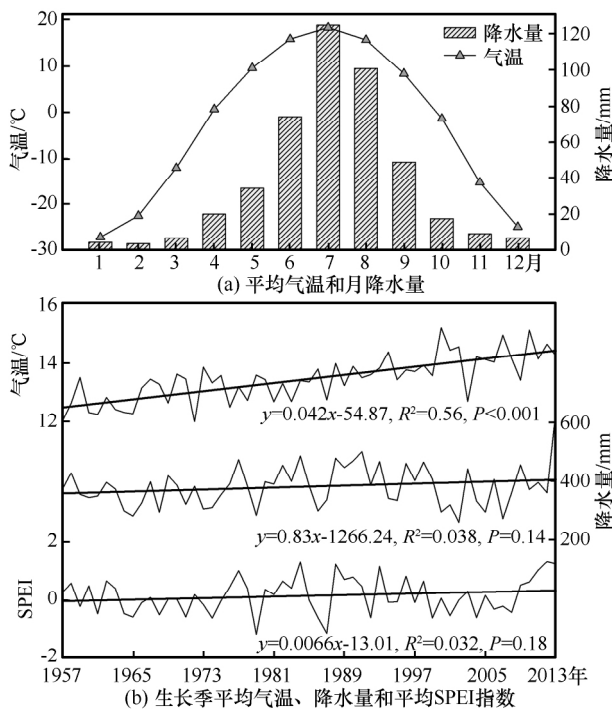


图 2 大兴安岭北部月平均气温和月降水量 (a), 1957–2013 年生长季 (5–9 月) 平均气温、降水量和平均 SPEI 指数 (b)

Fig. 2 Monthly variations of mean temperature and precipitation (a) and the annual variations of mean air temperature, total precipitation and mean SPEI in growing season (May–September) from 1957 to 2013 (b) in the northern Great Higgan Mountains

1.3 方法与数据

当树木年轮宽度保持相对稳定或变窄的趋势时,木材的体积可能继续增加,说明树轮宽度没有完全消除因树木老化导致的生长下降的趋势^[23]。为了更好的消除树木老龄化导致的生长下降的趋势,同时保留关于气候条件对树木生长影响的信息,本研究中将树轮宽度转化为截面积指数 (BAI)^[24–26]。其计算公式:

$$BAI = \pi R_t^2 - \pi R_{t-1}^2 \quad (1)$$

式中: t 表示日历年; BAI 表示在 t 年时的树轮宽度

的面积; R_t 表示在 t 年时距离树芯的半径; R_{t-1} 表示在 $t-1$ 年时距离树芯的半径。

研究中使用气象观测数据来自中国气象科学数据共享服务网,主要包括距样点最近的漠河 (50°58′N, 122°31′E, 433 m a. s. l.), 新林 (51°42′N, 124°2′E, 496 m a. s. l.), 图里河 (50°20′N, 124°41′E, 732.6 m a. s. l.), 加格达奇 (51°24′N, 124°7′E, 371.7 m a. s. l.) 和额尔古纳右旗 (50°15′N, 120°11′E, 581.4 m a. s. l.) 等站点 1957–2013 年的月平均气温和降水量等观测数据 (图 1 和图 2)。提取 CRU TS3.2 数据集中研究区域所在格点 (48°~53.5°N, 121°~123°E) 1957–2013 年的月平均气温、降水量和标准化降水蒸发指数^[27] (SPEI-3, 下文用 SPEI 代替) 等数据来分析树轮气候空间响应等。

2 结果与讨论

2.1 树木生长的趋势变化

Wigley 等^[28]的研究表明,当 $EPS > 0.85$ 时,树轮宽度年表可信;落叶松和樟子松可信年表区间分别为 1850–2013 和 1770–2013 年。落叶松樟子松的宽度序列在可信区间内均没有明显趋势变化 (图 3)。

落叶松 BAI 在 1722–1930 年有显著上升趋势,而在 1930–1990 年显著降低,降低速率分别为: $0.77 \text{ cm}^2 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.53 \text{ cm}^2 \cdot (10\text{a})^{-1}$; 1990–2013 年间无明显变化趋势。与落叶松相比,樟子松 BAI 在 1722–1930 年和 1990–2013 年均显著上升,增长速率分别为 $0.37 \text{ cm}^2 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $1.0 \text{ cm}^2 \cdot (10\text{a})^{-1}$; 1930–1990 年间,樟子松 BAI 呈现显著下降趋势,其下降速率为 $0.44 \text{ cm}^2 \cdot (10\text{a})^{-1}$ (图 4)。

2.2 BAI–气候响应关系

相关分析显示,落叶松 BAI 与 3 月气温呈显著负相关,樟子松 BAI 与前一年 12 月–当年 4 月平

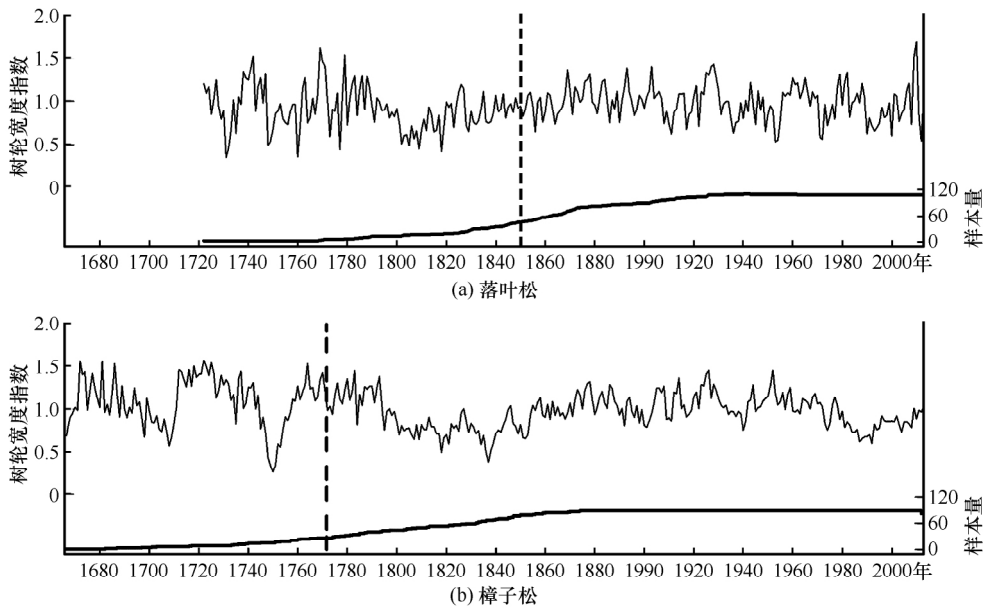


图3 大兴安岭北部落叶松(a)和樟子松(b)树轮宽度(黑色细实线),样本量(黑色粗实线),虚线表示 $EPS > 0.85$
 Fig. 3 Tree-ring width (black thin line) and sample volume (black heavy line) of Dahurian Larch (a) and *Pinus sylvestris* (b) in the Great Higgnan Mountains (the dash line representing the $EPS > 0.85$)

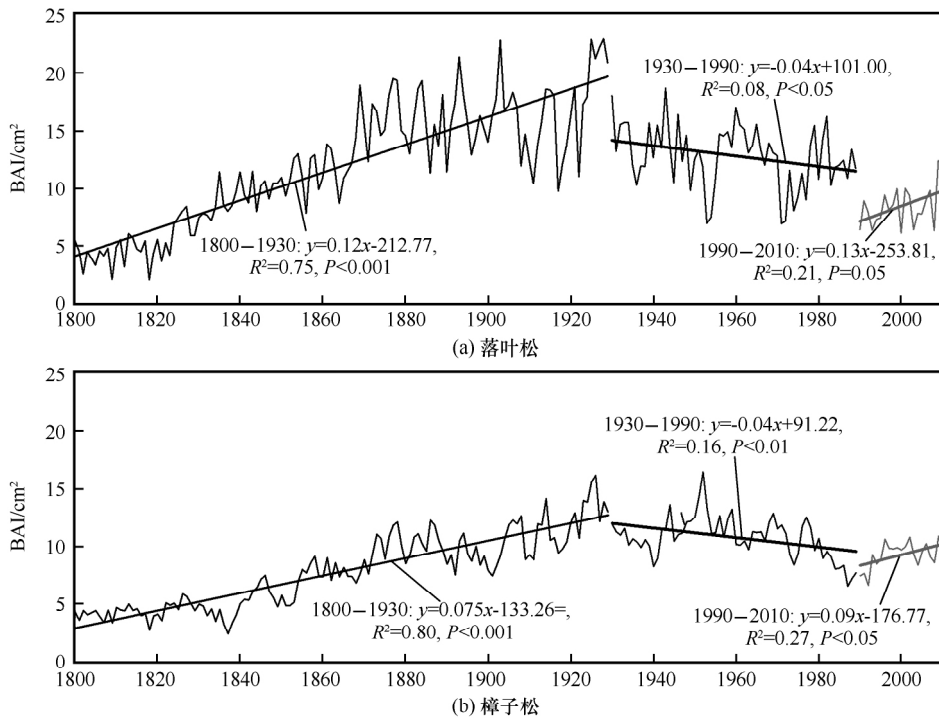


图4 大兴安岭北部落叶松(a)和樟子松(b) BAI
 Fig. 4 Annual variations of basal area index of Dahurian Larch (a) and *Pinus sylvestris* (b) in the northern Great Higgnan Mountains

均气温亦表现为显著负相关,落叶松和樟子松 BAI 与 SPEI 及降水量的相关性不显著(表 2),表明落叶松和樟子松的生长均受到生长季前气温的影响。这与陶树光等^[29]和吴祥定等^[30]的研究结果一致。这可能是由于较低的冬季气温,不能为树木生长提

供足够的热量,导致生长季缩短,生长量降低^[29]。并且,生长季前低温对树木生长的抑制作用也与树木的生理过程有关:温度在 $0 \sim -3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,光合作用停滞,呼吸作用、蒸腾作用和同化作用为主;同化作用在温度低于 $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时也不再发生;而呼吸作

表2 落叶松和樟子松 BAI 与 1957 - 2013 年气候要素的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between climatic factors of 1957 - 2013 and BAI of Dahurian larch and Pinus sylvestris

月份	落叶松			樟子松		
	气温	降水量	SPEI	气温	降水量	SPEI
前一年 10 月	-0.04	0.02	0.17	-0.04	-0.03	-0.16
前一年 11 月	-0.18	-0.01	0.11	-0.02	-0.22	0.02
前一年 12 月	-0.16	-0.15	0.02	-0.31*	0.03	-0.11
1 月	-0.01	-0.22	-0.16	-0.34*	-0.12	-0.18
2 月	-0.14	-0.06	-0.22	-0.42*	-0.06	-0.08
3 月	-0.37*	0.00	-0.10	-0.26*	0.02	-0.04
4 月	0.00	-0.02	0.11	-0.26*	0.01	0.15
5 月	0.00	-0.13	0.12	-0.08	0.14	0.22
6 月	0.03	-0.20	-0.04	-0.20	-0.16	0.04
7 月	-0.11	-0.07	-0.05	-0.19	0.19	0.11
8 月	0.09	0.13	0.03	-0.25	-0.18	-0.03
9 月	-0.18	-0.04	0.11	-0.11	0.04	0.04
10 月	-0.21	-0.25	0.09	-0.22	-0.10	-0.13

注: * 为 $P < 0.05$; ** 为 $P < 0.01$

用发生温度的阈值下线为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ [31]。因此, 生长季前, 温度越高, 呼吸作用越强, 消耗养分越多, 生长季径向生长越慢。Chen 等 [32] 的研究表明, 莫尔道嘎地区落叶松树轮宽度与前一年 11 月 - 当年 1 月的气温存在负相关关系, 但并不显著; 并指出冬季低温造成冻土区土壤冻结深度增加和地表温度降低, 延缓地表变暖, 延长树木根系生长时间 [33]。另一方面, 在生长季初期, 树木生长所需水分的直接来源主要是储存在土壤中的积雪融水 [34]; 然而, 全球变暖的背景下, 尤其是冬季升温 [34] 和积雪深度变率增加 [36], 使得积雪融化期提前, 土壤中储存的积雪融水流失加剧 [37], 造成生长季早期树木生长水分来源不足, 从而抑制树木生长。

落叶松 BAI 对气候要素的响应关系, 在 1990 年前后有显著差异: 1957 - 1990 年与 1 月 SPEI 呈显著正相关; 而在 1991 - 2013 年受到 3 月平均气温和 1 - 4 月 SPEI 的共同影响(图 5)。这可能是由于冬、春季节气候干燥, 积雪深度变浅, 气温的快速升高让土壤水分流失加剧, 落叶松生长所需水分不足, 抑制径向生长, 造成 1957 - 1990 年落叶松生长趋势下降。与 1 - 4 月 SPEI 的正相关则表明了生长主要受生长季前水分条件控制, 生长季前蕴藏在土壤中的水分越多, 则来年树木生长的水分越充足, 利于树木生长; 但若生长季前升温较快, 落叶

松呼吸作用加强, 消耗增多, 积累量降低 [30], 会使生长的上升趋势减弱, 这可能是 1990 年以后落叶松生长略有增加但不显著的原因。对落叶松 BAI 与 1 月 SPEI, 3 月平均气温和 1 - 4 月 SPEI 的空间相关性分析的结果更是证明了上述结果(图 6)。受西伯利亚高压 [38] 影响, 研究区域 1 - 4 月相对干燥, 这种气候条件下, 春季生长缺水会抑制落叶松的生长; 而在西伯利亚高压 [38] 和东亚季风 [39] 共同影响下, 大兴安岭北部地区冷季气候条件相对湿润, 利于落叶松的生长。

这种 BAI 对气候要素的响应关系在不同时段的显著差异也出现在樟子松的生长过程中, 1957 - 1990 年主要与 2 月和 8 月气温呈显著负相关, 而 1991 - 2013 年则受与夏季 7 月降水量和 6 - 7 月 SPEI 表征的干湿状况呈显著正相关(图 5)。春季低温同夏季高温引起的干旱共同造成樟子松 1957 - 1990 年的生长下降; 1990 年以后, 夏季降水充足, 促进了樟子松的生长, 使 BAI 显著上升。而樟子松 BAI 与 1957 - 2013 年 8 月平均气温, 1991 - 2013 年 7 月降水量和 6 - 7 月 SPEI 的空间相关分析则显示, 东亚季风影响下的研究区域 8 月气温高, 相对干旱, 会抑制樟子松的生长; 相反, 若夏季气候条件相对湿润, 则有可能利于樟子松的生长(图 6)。因为当夏季气温高时, 如果降水不能满足植物光合

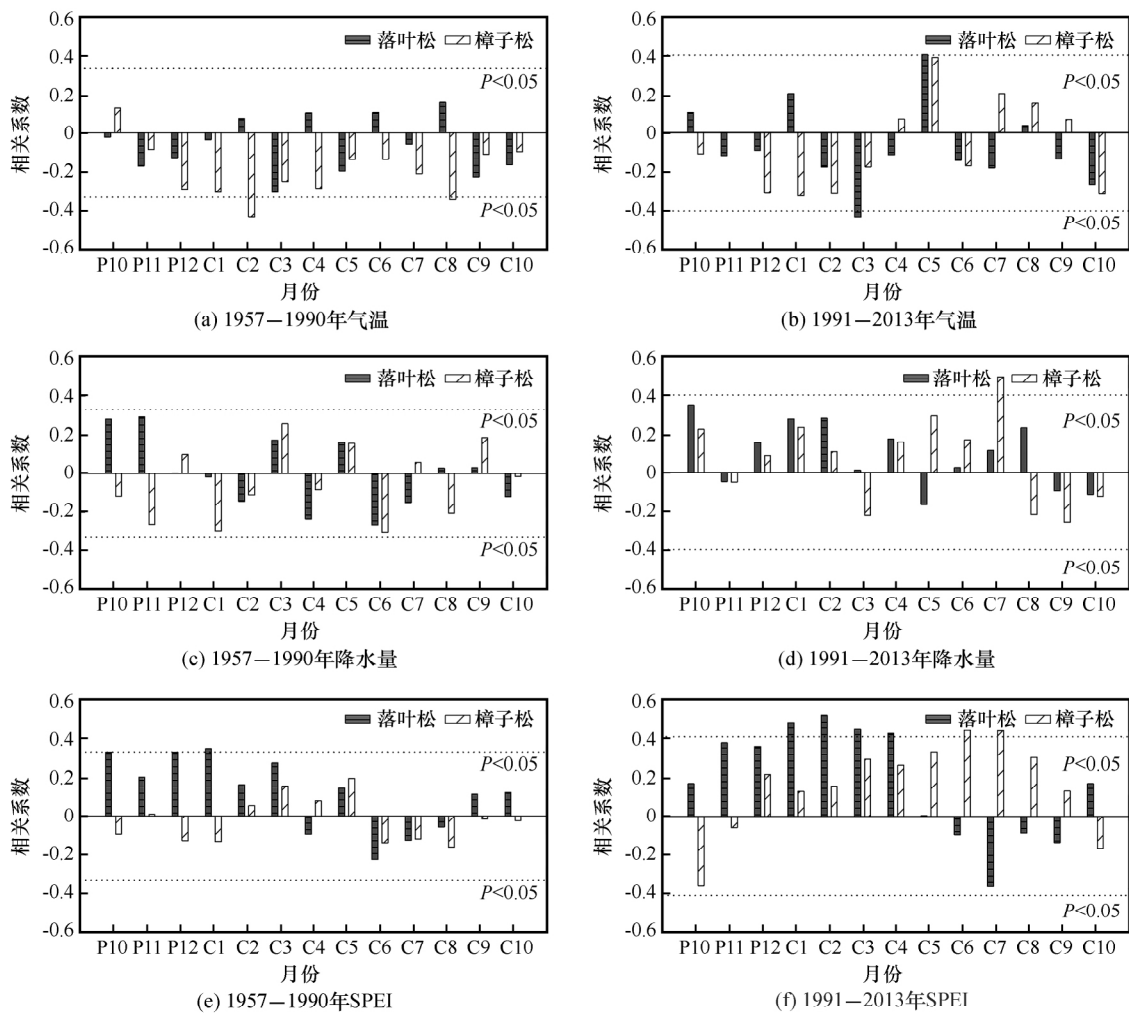


图5 落叶松 BAI 和樟子松 BAI 与 1957–1990 年气温 (a)、降水量 (c) 和 SPEI (e), 1991–2013 年气温 (b)、降水量 (d) 和 SPEI 指数 (f) 的相关系数, 虚线表示 $P < 0.05$ (P 表示前一年, C 表示当年)

Fig. 5 Correlation coefficients between BAI of Dahurian larch and *Pinus sylvestris* and monthly air temperature (a), precipitation (c), SPEI index (e) from 1957 through 1990, monthly air temperature (b), precipitation (d), SPEI index (f) from 1991 through 2013 (dotted line indicating the $P < 0.05$; P indicating the previous year and C indicating the current year)

作用所需水分, 植物光合作用减缓^[18], 会抑制树木生长; 若降水量充足, 植物光合作用加速, 可以促进树木生长。

3 结论

对大兴安岭北部根河、呼中和汗马冻土区落叶松和樟子松树轮宽度和 BAI 分析表明, 落叶松宽度在 1850–2013 年和樟子松宽度序列在 1770–2013 年时段内没有明显的趋势变化。落叶松 BAI 和樟子松 BAI 均在 1930 年前呈现整体上升趋势, 在 1930 年后整体呈现下降趋势。但樟子松在 1990 年以后有显著的增加趋势而落叶松没有。

生长季前的气温是兴安落叶松和樟子松生长的

主要控制因子。与落叶松相比, 樟子松对于生长季前的气温的变化更为敏感。随着全球气候变化, 大兴安岭北部冻土区落叶松和樟子松对气候的响应存在种间差异, 造成了 BAI 变化趋势的差异; 并且, 同一树种在不同时间段内对气候的响应也有不同。西伯利亚高压影响下研究区域冷季的低温和干旱可能会抑制落叶松的生长, 西伯利亚高压和东亚季风共同影响下冷季湿润的气候条件则更有利于落叶松的生长。东亚季风影响下的研究区域夏季气温高带来的干旱可能会抑制樟子松的生长, 夏季湿润的气候条件则有利于樟子松的生长。对树木生长的生理过程和短时间尺度(旬、日等)气候要素或环境条件响应等问题, 还需要进行生理监测进行深入研究。

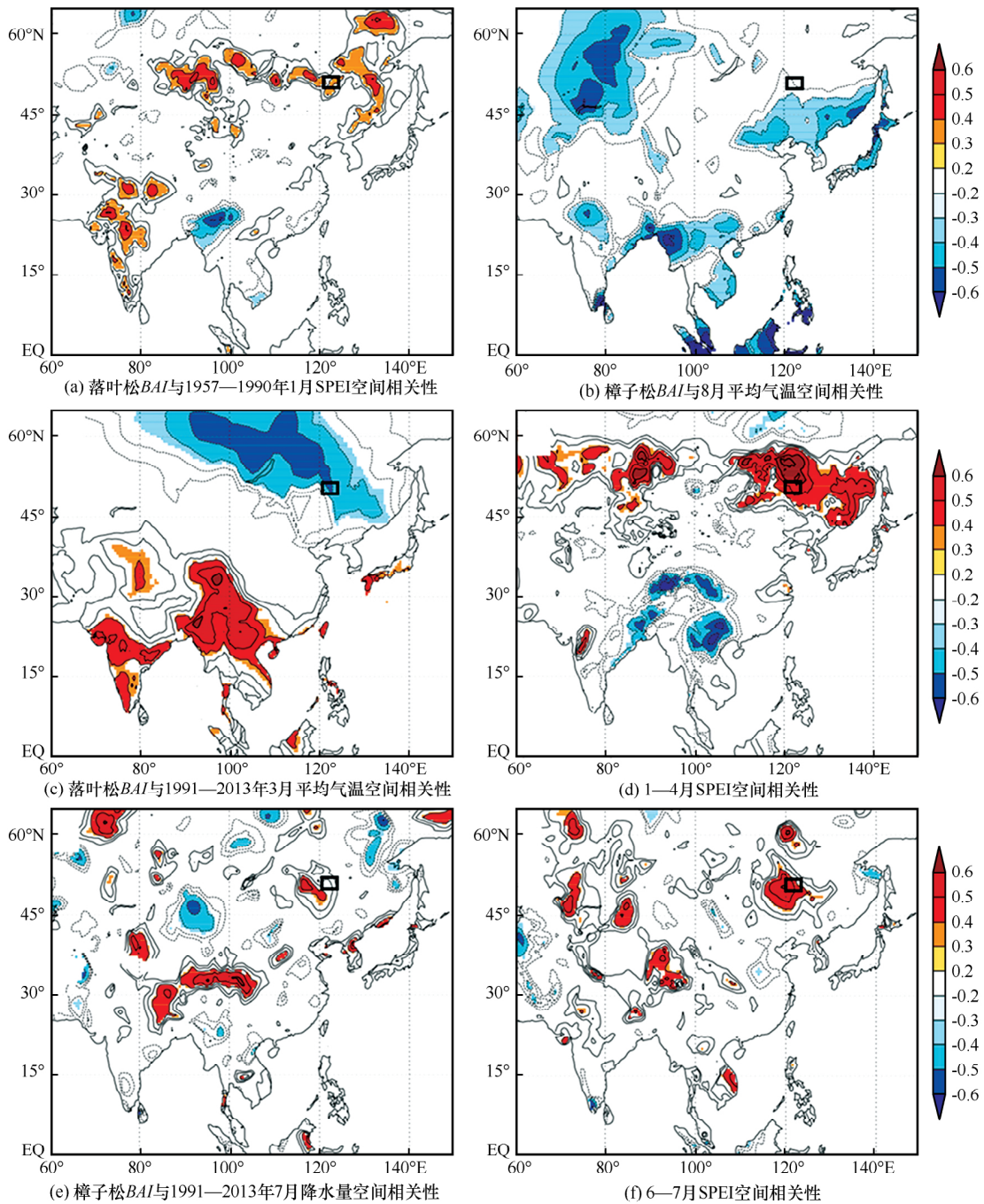


图6 落叶松 BAI 与 1957 - 1990 年 1 月 SPEI (a) , 樟子松 BAI 与 8 月平均气温 (b) , 落叶松 BAI 与 1991 - 2013 年 3 月平均气温 (c) , 1 - 4 月 SPEI (d) , 樟子松 BAI 与 1991 - 2013 年 7 月降水量 (e) , 6 - 7 月 SPEI (f) 空间相关性, 黑色方框为研究区域

Fig. 6 Spatial correlations between Basal Area Index (BAI) of *Dahurian larch* and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in January averaged over 1957 - 1990 (a) , BAI of *Pinus sylvestris* and mean August air temperature (b) , BAI of *Dahurian larch* and March air temperature averaged over 1991 - 2013 (c) , BAI of *Dahurian larch* and SPEI of January-April (d) , BAI of *Pinus sylvestris* and July precipitation averaged over 1991 - 2013 (e) and BAI of *Pinus sylvestris* and June-July SPEI (f) (The black thick block indicating the study area)

参考文献 (References) :

[1] Field C B , Barros V R , Mastrandrea M D , et al. Climate change 2014: impacts , adaptation , and vulnerability. Part A: global and

sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge University Press , 2014: 1 - 32.

[2] Sun Fenghua , Yuan Jian , Lu Shuang , et al. The change and test of climate in Northeast China over the last 100 years [J]. Climat-

- ic and Environmental Research, 2006, 11(1): 101–108. [孙凤华, 袁建, 路爽, 等. 东北地区近百年气候变化及突变检测[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(1): 101–108.]
- [3] Gao Yonggang, Zhao Huiying, Gao Feng, et al. Climate change trend in future and its influence on wet lands in the Greater Khingan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 47–56. [高永刚, 赵慧颖, 高峰, 等. 大兴安岭区域未来气候变化趋势及其对湿地的影响[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 47–56.]
- [4] Yang Zhigang, Zhuoma, Lu Hongya, et al. Characteristics of precipitation variation and its effects on runoff in the Yarlung Zangbo River basin during 1961–2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 166–172. [杨志刚, 卓玛, 路红亚, 等. 1961–2010年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 166–172.]
- [5] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China [M]. Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土 [M]. 科学出版社, 2000.]
- [6] Yang Jianping, Yang Suiqiao, Li Man, et al. Vulnerability of frozen ground to climate change in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1436–1445. [杨建平, 杨岁桥, 李曼, 等. 中国冻土对气候变化的脆弱性[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1436–1445.]
- [7] Wang Xiaoying, Zhao Chunyu, Jia Qingyu. Impacts of climate change on forest ecosystems in Northeast China [J]. Advances in Climate Change Research, 2013, 4(4): 230–241.
- [8] Zhang Yuzhen, Liang Shunlin. Changes in forest biomass and linkage to climate and forest disturbances over Northeastern China [J]. Global Change Biology, 2014, 20(8): 2596–2606.
- [9] Vaganov E A, Kirilyanov A V. Dendrochronology of larch trees growing on Siberian permafrost [M]//Permafrost Ecosystems. Germany, Berlin: Springer Netherlands, 2010: 347–363.
- [10] Yan Xiaodong, Zhao Shidong, Yu Zhenliang. Modeling growth and succession of northeastern China forests and its applications in global studies [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(1): 1–8. [延晓冬, 赵士洞, 于振良. 中国东北森林生长演替模拟模型及其在全球变化研究中的应用 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 1–8.]
- [11] Wang Ye, Yan Xiaodong. The response of the forest ecosystem in China to global climate change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 1009–1018. [王叶, 延晓冬. 全球气候变化对中国森林生态系统的影响 [J]. 大气科学, 2006, 30(5): 1009–1018.]
- [12] Zhang Xianliang, Cui Mingxing, Ma Yanjun, et al. *Larix gmelinii* tree-ring width chronology and its responses to climate change in Kuduer, Great Xing'an Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2501–2507. [张先亮, 崔明星, 马艳军, 等. 大兴安岭库都尔地区兴安落叶松年轮宽度年表及其与气候变化的关系 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2501–2507.]
- [13] Wang Xiaochun, Song Laiping, Zhang Yuandong. Climate-tree growth relationships of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the northern Daxing'an Mountains, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(3): 294–302. [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 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 294–302.]
- [14] Shang Jianxun, Shi Zhongjie, Gao Jixi, et al. Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1077–1084. [尚建勋, 时忠杰, 高吉喜, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1077–1084.]
- [15] Lu Shanna, Wang Xiaochun. Growth-climate response and winter precipitation reconstruction of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in A'li River of Great Khingan Range [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2014, 46(2): 110–116. [吕姗姗, 王晓春. 大兴安岭北部阿里河樟子松年轮气候响应及冬季降水重建 [J]. 东北师大学报(自然科学版), 2014, 46(2): 110–116.]
- [16] Liu Yu, Bao Guang, Song Huiming, et al. Precipitation reconstruction from Hailar pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) tree rings in the Hailar region, Inner Mongolia, China back to 1865 AD [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2009, 282(1/2/3/4): 81–87.
- [17] Zhang Xianliang, He Xingyuan, Li Jinbao, et al. Temperature reconstruction (1750–2008) from Dahurian larch tree-rings in an area subject to permafrost in Inner Mongolia, Northeast China [J]. Climate Research, 2011, 47(3): 151–159.
- [18] Gao Jixi, Shi Zhongjie, Xu Lihong, et al. Precipitation variability in Hulunbuir, northeastern China since 1829 AD reconstructed from tree-rings and its linkage with remote oceans [J]. Journal of Arid Environments, 2013, 95(8): 14–21.
- [19] Wei Zhi, Jin Huijun, Zhang Jianming, et al. Prediction of permafrost changes in Northeastern China under a changing climate [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(6): 924–935.
- [20] Zhou Yiliang, Zu Yuangang, Yu Dan. Vegetation geography in Northeast China [M]. Beijing: Science Press, 1997. [周以良, 祖元刚, 于丹. 中国东北植被地 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [21] Xu Huacheng. Daxing'an Mountains forests in China [M]. Beijing: Science Press, 1998. [徐化成. 中国大兴安岭森林 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [22] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. Tree Ring Bulletin, 1983, 44(3): 69–95.
- [23] Cook E R. A time-series analysis approach to tree-ring standardization [D]. Tucson, USA: The University of Arizona, 1985.
- [24] Wang Wenzhi, Liu Xiaohong, An Wenling, et al. Increased intrinsic water-use efficiency during a period with persistent decreased tree radial growth in northwestern China: causes and implications [J]. Forest Ecology and Management, 2012, 275(4): 14–22.
- [25] Jump A S, Hunt J M, Peñuelas J. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica* [J]. Global Change Biology, 2006, 12(11): 2163–2174.
- [26] Johnson S E, Abrams M D. Basal area increment trends across age classes for two long-lived tree species in the eastern US [J]. Climatology and Ecology, 2009, 7(1): 127–134.
- [27] Vicenteserrano S M, Beguer a S, Lópezmoreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2009, 23(7): 1696–1718.
- [28] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D, et al. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(2): 201–213.
- [29] Tao Shuguang, Zhang Mingtie, Zhang Tao, et al. Establishment of standardization tree-ring chronology of *Larix gmelinii* Rupr [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technolo-

- gy, 2013, 39(2): 20–24. [陶树光, 张明铁, 张韬, 等. 兴安落叶松标准化年轮年表的建立[J]. 内蒙古林业科技, 2013, 39(2): 20–24.]
- [30] Wu Xiangding, Shao Xuemei. A preliminary study on impact of climate change on tree growth using tree ring-width data[J]. Acta Geographical Sinica, 1996, 63(S1): 92–101. [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[J]. 地理学报, 1996, 63(增刊1): 92–101.]
- [31] Freeland R O. Apparent photosynthesis in some conifers during winter[J]. Plant Physiology, 1944, 19(2): 179–85.
- [32] Chen Zhenju, Zhang Xianliang, He Xingyuan, et al. Extension of summer (June–August) temperature records for northern Inner Mongolia (1715–2008), China using tree rings[J]. Quaternary International, 2013, 283(1): 21–29.
- [33] Kirilyanov A, Hughes M, Vaganov E, et al. The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic[J]. Trees, 2002, 17(1): 61–69.
- [34] Wang Bo, Chen Tuo, Xu Guobao, et al. The relationships between snow cover and *Sabina Przewalskii* radial growth at alpine timberlines in the middle Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2): 318–326. [王波, 陈拓, 徐国保, 等. 祁连山中部祁连圆柏林线树木生长与积雪响应关系研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 318–326.]
- [35] Fang Yihe, Zhou Fang, Zhang Yunfu, et al. The comparison of factors on interannual and interdecadal variations of the winter temperature in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(7): 844–850. [房一禾, 周放, 张运福, 等. 东北冬季气温年际、年代际影响因子的比较[J]. 地理科学, 2013, 33(7): 844–850.]
- [36] Ma Lijuan, Qin Dahe. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957–2009[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 1–11. [马丽娟, 秦大河. 1957–2009年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 1–11.]
- [37] Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. A tree-ring based precipitation reconstruction for the Mohe region in the northern Greater Hinggan Mountains, China, since AD 1724[J]. Quaternary Research, 2014, 82(1): 14–21.
- [38] Wang Zunya, Ding Yihui. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(6): 1068–1076. [王遵娅, 丁一汇. 近53年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1068–1076.]
- [39] Yang Ming, Xu Haiming, Li Weiliang, et al. Variations of east Asian Monsoon and its relationships with land-sea temperature difference in recent 40 year[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(5): 522–530. [杨明, 徐海明, 李维亮, 等. 近40年东亚季风变化特征及其与海陆温差关系[J]. 应用气象学报, 2008, 19(5): 522–530.]

**Study of the difference in climate response of *Dahurian Larch* and
Pinus sylvestris growth in the north Great Hinggan Mountains
of permafrost regions , Northeast China**

ZHANG Xuanwen^{1 2} , YANG Li³ , LIU Xiaohong¹ , ZHANG Qiuliang³ , WANG Wenzhi⁴ ,
ZENG Xiaomin^{1 2} , WU Guoju^{1 2}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences , Northwest Institute of Eco-Environment and Resources , Chinese Academy of Sciences ,
Lanzhou 730000 , China; 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China; 3. Forest College of
Inner Mongolia Agricultural University , Huhhot 010018 , China; 4. Institute of Mountain Hazards and
Environment , Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610041 , China)

Abstract: Based on the *Dahurian Larch* and *Pinus sylvestris* tree-ring samples taken from Genhe , Hanma and Huzhong permafrost regions in the north Great Hinggan Mountains , five tree-ring width chronologies were established , and then the basal area increment (BAI) was calculated for the five sites. The response analysis showed that temperature was the dominant factor affecting the tree growth in these regions , with distinct difference between the two species. BAI of *Dahurian Larch* was significantly and negatively correlated with the monthly average temperature in March. BAI of *Pinus sylvestris* was significantly and negatively correlated with the monthly averaged temperature from previous December to current April. The climate limiting factor on the radial growth of *Dahurian Larch* had transformed from a significant negatively correlation with SPEI index in January from 1957 to 1990 into a significant correlation with SPEI index from January to April and temperature in March from 1991 to 2013 , and the climate limiting factor for *Pinus sylvestris* had changed from a significant negative correlation with February and August temperatures from 1957 to 1990 to a significant correlation with precipitation in July and SPEI index from June to July from 1991 to 2013. These results indicated that the two species responding to climate change , especially , to temperature change , was different under the background of global warming , even the climate limiting factor on radial growth would change in different periods for the same species.

Key words: *Dahurian Larch*; *Pinus sylvestris*; species-specific response; tree growth; permafrost regions; global warming

(本文编辑: 周成林)