

数值模拟温度变化对兴安落叶松径生长的影响¹⁾

韩胜利

(内蒙古农业大学,呼和浩特,010018)

高涛

(内蒙古自治区气象科学研究所)

张秋良

(内蒙古农业大学)

乌兰

(内蒙古自治区气象科学研究所)

摘要 大兴安岭林区是我国典型的气候敏感区,该地区具有典型代表性的地带性植被兴安落叶松,其对气温变化的响应有不可或缺的作用。本研究通过采样、烘干、刨平、打磨、抛光、扫描、存储图形,使用软硬件系统 WinDENDROT M、COFECHA 和 ARSTAN 测量和检验,建立了大兴安岭兴安落叶松标准化年表。同时利用内蒙古大兴安岭根河地区 50 a(1961—2010年)气温观测数据,分析了生长轮宽度与根河及附近区域气温和深层地温的关系。运用当地气温观测历史资料对 Hadley-PRECIS 和 CMIP5 气候模式的偏差做了订正。假设未来 4 种温室气体排放情形下,运用两种数值模式,对 2011—2040 年根河地区气温订正后的模拟结果建立回归方程,评估未来兴安落叶松在增温条件下的径生长趋势。结果表明:一年中,树木生长季后期 9—10 月份气温偏高,对兴安落叶松生长的不利影响显著,生长季(5—9 月份)的深层地温偏高,对第二年树木生长有显著的促进作用。但是,未来增温气候趋势对兴安落叶松径生长不利。

关键词 兴安落叶松; 标准化生长轮表; 气候数值模拟; 增温; 径生长

分类号 S757

Effect of Numerical Simulated Temperature Variations on Diameter Growth of the *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. // Han Shengli(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P. R. China); Gao Tao(The Inner Mongolia Meteorological Institute); Zhang Qiuliang(Inner Mongolia Agricultural University); Wu Lan(The Inner Mongolia Meteorological Institute) // Journal of Northeast Forestry University 2017 45(9): 5-12.

Based on work of sampling, drying, planing, polishing, scanning and saving scanned pictures of the sample dishes of tree-ring, a standard chronology ring-width (STD) of the *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. collected from Genhe, Daxing'an Mountains was established by using the software of WinDENDROT M, COFECHA and ARSTAN. Correlations between the STD and the air and deep layer soil temperatures recorded at Genhe and nearby region for 50 a (1961-2010) were analyzed. Furthermore, the numerical simulating deviations of the Hadley-PRECIS and the CMIP5 climate models under four supposed emission situations were corrected by using the historical observation records of the air temperature. A regression function was set up by using the historical records of the air temperature and the STD. In addition, the next 30 a (2011-2040) air temperatures was pre-estimated. Negative effects for the next 30 a on the diameter growth trend of the *L. gmelinii* were manifested while the regression function and the simulated air temperature were used for analyses. The results indicate that during a year the higher air temperature of later period (September-October) of the tree-growing season conducts negative impacts on the *L. gmelinii*, and higher soil temperatures of the deep layers in the previous May-September affect the growth of trees positively. Besides, an increasing trend of the simulated air temperature would conduct a negative effect on diameter growth of the *L. gmelinii* for the future time.

Keywords *Larix gmelinii*; Standard chronology ring-width; Climate numerical simulation; Increasing temperature; Diameter growth

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2017.09.002

森林与气候有密切的关系^[1-2],气候变化不可避免的对森林生态系统产生一系列的影响,森林生态系统对气候也产生一定的反馈作用^[3]。森林对气候变化的适应性比较缓慢,也最易受到气候变化的不利影响^[4]。因此,评价森林生态系统的结构和功能对全球气候变化的响应和适应是非常重要的研究领域之一^[5]。近年来,气候数值模式被气候科学家们视为一种应用工具,常用模拟不同时间尺度的气候状况,预测未来气候。但是,在森林生长变化与数值模式模拟气候的变化相结合,预测森林群落生长的研究相对较少。树木的径向生长不仅受自身遗传

因素的制约,也受外界环境条件的影响^[6]。在外界影响因子中,温度对森林群落的影响最为重要。

树轮的年表不但可用于定年,而且由于去掉生长的趋势和其他非气候因素的影响后,树轮年表只保留气候的信号^[7-8]。通过分析树木生长轮宽度与气候因子的相关性,可以揭示气候变化对树木径向生长的影响,并可找出影响树木径向生长的主要限制因子。目前,树木年代学的研究领域主要集中在利用树木生长轮进行气候和其它方面的重建上^[9-18],而分析树木径向生长与气候因子相关性的研究较少。因此,研究树木径向生长与气候因子的关系,有助于了解一个地区的生态限制因素以及未来该区域森林生态系统的变化趋势。

大兴安岭林区是我国原始林最茂密的区域之一,是我国典型的气候敏感区。在全球的气候变化状况下,研究本地区森林群落生长的气候限制因子,对预测该区域生态系统的变化趋势具有重要的理论和现

¹⁾ “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0504100);国家自然科学基金项目(41665003)。

第一作者简介:韩胜利,男,1975年5月生,内蒙古农业大学林学院,博士研究生。E-mail: hanshengli2003@126.com。

通信作者:张秋良,内蒙古农业大学林学院,教授, E-mail: zqle@mail@vip.sina.com;高涛,内蒙古自治区气象科学研究所,研究员, E-mail: Frautao@yahoo.com。

收稿日期:2017年4月10日。

责任编辑:王广建。

实意义。为此,本研究通过建立兴安落叶松的标准化生长轮宽度年表,解释影响大兴安岭地区兴安落叶松树轮径向生长的主要气候因子及其响应的关系,界定本地区限制该树种树木径向生长的主要气候因子,为大兴安岭地区森林可持续经营提供理论依据。

1 研究区概况

研究区设在内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站试验区内,地理坐标为东经 $120^{\circ}41'30''\sim 122^{\circ}42'30''$,北纬 $50^{\circ}25'30''\sim 51^{\circ}17'0''$,海拔 $800\sim 1451\text{ m}$;年平均气温 $-4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 $35.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-49.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的积温 $1402\text{ }^{\circ}\text{C}$;年降水量 $400\sim 550\text{ mm}$,无霜期 $80\sim 90\text{ d}$ 。土壤为棕色针叶林土,土层厚度 $15\sim 45\text{ cm}$ 。森林以兴安落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) 为建群种的寒温带针叶林,群落结构多以落叶松-草类、落叶松-杜香、落叶松-杜鹃为主,伴生树种有白桦(*Betula platyphylla*) 和山杨(*Populus davidiana*)。常见林下植物有杜鹃(*Rhododendron dahuricum*)、杜香(*Ledum palustre*)、红花鹿蹄草(*Pyrola incarnate*)、笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum*)、舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)、稠李(*Padus asiatica* Kom)、山黧豆(*Lathyrus quinquevenivus*) 等。

2 研究方法

气象数据:采用根河地区 50 a(1961—2010 年)气温观测数据,40 a(1971—2010 年)深层地温(深

度 40 cm 和 80 cm) 观测数据,缺失的观测数据,利用周边观测站的观测值做算术平均处理,将其补齐。各要素各月的月值,由当月每日观测值做算术平均获得。

气候数值模拟数据处理和订正:选用英国 Hadley 中心-PRECIS 区域气候模式在 IPCC-SRES 中所描述的未来温室气体排放情景 A1B、A2 和 B2 对未来根河地区气温的模拟输出结果,并选用国家气候中心制作并发布“中国地区气候变化预估数据集”(CMIP5),该模式给出的是“WCRP 耦合模式比较计划中的阶段 5 多模式数据”,集中了全球气候模式数据,是 PCMDI 发布的总共 23 个模式提供的全球气候模式整合后的气温模拟结果,分辨率达到 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。上述四种排放情形的模拟输出结果标记为 A1B、A2、B2 和 CMIP5。Hadley-PRECIS 模式(简记为 Hadley 模式)模拟的逐月气温可达到 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 的空间分辨率,从 Hadley 模式经纬网格点模拟输出结果中选取了根河及其附近地区 73 个网格点,这些网格点的模拟气温平均值代表该区域的气温(见图 1a);从 CMIP5 模式网格点中选取 91 个格点进行模拟,模拟输出的平均气温作为 CMIP5 对根河及附近地区的区域气温(见图 1b)图中星号为树轮采样点位置。

利用根河及其附近地区过去 50 a(1961—2010 年)9—10 月份气温观测数据与模拟数据进行比较,对数值模式的模拟偏差做订正处理,以获得未来时段更为准确的模拟气温。

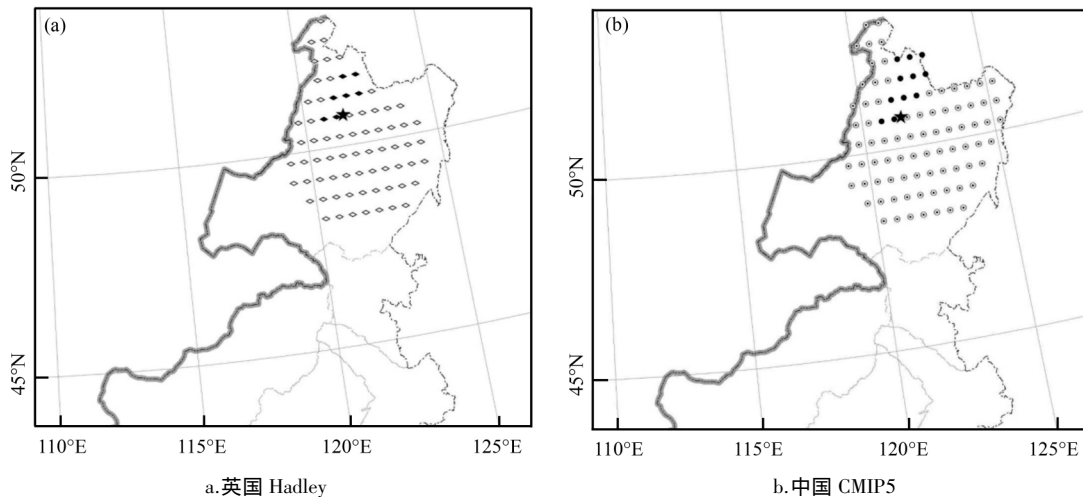


图 1 数值模式在根河附近地区的格点分布

将 1961—2010 年作为校准期,用气温观测数据和模式模拟数据序列的均值差异,对 2011—2040 年模拟气温给予订正,计算式为:

$$R_y = M_y + \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N G_i - \sum_{i=1}^N M_i \right) \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

其中: y 为被订正年份, $N=50$ 为样本数(1961—2010 年), R_y 为第 y 年订正后的模拟气温, M_y 和 M_i 分别是第 y 年和第 i 年的模拟气温, G_i 是第 i 年观测气温。

树木采样:采集根河地区 35 棵兴安落叶松胸径

处截取圆盘样本, 经过烘干、刨平、砂纸打磨和抛光, 用高分辨扫描仪(Cano Scan LiDE 600F)对树轮样本逐一扫描, 扫描分辨率为 300 dpi, 存储扫描图像用于建立标准化年表。其中 30 棵(胸径小于 45 cm)树在胸径处取 2 个树盘, 每个圆盘又分南、北方向各 2 个样本, 共 120 个样本; 再从剩余的 5 棵(胸径大于 45 cm)树, 分别从南、北方向钻芯取样 2 个, 共 10 个样本。通过筛选最终选定 80 个圆盘样本和 2 个树芯样本。82 个样本来自 30 棵树。

使用测量树木生长轮的软硬件系统为 WinD-
ENDROTM、COFECHA^[19-21]和 ARSTAN^[22], 运用系统测量树木生长轮并建立根河地区兴安落叶松的标准化年表。对 82 个生长轮初选样本使用 WinDEN-
DROTM 作交叉定年, 获得生长轮宽度, 测量精度为 0.01 mm; 用 COFECHA 分析程序对交叉定年做质量控制, 检查存在的定年错误, 并返回 WinDENDROTM 重新检查出错生长轮点进行纠正, 直至 COFECHA 检测结果无误为止。COFECHA 检测交叉定年输出结果获得所有样本最长时间序列长度为 135 a, 主序列长度定为 135 a。此外, 剔除了年代过短、与主序列一致性不好或与主序列相关系数较低、生长异常(有奇异点), 经过多次 COFECHA 检测, 最终选定 40 个样本(来自 16 棵树)作为建立标准化年表样本集。同时, 利用 ARSTAN 程序对通过了 COFECHA 质量控制的生长轮宽度序列建立标准化年表(STD)运行 ARSTAN 时, 树木曲线趋势拟合方法选择了双递减趋势选项。COFECHA 输出结果显示的质量控制统计指标, 显示树木株数和样本序列个数均满足建立标准化树轮年表的基本要求^[23]。

3 结果与分析

3.1 兴安落叶松年表统计特征

由表 1 可知, 兴安落叶松一阶自相关系数在 0.5 以上, 前一年的生长对当年树木生长的影响很大; 平均敏感度值为 0.178, 落叶松对该地区气候变化反应敏感; 信噪比、第一主成分的方差、样本总代表性较大, 分别为 19.31、43.61、0.951, 表明林木生长较多环境影响因素受气候变化的影响。

表 1 根河地区兴安落叶松标准化年表(STD)的统计特征

项 目	统计值
主序列	1876—2010(135a)
平均敏感度	0.178
信噪比	19.314
序列均方差	0.232
一阶自相关系数	0.553
第一主成分解释的方差/%	43.615
样本总代表性	0.951

由表 2 可知, 近 50 年来的气候条件对研究区兴安落叶松径生长的影响以及树木生长对未来气候变化的响应, 1961 年以来的标准化生长轮宽度出现 3 次小高峰。

表 2 大兴安岭根河地区兴安落叶松标准化生长轮(1961—2010 年)

年份	生长轮/mm	年份	生长轮/mm
1961	1.15	1986	0.61
1962	1.09	1987	0.77
1963	1.01	1988	0.85
1964	0.99	1989	0.89
1965	0.94	1990	0.56
1966	1.01	1991	0.89
1967	0.69	1992	0.84
1968	0.92	1993	0.86
1969	1.14	1994	0.88
1970	0.96	1995	0.83
1971	0.65	1996	1.12
1972	0.84	1997	0.99
1973	0.83	1998	0.89
1974	1.37	1999	1.09
1975	0.96	2000	0.89
1976	1.13	2001	0.95
1977	1.04	2002	0.95
1978	1.11	2003	1.02
1979	0.99	2004	0.78
1980	1.21	2005	1.05
1981	1.31	2006	1.05
1982	1.10	2007	0.89
1983	1.06	2008	0.98
1984	1.10	2009	1.37
1985	0.82	2010	1.29

3.2 兴安落叶松生长与气温和前期深层地温的关系

兴安落叶松径向生长对温度变化的响应敏感, 生长轮宽度对整个年平均气温和后冬 2—3 月气温呈负相关关系, 相关系数分别达到 -0.28 和 -0.33 ($P < 0.05$)。一年中影响生长轮宽度最为显著的是冬季来临之前 9—10 月气温, 相关系数为 -0.35 ($P < 0.01$)。这一时段气温越高, 对兴安落叶松形成较宽生长轮越不利, 生长轮曲线和 9—10 月气温曲线呈现相反趋势(见图 2a)。

相关分析指出, 前一年生长季(5—9 月)的深层地温是影响来年兴安落叶松生长的显著影响因子, 研究区兴安落叶松生长轮宽度对前一年生长季地面以下 40 cm、80 cm 地温呈现正响应, 表明前一年生长季深层地温偏高有利于树木在来年形成较宽生长轮(见表 3)。生长轮曲线与前一年 40 cm 和 80 cm 深层地温曲线及趋势曲线呈现相同的变化趋势(见图 2b、图 2c)。

表 3 生长轮宽度与前期根河及附近区域 5—9 月份深层地温的关系

深度/cm	根河本站	根河附近地区
40	0.457	0.530
80	0.402	0.541

注: 结果均在 0.01 置信区间上显著。

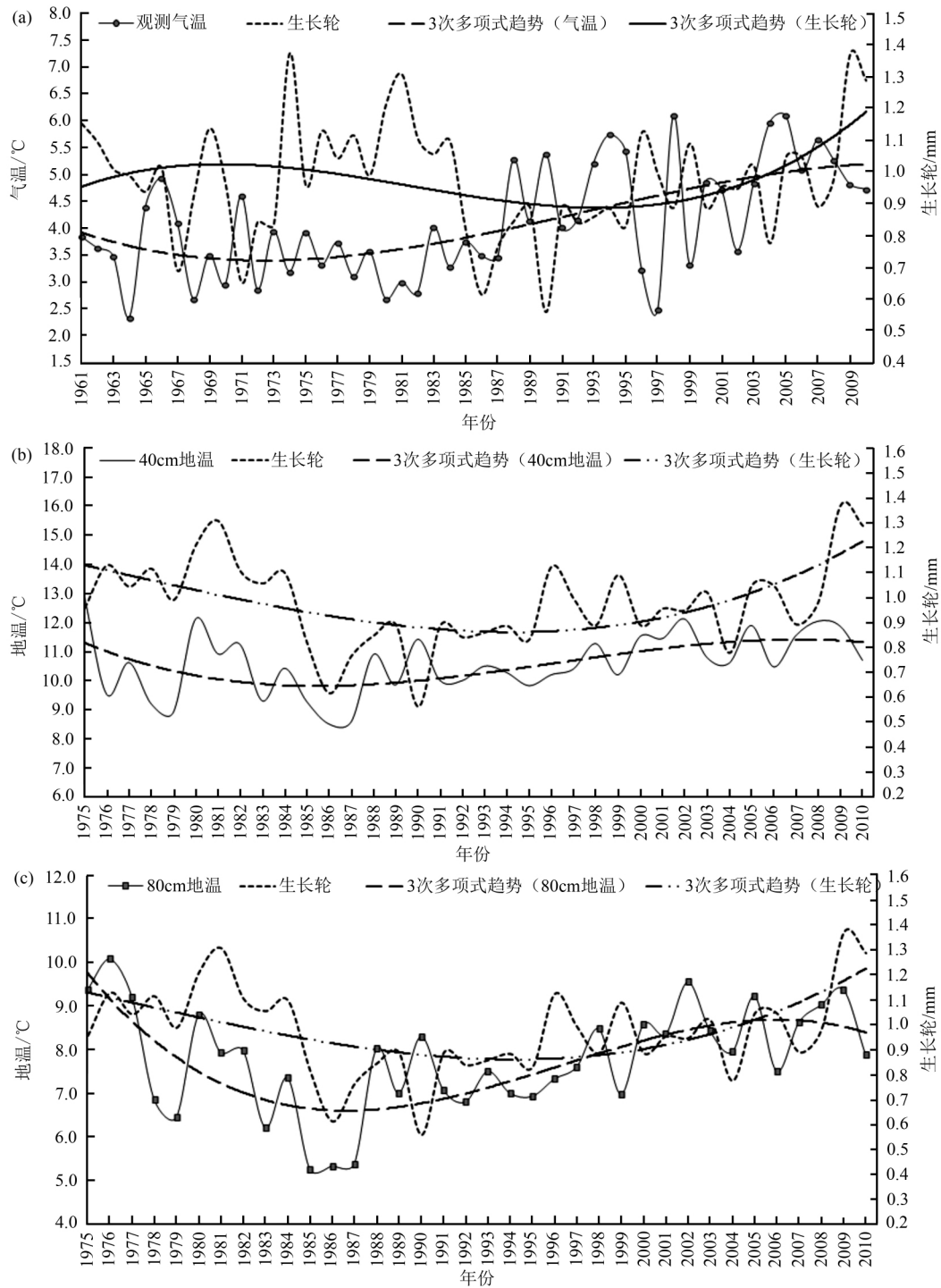


图2 根河地区9—10月气温、前一年5—9月深层地温和兴安落叶松生长轮变化趋势

3.3 兴安落叶松生长对未来温度变化的响应

由表4可知,A1B的模拟气温比实际观测气温偏低(正订正值),而A2、B2和CMIP5的模拟气温与观测气温相比均偏高(负订正值)。4种模拟气温相比,A1B和CMIP5对9—10月气温的模拟结果偏差最小,分别是0.446℃和-0.447℃。B2对9—10月气温的模拟偏差最大,订正值是-3.252℃。

由表5看出,过去50a 9—10月份气温观测值的年代际均值变化可以确定根河及其附近地区年平均气温在不断上升,50a间年气温上升了1.74℃。在年代际和年平均气温不断上升的气候背景下,9—

10月份平均气温也在同步上升,过去50a增温1.49℃。订正后4种排放情形模拟的平均未来30a该地区年气温预计上升1.01℃,9—10月份气温预计增加1.20℃左右。

表4 2011—2040年根河地区9—10月份模拟气温

模拟方法	平均气温	订正值
A1B	3.646	0.446
A2	7.228	-3.136
B2	7.348	-3.252
CMIP5	4.539	-0.447
1961—2010年观测值	4.092	—

从图3看出,经过订正后根河及其附近地区

2011—2040 年 9—10 月份气温预估序列曲线显示, 气温在未来预设的 4 种排放情形下均呈波动上升趋势, 增温最大的是 Hadley 模式的 A2 排放情形, 线性

趋势的斜率为 0.102; 增温幅度最小的是 CIMP5 模式的模拟结果, 线性趋势线的斜率为 0.0209。

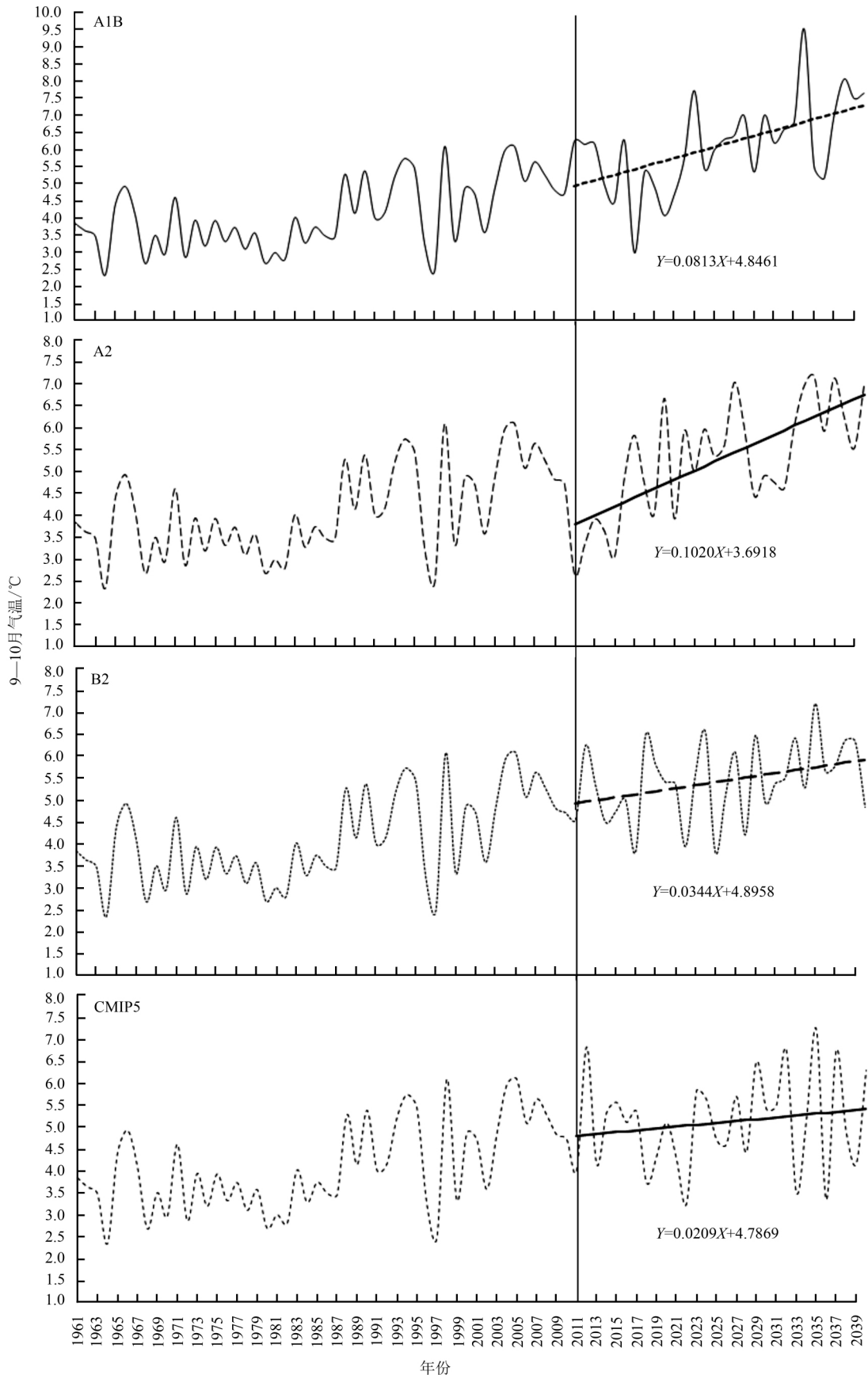


图 3 根河地区 1961—2010 年 9—10 月份气温变化和模拟曲线(2011—2040 年)

从观测时段和模拟时段温度曲线的连续走势, A1B、B2 和 CMIP5 前后上升趋势衔接和缓,并未见存在突变,而 A2 排放情形下的气温模拟曲线与观测时段的曲线变化相比,在观测与模拟时段的衔接点处可以看出明显的突变,说明即使对模拟气温做了订正处理, A2 情形的模拟效果也不如其他 3 种情形下的模拟效果理想。

从图 4 看出,观测时段序列曲线与模拟时段序列曲线衔接缓和,同时模拟时段的趋势线斜率为 0.06,观测时段趋势线斜率是 0.04,说明模拟时段与观测时段的变化趋势相差很小,前后时段不存在突变,订正后的模拟效果比较好。平均后的模拟气温变化幅度较观测时段变小,原因是 4 种排放情形的模拟气温做了平均处理。

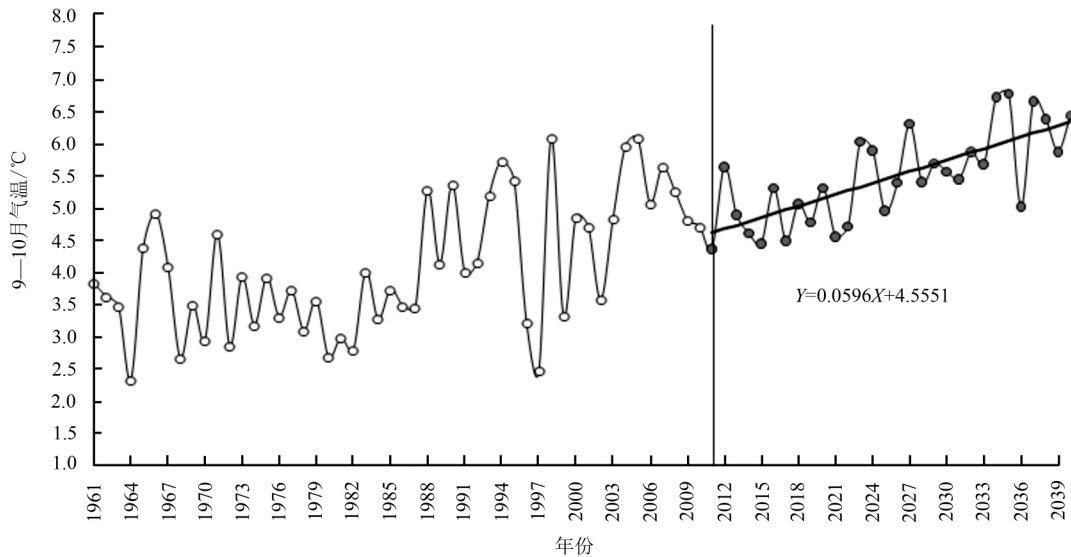


图 4 根河地区 9—10 月气温变化(1961—2010 年)和数值模拟 4 种排放情形平均曲线(2011—2040 年)

从图 5 可看出,9—10 月份气温的上升, A1B、A2、B2、CMIP5 情形下,树木生长轮宽度均显现不同程度下降趋势,这与生长轮宽度与对应时段气温之间存在的负关联一致。4 种排放情形下对兴安落叶松生长轮宽度的预估曲线的趋势线显示, A2 情形下生长轮宽度下降趋势最快,趋势线斜率为 -0.005 , CMIP5 情形下趋势线斜率是 -0.001 ,生长轮宽度下降较缓。

从图 6 看出,在 9—10 月增温条件下兴安落叶松生长轮宽度减小,表示增温对根河地区兴安落叶松的生长产生不利影响。

4 结论与讨论

兴安落叶松径向生长对温度变化的响应比较敏感,生长期温度偏低对兴安落叶松径生长起有利作用。生长轮宽度对整个年平均气温和后冬 2—3 月气温呈负相关关系,相关系数分别达到 -0.28 和 $-0.$

表 5 1961—2040 年根河地区 9—10 月份气温年代平均值

年代	模拟方法	平均气温/°C
1961—1970	—	3.585
1971—1980	—	3.494
1981—1990	—	3.858
1991—2000	—	4.454
2001—2010	—	5.071
2011—2020	A1B	5.161
	A2	4.273
	B2	5.194
	CMIP5	4.949
2021—2030	A1B	6.192
	A2	5.416
	B2	5.210
	CMIP5	5.028
2031—2040	A1B	6.994
	A2	6.129
	B2	5.886
	CMIP5	5.354

注: 1961—2010 年为观测值, 2011—2040 年为模拟值。

33 ($P < 0.05$)。一年中影响生长轮宽度最为显著的是冬季来临之前 9—10 月气温,相关系数为 -0.35 ($P < 0.01$)。这一时段气温越高,对兴安落叶松形成较宽生长轮越不利,生长轮曲线和 9—10 月气温曲线呈现相反趋势。王丽丽等^[23]的研究结果显示兴安落叶松生长轮宽度和早材宽度与生长季前的气温呈负相关,并指出是由于树木冬季呼吸对养分的消耗所引起,冬季气温偏低时抑制了树木呼吸,使得养分被有效地用于径向细胞的形成与生长,造成随后较宽的生长轮。本文分析得出结论与其研究结论一致。

兴安落叶松生长轮宽度影响的关键时段为树木生长季末期 9—10 月,该时段地温偏高对来年兴安落叶松径生长有利。生长季(5—9 月)的地温是影响来年兴安落叶松生长的显著影响因子,根河地区兴安落叶松生长轮宽度对前一年生长季地面以下 40、80 cm 地温呈现正响应,表明前一年生长季深层

地温偏高有利于树木在来年形成较宽生长轮。兴安落叶松能够在较短的生长季完成其生长周期,冬季落叶的特性使其具有非凡的抗寒能力^[23],本研究对

根河地区兴安落叶松生长轮宽度的分析结论也说明了该树种耐严寒的优良特性。

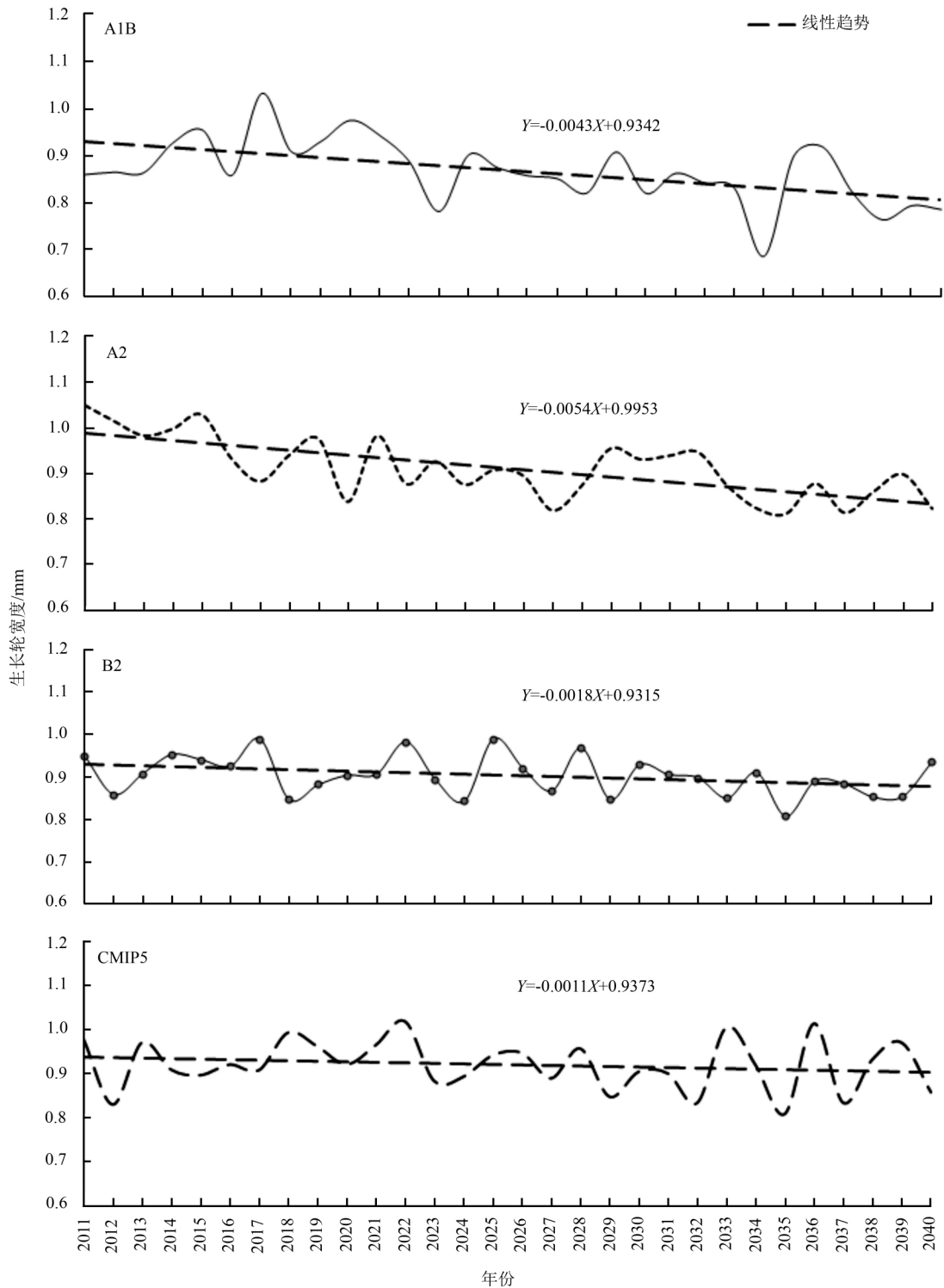


图 5 4 种排放情形下预估 2011—2040 年兴安落叶松生长轮变化曲线及趋势

研究区及其附近地区年平均气温在过去 50 a 呈波动上升趋势。在年代际和年平均气温不断上升的气候背景下,9—10 月份平均气温也在同步上升,过去 50 a 增温数值为 1.49 °C。订正后 4 种排放情形模拟未来 30 a 该地区年平均气温预计上升 1.01

°C,9—10 月份气温预计增加 1.20 °C 左右。2011—2040 年 9—10 月份气温预估曲线显示,气温在未来预设的 4 种排放情形下均呈波动上升趋势。从观测时段和模拟时段温度曲线的连续走势看,A1B、B2 和 CMIP5 前后上升趋势衔接缓和,不存在突变;A2

排放情形下的气温模拟曲线与观测时段的曲线变化相比,在观测与模拟时段的衔接点处可以看出明显的突变。未来30a(2011—2040年)9—10月平均气温模拟时段序列曲线与观测时段序列曲线衔接缓和,模拟时段的趋势线斜率为0.06,观测时段趋势线斜率是0.04,模拟时段与观测时段的变化趋势相差很小,前后时段不存在突变,订正后的模拟效果比较

好。在A1B、A2、B2、CM1P5情形下,随着9—10月份气温的上升,树轮宽度均显现不同程度下降趋势,与生长轮宽度与该时段气温之间存在的负相关。9—10月份增温条件下,兴安落叶松生长轮宽度减小,未来增温对研究区兴安落叶松的生长产生不利影响。

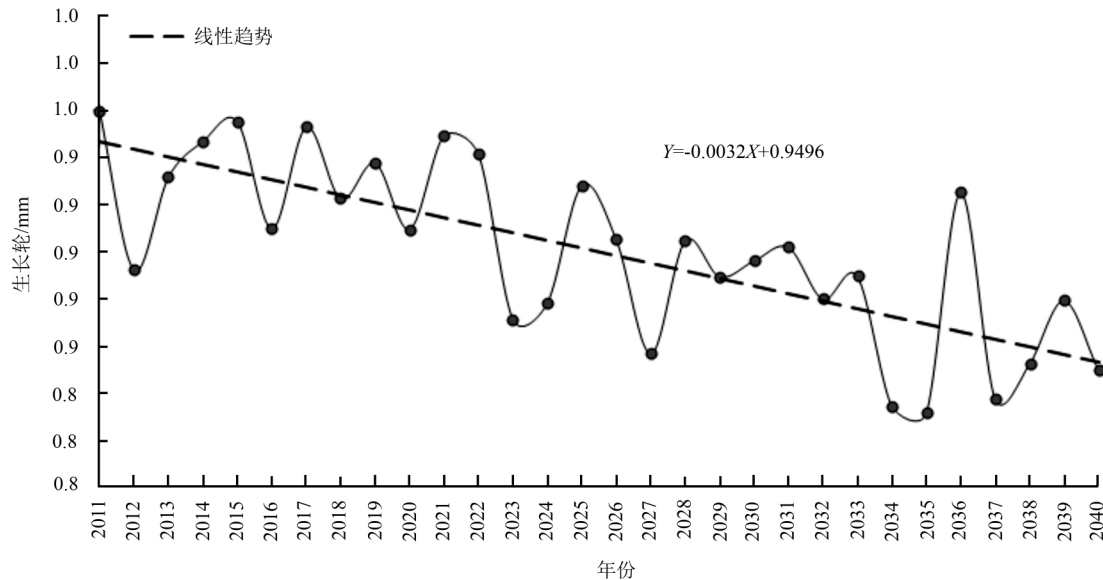


图6 模拟9—10月气温变化条件下2011—2040年根河地区兴安落叶松4种排放情景平均生长轮长趋势预估

参 考 文 献

- [1] 周璋,李意德,林明献,等.1980—2005年海南岛尖峰岭热带山地雨林区气候突变与异常的初步研究[J].气象与环境学报,2009,25(3):66-72.
- [2] 贺庆棠.中国森林气象学[M].北京:中国林业出版社,2000.
- [3] 周广胜,张新时.植被对于气候的反馈作用[J].植物学报,1996,38(1):1-7.
- [4] 周广胜,王玉辉.全球生态学[M].北京:气象出版社,2003:82-153.
- [5] 刘国华,傅伯杰.全球气候变化对森林生态系统的影响[J].自然资源学报,2001,16(1):71-78.
- [6] 吴定祥.树木生长轮分析在环境变化研究中的应用[J].第四纪研究,1990(2):188-196.
- [7] FRITTS H C. Tree rings and climate [M]. London: Academic Press, 1976.
- [8] COOK E R. A time series analysis approach to the tree ring standardization [D]. Arizona: The University of Arizona, 1985.
- [9] TOUCHAN R, ÜNAL AKKEMIK, HUGHES M K, et al. May-June precipitation reconstruction of southwestern Anatolia, Turkey during the last 900 years from tree rings [J]. Quaternary Research, 2007, 68(2): 196-202.
- [10] COOK E R. Temperature histories from tree rings and corals [J]. Climate Dynamics, 1995, 11(4): 211-222.
- [11] 吴祥定,邵雪梅.中国树木生长轮气候学研究动态与展望[J].地球科学进展,1993,8(6):31-35.
- [12] 王婷,于丹,李江风,等.树木生长轮宽度与气候变化关系研究进展[J].植物生态学报,2003,27(1):23-33.
- [13] 康永祥,刘婧辉,代拴发,等.太白山不同海拔太白红杉生长轮生长对气候变化的响应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(12):141-147.
- [14] 梁尔源,邵雪梅,刘鸿雁,等.树轮所记录的公元1842年以来内蒙古东部浑善达克沙地PDSI的变化[J].科学通报,2007,52(14):1694-1699.
- [15] 康兴成,程国栋,康尔泗,等.利用树轮资料重建黑河近千年来出山口径流量[J].中国科学(D辑),2002,32(8):675-685.
- [16] 张先亮,崔明星,马艳军,等.大兴安岭库都尔地区兴安落叶松生长轮宽度年表及其气候变化的关系[J].应用生态学报,2010,21(10):2501-2507.
- [17] 刘欣,刘滨辉.大兴安岭不同坡向兴安落叶松径向生长对气候变化的响应[J].东北林业大学学报,2014,42(12):13-17.
- [18] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43(8): 69-78.
- [19] GRISSINO-MAYER H D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA [J]. Tree-Ring Research, 2001, 57(2): 205-221.
- [20] 何海.使用WinDENDRO测量树轮宽度及交叉定年方法[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2005,22(4):39-44.
- [21] COOK E R, HOLMES R L. Users manual for program AR-STAN [C]//Holmes R L, Adams R K, Fritts H C. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon, and northern Great Basin. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona, 1986: 50-56.
- [22] 高涛.大气环流和海温变化对兴安落叶松生长的气候影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- [23] 王丽丽,邵雪梅,黄磊,等.黑龙江漠河兴安落叶松与樟子松树轮生长特性及其对气候的响应[J].植物生态学报,2005,29(3):380-385.