

小兴安岭低山区红松生长的气候响应机制

尹 红^{1,2,*}, 刘洪滨^{1,*}, 郭品文², Hans Linderholm³

(1. 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044;

3. 瑞典哥德堡大学地球科学系, 哥德堡 SE-405 30)

摘要: 基于小兴安岭红松的树轮资料, 确定了 Tree-Ring 生态机理模型模拟红松树木生长的参数。应用 Tree-Ring 模型对小兴安岭红松的生长过程进行了模拟, 结果显示 Tree-Ring 模型在该地具有较好的适用性。参数敏感性分析表明红松树木生长比较敏感的参数是光合最低温度、光合最适温度下限、最适土壤体积含水率上限和最大土壤体积含水率。模拟发现, 红松树轮宽度变化主要受到生长季上一年 10 月份气温和当年 4 月份气温变化控制。形成层开始生长平均是在 4 月下旬, 这时水分充足, 而温度在光合最低温度和最适温度下限之间, 温度愈高, 光合速率愈大, 储存的养料愈多, 因此表现为与树轮宽度的正相关关系。形成层生长结束的时间平均在 10 月上旬, 用于形成层细胞生长的光合产物的消耗减少, 而光合速率随着温度的升高而增大, 因此, 10 月份的气温越高为下一年储存的养料越多, 翌年易形成宽轮。

关键词: 小兴安岭; 红松; 树轮; 气候响应

文章编号: 1000-0933(2009)12-6333-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

An analysis on the climatic response mechanism of the growth of *Pinus koraiensis* in the lower mountains of XiaoXing'AnLing

YIN Hong^{1,2,*}, LIU Hong-Bin^{1,*}, GUO Pin-Wen², Hans Linderholm³

1 Laboratory for Climate Study, CMA, Beijing 100081, China

2 School of Atmosphere Sciences, NU IST, Nanjing 210044, China

3 Regional Climate Group, Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, SE-405 30 Gothenburg, Sweden

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6333 ~ 6341.

Abstract: Tree-Ring width data may reflect a nonlinear response to multivariate climate forcing. Thus, statistical relationships which may represent linearization of nonlinear processes are difficult to validate outside the instrumental era. Moreover, traditional statistical techniques are inadequate when describing tree-growth responses to climate on cellular level. In this paper, we use the *Tree-Ring* model to simulate climatic response of *Pinus koraiensis* in the lower mountains of XiaoXing'AnLing.

A comparison between simulated and measured Tree-Ring series shows that the *Tree-Ring* model could model the *Pinus* tree-growth accurately. Sensitivity analysis indicated that the Tree-Ring growth is sensitive to minimum temperature for photosynthesis, lower optimal temperature for photosynthesis, upper optimal volumetric water content and maximum volumetric water content. Furthermore, the simulation results indicated that variations in Tree-Ring width are mainly controlled by October temperatures of the year prior to growth and April temperatures of the growth year. Cambium growth begins in the last ten-day of April when there is enough water, but temperatures are low in XiaoXing'AnLing, and cambium growth ends in the first ten-day of October, but temperatures of October are between Lower optimal and minimum temperature for photosynthesis, where the photosynthesis speed rate increases at higher temperature. Thus, the higher October temperature, the more is food storage, and the wider is the ring of the next year.

基金项目: 国家林业公益行业科研专项资助项目(200804001); 国家气象公益行业科研专项资助项目(GYHY200806010); 国家自然科学基金资助项目(40705032)

收稿日期: 2008-08-19; 修订日期: 2009-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinh@cma.gov.cn; liuhb99@cma.gov.cn

Key Words: XiaoXing'AnLing; *Pinus koraiensis*; tree rings; climatic response

树木年轮资料以其定年准确、连续性强和分辨率高等优点,在历史时期的气候变化研究中得到了广泛的应用。由于树木生长受到气候等环境因素的制约,会对周围环境的气候变化做出响应,这种响应反映了温度、降水和光照等多种因素对树木生长的共同影响。气候学家对过去气候的重建,突出了单一因子对树木生长的影响,主要考虑了对树木生长限制性最强的因子的影响,如在中国干旱、半干旱地区,水分一般是树木生长的主要限制因子,该地区主要以恢复历史时期的降水变化为主^[1-4];在高纬度和高海拔地区,温度一般是树木生长的主要限制因子,该地区主要用于恢复历史时期的温度变化^[5-9]。重建多采用的是线性回归方法,即通过树轮指标序列与气候要素之间的相关分析,利用回归方法建立转换函数,将树轮指标序列转化为气候要素序列,来恢复历史时期的气候变化。线性回归方法假定树木生长和气候因子之间为线性关系,偏向对气候变化的定性分析,而实际上树木对气候的响应是一种物理的和生理的非线性关系。统计意义上的相关可能是一种间接的相关,是否具有明确的生理意义,需要从机理方面分析。利用树木生态机理模型可以从树木生长机理方面入手,同时考虑多个气候因子,如:温度、降水、光照等来建立树木的生长过程,允许不同时期有不同的生长限制因子,从定量角度予以讨论^[10]。

树木生态机理模型自建立起来得到了不断更新^[10],其中 Tree-Ring 生态机理模型是目前发展的模拟树木生长比较完善的模型,模型不但可以对树木形成层细胞分裂活动随气候因子的变化进行模拟,对树木的根、叶生长也具有一定的模拟能力。另外,该模型具有比较广泛的应用,可以对树木的伪轮形成进行模拟分析^[11];对北美和俄罗斯的 100 多个树轮模拟也取得了较好的效果^[12]。此外模型在研究大气中同位素变化^[13],地下水的污染方面也具有应用潜力^[14]。

最近 10 多年来国内学者对树轮模型进行了一些应用研究,如尹训钢等^[15]对华山松的生长进行了模拟,史江峰等^[16,17]对贺兰山油松生长进行了模拟,李雁等^[18]对柴达木东缘青海云杉进行了模拟,都达到了较好的模拟效果,然而,上述研究中降水都是树木生长的突出限制因子,对树木生长受温度变化潜在响应的地区,例如小兴安岭地区还未开展研究树木生长对气候响应的模拟工作。

目前,利用统计方法在小兴安岭地区已经开展了一些树轮气候学研究^[19,20],本文就是在这些研究的基础上,采用 Tree-Ring 生态机理模型,对小兴安岭红松树种对气候的响应机制进行模拟分析,为该地区的树轮气候学研究提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用树轮资料为小兴安岭红松(*Pinus koraiensis*),采样点(48°14'N,129°12'E,海拔 360m~460m)位于小兴安岭南部丰林自然保护区(FL),该区地带性植被为温带针阔叶混交林,主要森林类型有红松林、云冷杉林和落叶松林,其中红松林是保护区的优势树种,蓄积量占全区总蓄积的 2/3,并且基本保持着原始状态,未受人类的影响,树木之间的郁闭度大约在 0.4 左右。样本的采集时间是 2006 年 9 月,共采集了 21 棵树 42 个样芯,为了均匀反映气候特征,样本多采自生长条件均一的地区。将采集的样本带回实验室后,按照树木年轮样本的基本处理程序^[21]将样芯经过干燥、固定、磨平打光和交叉定年等基本处理,剔除奇异点过多和与主序列相关较差的样本,并进行了轮宽量测和细胞特征值量测,再用 ARSTAN^[21]程序建立标准化年表,年表的平均敏感度为 0.132^[20]。从采回的样本中随机选取了 9 棵树的 18 个样芯作为本研究的分析样本。

气象资料为伊春气象站(47°73'N,128°92'E,海拔 240.9m)的逐日平均气温、最低气温、最高气温和日降水量。该地区降水量集中在 6~8 月份,在 1958~1998 年时段,年降水量在 450~1000mm 之间,6~8 月份降水在 230~700mm 之间,约占全年降水量的 65%。年平均气温在 1℃左右,其中 1~3 月、11 月和 12 月份平均气温都在 0℃以下,5 月到 9 月份平均气温一般大于 10℃以上(图 1)。气温和降水资料的逐年的一阶自相关分析结果表明,在 0.01 的检验水平上,各月气候资料在年际间没有显著的滞后影响。

1.2 方法

1.2.1 细胞量测

模型计算以每年的年轮中细胞大小和细胞数目为基础。细胞量测时,对每年年轮从当年的晚材与下一年早材的交界线开始,向早材方向逐个量测细胞,为了均匀的反映树木生长的状况,对每年的树木年轮沿径向随机选取大体平行的 5 条线,测量每行细胞的大小及每年的细胞数目。按照以上步骤,由样本的最后一年开始量测,直到起始年。由于量测的 5 个细胞序列数目不等,需引入标准化过程,使其细胞数目统一到一定水平,而不改变与生长季不同时期的对应关系。标准化方法具体过程如下^[23]:

设细胞大小序列为 $\{d_i\}$, $i=1,2,\dots,N$,将不同重复的细胞特征标准化到同一水平 ε ,因此原始序列转化为 $\{d_i^*\}$, $i=1,2,\dots,K$, $K=\varepsilon \times N$,此时的序列为:

$$\{d_i^*\} = \frac{d_i, \dots, d_1}{\varepsilon}, \frac{d_2, \dots, d_2}{\varepsilon}, \dots, \frac{d_N, \dots, d_N}{\varepsilon}$$

在 $\{d_i^*\}$ 序列中,第 $[(i-1) \times n + 1]$ 到 $i \times n$ 共 n 个值均为 d_i , $i=1,2,\dots,n$ 。其中

$$d_i^* = \left(\sum_{j=N(j-1)+1}^{N_i} d_i^* \right) \cdot \frac{1}{N}$$

式中, $i=1,\dots,\varepsilon$ 。

1.2.2 Tree-Ring 模型简介

Tree-Ring 生态机理模型主要是描述树木形成层生长过程的模型^[10],模型由 4 个大模块组成:微气候因子模块、土壤水分平衡模块、光合和呼吸模块和生长模块。几个模块相互耦合,其中微气候因子模块是将气候资料转化为直接影响树木生长机理过程的值:空气水汽压差、太阳辐射等;土壤水分平衡模块是通过大气降水、地表径流、树木的水分蒸散来描述土壤水分平衡状况;光合和呼吸模块中,模拟了日光合作用,光合产物在根、茎、叶中分配用于各组织的生长和维持呼吸作用所消耗的能量;生长模块是整个模块的核心,包括叶的生长,根的生长和茎形成层细胞的分裂、伸长和细胞壁的加厚成熟过程。模型是建立在限制性因子原理的基础上的^[11],先前环境的影响以光合产物储存的方式被考虑^[24]。研究认为细胞的分裂速率决定了最终木质部中的细胞个数,并且细胞的分裂速率同时受光照、温度和土壤含水率的影响^[10]。细胞个数与轮宽成正比,相关系数为 0.96,所以模型在拟合中用细胞个数来表示树轮宽度指标。细胞的分裂速率表示为:

$$V(j,t) = V_0(j) \cdot F(t) \quad (1)$$

式中, j 为细胞列上相对与形成层原始细胞的位置, $V_0(j)$ 是与细胞位置 j 有关的生长速率。 $F(t)$ 为模型中假设土壤因素在树木生长过程中保持恒定,树木的生长由光合产物含量、温度和树木的水分平衡状态 3 个因素控制的相对生长速率。

树木的日相对生长速率表示为:

$$F(t) = f(S) \cdot f(T) \cdot f(W) \quad (2)$$

式中, $f(S)$ 、 $f(T)$ 和 $f(W)$ 为假定其他因子不构成树木生长限制因子的情况下,由光合产物含量、温度和土壤体积含水率独立控制的生长速率。

(1) 树木生长对温度的响应

树木生长对温度响应 $f(T)$ 表示为:

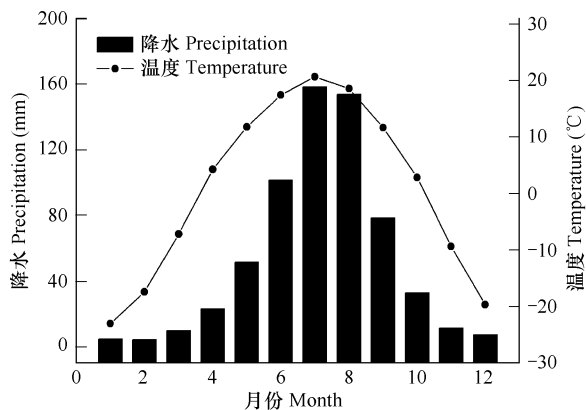


图1 伊春各月月降水量和月平均气温(1958~1998年)

Fig. 1 Monthly precipitation and mean temperature in Yichun from 1958 to 1998

$$f(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{\min} \\ (T - T_{\min}) / (T_1 - T_{\min}), & T_{\min} \leq T < T_{\text{opt1}} \\ 1, & T_{\text{opt1}} \leq T < T_{\text{opt2}} \\ (T_{\max} - T) / (T_{\max} - T_2), & T_{\text{opt2}} \leq T < T_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

在模型中,当某一段时间的温度和达到一定值时,树木才开始生长^[25]。树木生长对温度的响应 $f(T)$ 为一段函数,当气温 $T < T_{\min}$ (最低生长温度)时,树木不生长;当 $T_{\min} \leq T < T_{\text{opt1}}$ (最适生长温度下限)时,生长随温度升高线性增加;当 $T_{\text{opt1}} \leq T \leq T_{\text{opt2}}$ (最适生长温度上限)时,生长最快,树木生长对温度的响应函数为一常数;当 $T_{\text{opt2}} < T \leq T_{\max}$ (最高生长温度),生长速率为线性下降趋势。

(2) 树木生长对土壤体积含水率的响应

树木生长对土壤体积含水率的响应 $f(W)$ 类似于对温度的响应,也用分段函数表示,其4个参数 $sm1$, $sm2$, $sm3$ 和 $sm4$ 类似于温度指标的 $T_{\min}$, T_{opt1} , T_{opt2} 和 $T_{\max}$ 。

土壤中每日含水量的变化 ΔW 用土壤水动态平衡方程表示:

$$\Delta W = f(P) - E_v - Q \quad (4)$$

式中, $f(P)$ 为日降水量的函数; E_v 为日蒸腾量; Q 为土壤中水的日径流量。

$f(P)$ 表示为:

$$f(P) = \min[k_1 \times P, P_{\max}] \quad (5)$$

式中, P 为实际的日降水量; k_1 为降水渗透到土壤中的系数; $P_{\max}$ 为使土壤饱和的日最大降水量。

叶片潜在的日蒸腾量 E_v^P 表示为:

$$E_v^P = \frac{\delta p}{R_{\min}} \quad (6)$$

式中, δp 为水汽压差, $R_{\min}$ 为叶片的最小气孔阻力。气孔阻力 R 为:

$$R = R_{\min} \max\left(1.0, \frac{E_v^P}{J_{\max}}\right) \quad (7)$$

式中, E_v^P 为叶片潜在的日蒸腾量, $J_{\max}$ 为叶片最大吸水量。

叶片实际日蒸腾量 E_v 表示为:

$$E_v = \frac{R_{\min}}{R} E_v^P \quad (8)$$

(3) 光合产物含量对树木生长的影响

光合产物含量对树木生长的影响 $f(S)$ 表示为:

$$f(S) = \frac{S}{S + S^*} \quad (9)$$

式中, S 为茎中光合产物含量, S^* 为 Michaelis-Menten 常数。

1.2.3 模型参数确定

模型参数的确定常采用两种方法,一是应用足够的关于采样点的实验数据,如植物根深,光合最适温度等,这样就可以在计算前先确定好各个参数,直接输入模型进行模拟,二是根据对采样点的描述和部分实验数据,先对各个参数给定一个近似的经验值,或者确定此经验值的一个范围,用此近似值进行模拟,再与实际的树轮宽度年表对比。本次实验主要采用了第二种方法,并参照了一些文献,如:红松属于温带冬季落叶乔木,在自然的二氧化碳浓度和光饱和条件下,温带冬季落叶乔木,光合最低温度 $-3 \sim -1^\circ\text{C}$,最适温度 $15 \sim 25^\circ\text{C}$,最高温度 $40 \sim 45^\circ\text{C}$ ^[26];田间持水量的参数设定根据参考文献^[27]。降水渗透到土壤中的系数 K 的大小与树木生长地区的坡度、植被覆盖状况等有关系,坡度大、植被覆盖较稀的地方,土壤对降水的吸收较少,平坦、植被覆盖密的地方,土壤对降水的吸收较多。青海云杉采样点植被覆盖密集, K 取值为 0.95 ^[18],小兴安岭采样点

地形平缓,地面有植被覆盖,但并不十分密集, K 取值略小为 0.89。土壤含水率参数的设定,根据参考文献^[28]。主要参数见表 1。

表 1 丰林点红松树轮模型参数
Table 1 The model parameters of Pinus koraiensis in Fenglin site

参数 Parameters	描述 Description	值 Value
$T_{\min}$	光合最低温度(℃) Minimum temperature for photosynthesis	-1
T_{opt1}	光合最适温度下限(℃) Lower optimal temperature for photosynthesis	15
T_{opt2}	光合最适温度上限(℃) Upper optimal temperature for photosynthesis	25
$T_{\max}$	光合最高温度(℃) Maximum temperature for photosynthesis	40
$sm1$	土壤萎蔫点 Wilted point	0.03
$sm2$	最适土壤体积分含水率下限 Lower optimal volumetric water content for growth	0.12
$sm3$	最适土壤体积分含水率上限 Upper optimal volumetric water content for growth	0.22
$sm4$	最大土壤体积分含水率 Maximum volumetric water content for growth	0.40
$sm5$	田间持水量 Field capacity	0.29
$sumt$	树木开始生长的一段时间温度总和(℃) The sum of temperature for the beginning of tree growth at time interval Tbeg	60
T_{beg}	计算树木开始生长温度总和的时段(day) The interval to calculate the beginning of tree growth	10
h	植物主要根系深度(m) Root depth	1.1
$P_{\max}$	使土壤达到饱和的日最大进水量(mm) Maximum daily input water to saturate soil	50
K	降水渗入到土壤中系数 Coefficient for water to penetrate soil	0.89

2 结果与分析

2.1 树轮宽度与气候因子的相关关系

在进行模型模拟之前,先对树轮年表对气候的响应在统计上进行分析,用 FL 点的 STD 年表与伊春气象站的上一年 9 月份到当年 10 月份的月平均气温和月降水量做相关分析(表 2),其中与生长季上一年 10 月份温度和当年 4 月份温度为显著正相关。为了更详细的了解气候因子与树轮宽度之间的关系,用逐旬气候资料与轮宽进行相关分析发现,4 月下旬的温度变化与树木宽度相关性为 0.41,与上一年 10 月中旬、下旬温度相关分别为 0.52 和 0.42,均达到了 0.05 显著性水平。

表 2 丰林点标准年表(STD)与伊春月降水和温度相关系数

Table 2 Correlation coefficients between STD chronology of Fenglin and monthly average temperature and precipitation in the Yichun meteorological station

	月份 Month													
	P9	P10	P11	P12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	-0.12	0.50 *	-0.03	-0.02	0.15	0.23	0.15	0.35 *	0.22	0.10	0.12	0.19	-0.17	-0.10
R	0.00	0.26	0.05	0.17	0.06	0.05	0.09	0.13	-0.03	-0.09	0.12	-0.05	-0.11	0.05

* 表示相关系数达到 0.05 显著水平 indicate that correlation coefficient get to 0.05 conspicuous level

2.2 参数敏感性分析

对模型参数进行敏感性分析,其目的是了解模型对主要参数和变量反映的灵敏度,检验模型的结构和模拟的过程是否合理。因为影响树木生长的主要外界气候因子为温度和降水,因此本文对与温度和降水有关的参数进行分析。参数变动值为标准化值的 $\pm 10\%$,其他参数不变的条件下,改变其中 1 个参数,分析红松树木细胞生长的变化程度。

从表 3 可见,红松树木生长比较敏感的参数为光合最低温度,光合最适温度下限,最适土壤含水率下限和最大土壤含水率。由于树木光合作用随温度的响应为一分段函数,当气温低于光合最低温度时,树木无法进

行光合作用;当气温大于光合最低温度时,小于光合最适温度下限时,光合作用线性增加;气温在最适光合温度上下限之间,光合速率最大。因此降低光合最低温度和光合最适温度下限,光合作用会增加,产生的细胞个数增加。因为当地的温度很少会达到光合最适上限温度,所以对光合最适温度上限和光合最高温度参数不敏感。由于树木生长对土壤湿度的响应类似与对温度响应,当地的土壤含水率一年中几乎都大于最适土壤含水率下限值,所以对土壤含水率下限,土壤萎蔫点两个参数不敏感。对模型中敏感性较强的参数的精确确定,是模型模拟准确与否的关键。

表 3 红松树木形成层生长对参数的敏感性

Table 3 Sensitivity of cambium growth of *Pinus koraiensis* to changes in parameters

参数 Parameters	变幅 Variable rate	细胞个数变化率% Variable rate of cell number
光合最低温度(℃)	+10%(加0.1℃)	-1.3
Minimum temperature for photosynthesis	-10%(减0.1℃)	1.0
光合最适温度下限(℃)	+10%(加1.5℃)	-15.2
Lower optimal temperature for photosynthesis	-10%(减1.5℃)	17.2
光合最适温度上限(℃)	+10%(加2.5℃)	0.0
Upper optimal temperature for photosynthesis	-10%(减2.5℃)	0.2
光合最高温度(℃)	+10%(加4℃)	0.8
Maximum temperature for photosynthesis	-10%(减4℃)	0.5
土壤萎蔫点	+10%(加0.003)	0.0
Wilted point	-10%(减0.003)	0.8
最适土壤体积含水率下限	+10%(加0.012)	0.6
Lower optimal volumetric water content for growth	-10%(减0.012)	0.4
最适土壤体积含水率上限	+10%(加0.022)	28.9
Upper optimal volumetric water content for growth	-10%(减0.022)	-30.0
最大土壤体积含水率	+10%(加0.04)	17.6
Maximum volumetric water content for growth	-10%(减0.04)	-33.0

2.3 模拟结果分析

应用表 1 的参数对红松树木进行模拟,模型中定义生长开始为形成层区域细胞被激活,形成层细胞体积开始增大的日期,生长结束的日期为最后一个细胞原生质消逝,进入休眠状态的日期。模拟结果表明,红松树木生长的开始时间范围为第 102 ~ 128 天,平均为第 115 天,大概为 4 月 25 日左右,标准差为 7d;生长结束的时间范围为第 259 ~ 294 天,平均为第 282 天,大概是 10 月 9 日左右,标准差为 8d。树木生育期的模拟与物候观测比较一致^[29]。从图 2 中可以看出,模拟序列和实测序列之间总体变化趋势上基本一致,两序列之间的相关系数为 0.62($n=41, P<0.05$),说明模型在此地具有较好的适用性。此外,红松树轮实测序列的自相关系数为 0.59,模拟序列自相关系数为 0.58,由于模型以光合产物储存的形式考虑了先前环境的影响^[19],所以先前的气候对树木生长的滞后影响也进行了较好模拟。

下面列举了几个模拟较好的,且具有明显宽窄变化的几年分析结果(1971 ~ 1974 年)。图 3a 为每年的温度、降水量、土壤湿度和植物蒸腾量,图 3b 为总生长速

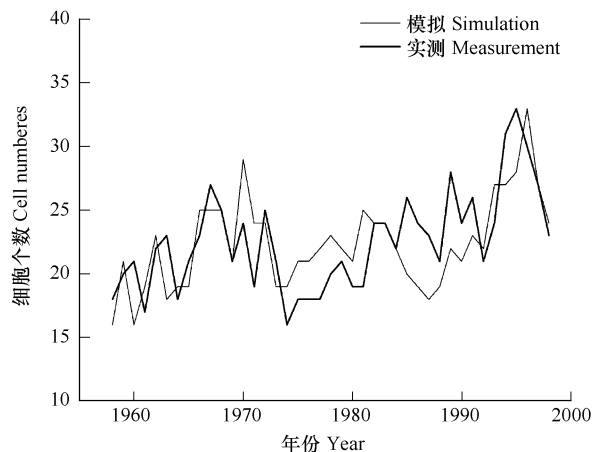


图 2 红松树木细胞模拟序列和实测序列对比(1958 ~ 1998 年)

Fig.2 Comparison between simulated and measured cell numbers of *Pinus koraiensis* in Fenglin site from 1958 to 1998

率、与温度有关的生长速率、与水分有关的生长速率和每年的细胞个数。

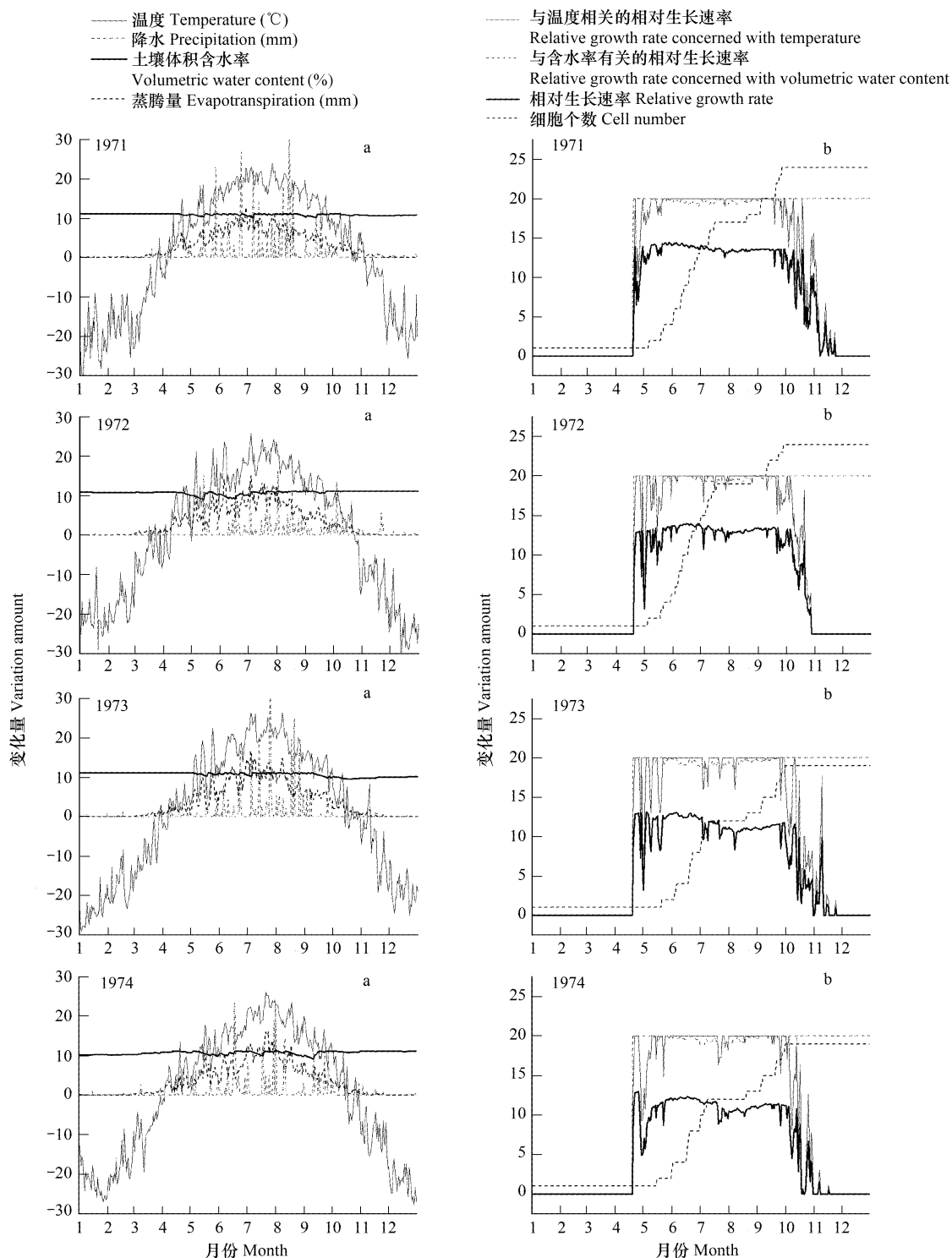


图3 温度和土壤体积含水率的变化对树木生长的影响

Fig. 3 The effect of the variation of temperature and soil water content on tree growth

在这4a中,宽年为1971和1972年,窄年为1973和1974年。从图3可见,树木的生长主要是受到温度的影响,且生长初期的温度对树木的生长影响很大。如,1971年树木开始的生长主要受生长初期的温度影响。1972年同样是生长速率受到生长的初期的温度影响较大,1973年生长速率的变化除受生长初期的温度变化影响外,7月和8月份中生长速率的明显降低也是由温度引起的。从图中也可以看出,水分对树木生长的影

响较小,只有在6~8月份由于温度升高,生长加快,潜在的蒸腾作用量增大,这时含水量对树木生长有一定影响,但是影响微弱。模拟分析结果与统计相关的计算结果一致,且生理意义明确。比较宽年和窄年的4月下旬温度变化显示,1971和1972年为宽年4月下旬的平均温度分别为6.6℃和9.6℃,1973和1974年为窄年分别为4.1℃和5.6℃,温度愈高,光合速率愈大,为细胞形成的提供的养料愈多,因此表现为轮宽与4月份气温特别是4月下旬气温的显著的正相关关系。

从统计相关上看,生长季上一年10月份气温特别是10月中旬和下旬的气温与树木生长具有较高相关关系。从模型模拟看,相关具有一定意义,因为树木形成层生长结束的平均日期为10月上旬,而10月中旬、下旬的气温变化,树木的光合作用仍然能进行,且气温在光合最低温度和最适温度下线之间,光合速率随温度的升高而增大,因此,这时的温度越高为下一年储存的养料越多。

3 结论与讨论

(1) Tree-Ring 模型对小兴安岭红松树木生长的模拟取得了较好的应用效果,生理意义明确。对参数敏感性分析发现,光合最低温度,光合最适温度下限,最适土壤体积含水率下限和最大土壤体积含水率,是红松树木形成层生长比较敏感的参数,对这些参数的精确确定,是模型模拟准确与否的关键。

(2) 红松树木的径向生长主要受到生长季上一年10月份气温和当年4月份气温的控制。模型分析结果认为,树木形成层开始生长平均是在4月下旬,这时水分充足,温度在光合最低温度和最适温度下限之间,温度愈高,光合速率愈大,储存的养料愈多,因此表现为与树轮宽度的正相关关系。形成层生长结束的时间平均在10月上旬,用于形成层细胞生长的光合产物的消耗减少,而光合速率随着温度的升高而增大,因此,10月份的气温越高为下一年储存的养料越多,翌年易形成宽轮。

需要指出的是,小兴安岭不同高度上气候要素差异很大,本研究采用的树木样本和气象数据均来自于小兴安岭低山区,因此我们的结论主要适用于对小兴安岭低山红松生长的气候响应机制,而高山区红松生长的气候响应机制需要进一步深入研究和分析。Tree-Ring 模型可以预测在未来气候变化背景下,红松树木生长的变化情况,以及影响树木生长的主要限制性因子是否会发生转移等问题,对历史气候的准确恢复具有一定的指导意义。

References:

- [1] Yuan Y J, Ye W, Dong G R. Reconstruction and Discussion of 314 a precipitation in Yili Prefecture, Western Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 121–127.
- [2] Gou X H, Chen F H, Wang Y J, Shao X M. Spring precipitation reconstructed in the east of the Qilian Mountain during the last 280 a by tree ring width. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(3): 292–296.
- [3] Liu Y, Ma L M. Seasonal precipitation reconstruction from tree ring widths for the last 376 years in Hohhot region. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(18): 1986–1991.
- [4] Liu Y, Cai Q F, Won-Kyu P, An Z S, Ma L M. Tree-ring precipitation records from Baiyin'aobao, Inner Mongolia since A. D. 1838. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(9): 1140–1145.
- [5] Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H, Shiyatov S G, Cook E R. Unusual twentieth century summer warmth in a 1000-year temperature record from Siberia. *Nature*, 1995, 376: 156–159.
- [6] Shao X M, Fan J M. Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of Dragon Spruce. *Quaternary sciences*, 1999, 1: 81–89.
- [7] Jacoby G C, Lovelius N V, Shumilov O I, Raspopov O M, Karbainev J M, Frank D C. Long-term temperature trends and tree growth in the Taymir region of northern Siberia. *Quaternary Research*, 2000, 53(3): 312–318.
- [8] Davi N K, Jacoby G C, Wiles G C. Boreal temperature variability inferred from maximum latewood density and tree-ring width data, Wrangell Mountain region, Alaska. *Quaternary Research*, 2003, 60(3): 252–262.
- [9] Liang E Y, Shao X M, Qing N S. Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2008, 61: 313–320.
- [10] Vaganov E A, Hughes M K, Shashkin A V. Growth dynamics of conifer tree rings: images of past and future environments. E. A. Vaganov, M. K. Hughes, A. V. Shashkin. Berlin: Springer, xiv, 2006. 1–354.
- [11] Fritts H C, Vaganov E A, Sviderskaya I V, Shashkin A V. Climatic variation and tree-ring structure in conifers: Empirical and mechanistic models

- of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall thickness and wood density. *Climate Research*, 1991, 1(2): 97—116.
- [12] Evans M N, Reichert B K, Kaplan A, Anchukaitis K J, Vaganov E A, Hughes M K, Cane M A. A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, G03008, doi: 10.1029/2006JG000166.
- [13] McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 771—801.
- [14] Kharuk V I, Winterberger K, Tsibul'skii G M, Yakhimovich A P, Moroz S N. Technogenic disturbance of pretundra forests in Noril'sk valley. *Russian Journal of Ecology*. 1996, 27(6): 406—410.
- [15] Yin X G, Wu X D. Modeling analysis of Huashan pine growth response to climate. *Quarterly Journal of Applied Metrology*, 1995, 6(3): 257—264.
- [16] Shi J F, Liu Y, Vaganov E A, Cai Q F, Shishov V. A primary discussion on the climatic response of *Pinus tabulaeformis* in the Helan Mountain. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 245—251.
- [17] Shi J F, Liu Y, Cai Q F, Yi L. A case study of physiological characteristics of statistical correlation between *Pinus tabulaeformis* tree-ring widths and climatic factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 3: 697—705.
- [18] Li Y. The application of the TREE-RING eco-physiological model in the tree-ring research of *picea crassifolia* in the East Part of Qaidam Basin. [Master Dissertation], Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research. Chinese Academy of Sciences, 2007. 1—88.
- [19] Zhu H F. A temperature reconstruction for eastern part of Northeast China based on a tree ring width network. [Ph. D. Dissertation], School of Geographic Sciences and Remote Sensing, Beijing Normal University, 2006. 1—90.
- [20] Yin H, Guo P W, Liu H B, Huang L, Yu H M, Guo S Y, Wang F. Reconstruction of the october mean temperature since 1796 at Wuying from tree ring data. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(1): 18—23.
- [21] Stocks M A, Smiley T L. An introduction to tree ring Dating. Chicago: University of Chicago Press, 1968. 10—15.
- [22] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of dendrochronology: applications in environmental sciences. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1990. 1—394.
- [23] Vaganov E A. The tracheidogram method in tree-ring analysis and its application. Cook E R, Kairiukstis L A, eds. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1990. 63—67.
- [24] Fritts H C, Shashkin A V, Downes G M. A simulation model of conifer ring growth and cell structure, in *Tree-Ring Analysis*, edited by R. Wimmer and R. E. Vetter, 3—32, Cambridge University Press, Cambridge. Gates D M. *Biophysical Ecology*. New York: Springer, 1999. 611.
- [25] Cannell M G R, Smith R L. Climatic warming, spring bud burst, and frost damage on trees. *Journal of Applied Ecology*, 1986, 23: 177—191.
- [26] Wang Z. *Plant physiology*. Beijing: China Agricultural Press, 1999. 1—492.
- [27] Chen X Y, Ye J C, Lu G H, Qin F X. Study on field capacity distribution about of China. *Water Resource and Hydropower Engineer*, 2004, 35(9): 113—119.
- [28] Jiang Q X, Fu Q, Wang Z L. Research on Spatial Variability of Soil Water Characteristic in Western Semiarid Area of Heilongjiang Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 118—122.
- [29] Editorial Committee of Forest in China, *Forest in China*. Beijing: China Forestry Press, 1999. 863—869.

参考文献:

- [1] 袁玉江,叶玮,董光荣. 天山西部伊犁地区314a 降水的重建与分析. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 121~127.
- [2] 勾晓华,陈发虎,王亚军,邵雪梅. 利用树轮宽度重建近280a 来祁连山东部地区的春季降水. *冰川冻土*, 2001, 23(3): 292~296.
- [3] 刘禹,马利民. 树轮宽度对近376 年呼和浩特季节降水的重建. *科学通报*, 1999, 44(18): 1986~1991.
- [4] 刘禹,蔡秋芳, Won-Kyu Park, 安芷生, 马利. 内蒙古锡林浩特白音敖包1838 年以来树轮降水序列. *科学通报*, 2003, 48(9): 952~957.
- [6] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化. *第四纪研究*, 1999, 1: 81~89.
- [15] 尹训钢, 吴祥定. 华山松树木年轮对气候响应的模拟分析. *应用气象学报*, 1995, 6(3): 257~264.
- [16] 史江峰, 刘禹, Vaganov E, 蔡秋芳, Shishov V. 贺兰山油松生长的气候响应机制初步探讨. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 245~251.
- [17] 史江峰, 刘禹, 蔡秋芳, 易亮. 油松树轮宽度与气候因子统计相关的生理机制——以贺兰山地区为例. *生态学报*, 2006, 3: 697~705.
- [18] 李雁. TREE-RING 生态机理模型在柴达木盆地东缘地区青海云杉树轮研究中的应用[硕士论文]. 中国科学院地理科学与资源研究所, 2007. 1~88.
- [19] 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:[博士论文]. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 2006. 1~90.
- [20] 尹红, 郭品文, 刘洪滨, 董磊, 于宏敏, 国世友, 王芳. 利用树轮重建小兴安岭五营1796 年以来的温度变化. *气候变化研究进展*, 2009, 5(1): 18~23.
- [26] 王忠. *植物生理学*. 北京: 中国农业出版社, 1999. 1~492.
- [27] 陈晓燕, 叶建春, 陆桂华, 秦福兴. 全国土壤田间持水量分布探讨. *水利水电技术*, 2004, 35(9): 113~119.
- [28] 姜秋香, 付强, 王子龙. 黑龙江省西部半干旱区土壤水分空间变异性研究. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 118~122.
- [29] 中国森林编辑委员会. *中国森林*. 北京: 中国林业出版社, 1999. 863~869.