

油松 (*Pinus tabulaeformis*) 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

史江峰^{1,2}, 刘禹^{2,3}, 蔡秋芳^{2,4}, 易亮^{2,4}

(1. 北京师范大学资源学院, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;

3. 西安交通大学能源与动力工程学院环境工程系, 西安 710049; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:通过分析贺兰山地区气候因子的变化特征, 并且参考北美、俄罗斯的研究结果, 确定了 Vaganov-Shashkin 生理响应模型的参数, 并根据研究区的实际情况对参数作了相应修正, 得出两组不同的参数, 两组参数拟合出相同的结果, 说明模型内在的机理是稳定的, 更能反映出它的生理学特性。对树轮宽度序列和气候因子进行相关分析, 发现比较明显的相关有与 5~8 月份降水的正相关, 与 5~8 月份温度的负相关, 与 9、10 月份温度的正相关。模型分析结果认为, 从 5 月中旬到 8 月底, 降水不能满足树木生长的需要, 故形成树轮宽度与该时段降水的正相关, 而在这个时段, 由于温度和降水呈负相关, 表现为树轮宽度与温度的负相关, 其实这在很大程度上是一种间接的相关。到 9 月份, 由于温度下降比较明显, 这时树木生长的主要控制因素已转化为温度, 所以形成了与 9、10 月份温度的正相关。模型分析还发现, 树轮宽度的形成与生长结束时间相关性强, 而与生长开始时间的关系不明显。

关键词: 贺兰山; 油松; 生理; 统计相关

文章编号: 1000-0933(2006)03-0697-09 中图分类号: P468, P425 文献标识码: A

A case study of physiological characteristics of statistical correlation between *Pinus tabulaeformis* tree-ring widths and climatic factors

SHI Jiang-Feng^{1,2}, LIU Yu^{2,3}, CAI Qiu-Fang^{2,4}, YI Liang^{2,4} (1. College of Resources and Technology, Beijing Normal University, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters, Ministry of Education of China, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 3. Department of Environment Engineering, School of Energy and Power Engineering of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710075, China; 4. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 697~705.

Abstract: The Mt. Helan is located in semi-arid area of North China. It is a typical region for dendrochronology study, to date, there are lots of climatic reconstructions for this region, but very few physiological response analysis though it is very important. In this paper, tree growth physiological responses to climatic factors are discussed by using the Vaganov-Shashkin model for the Mt. Helan region. The results could explain the relationship between tree-ring widths and climatic factors more reasonably. The materials used in the paper include meteorological data from three meteorological stations and one tree-ring width series.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (40525004); 国家自然科学基金资助项目 (90211018); 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2004CB720200); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLLQG0321)

收稿日期: 2005-06-18; **修订日期:** 2006-01-15

作者简介: 史江峰 (1975~), 男, 陕西户县人, 博士, 主要从事全球变化与植物生态学研究. E-mail: sjf@ires.cn

Foundation item: The project was supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 40525004); National Natural Science Foundation of China (No. 90211018); National Key Basic Research Special Foundation Project (No. 2004CB720200); Foundation of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology (No. SKLLQG0321)

Received date: 2005-06-18; **Accepted date:** 2006-01-15

Biography: SHI Jiang-Feng, Ph. D., mainly engaged in global change and plant ecology. E-mail: sjf@ires.cn

Considering the small difference of the elevation between AZQ meteorological station and tree ring site, the meteorological data are calibrated by a method described following; minus 0.9°C from each datum of temperatures, and times 1.2 for each of precipitation data. In spite of that the parameters in Vaganov-Shashkin model have been fixed based on the research from the North America and Russia, they have been adjusted in terms of the factual situation of the research region. We therefore obtained two groups of parameters, which were applied in the V-S model separately, and the simulation results are quite similar. This indicates that the model is stable and has clearly physiological characteristics. There are certain correlations between tree-ring width series and climatic factors: positive with the precipitation from May to August; negative with the temperature from May to August, and positive with September to October. The simulation results indicate that the precipitation from the second ten days of May to August is insufficient to tree's growth. With the decreasing of temperature in September and October, the main controlling factor turns from precipitation to temperature. We also, in this paper, found a strong relationship between ring widths and the ending of growing season, and weak correlation with the beginning of growing season.

Key words: Mt. Helan; *Pinus tabulaeformis*; physiology; Vaganov-Shashkin model; statistical correlation

树木年轮气候学以其定年准确、分辨率高等优点,在短尺度气候重建方面具有不可替代的作用。在区域气候重建研究中发现,北半球高纬度地区,树木生长对温度的响应越来越不敏感。原本与温度正相关的树轮密度、宽度,在 20 世纪后半期,却随着温度上升相关系数呈下降趋势^[1,2]。其原因可能是冬季降水增加,雪融时间延后,形成层活动滞后^[3],或温度的升高诱导了干旱的加剧^[2,4]等。在长尺度气候重建研究中发现,20 世纪是千年来温度最高的一个世纪,暗示着过去 100 多年来人类活动已使得气温显著升高^[5]。但是 Briffa 等对该项工作做了仔细检查,提出疑问:怎样才能确定这种影响是由于温度上升,而不是 CO_2 的影响,或其他由于人类活动产生的生长助长剂如氮污染的影响^[6]。总的来看,近几十年来,许多树轮序列显示出了异常的生长,对气候营力的响应也在发生变化。理解这种变化的原因是很重要的。

过去十几年里,中国树轮气候学同样取得了长足的进展。主要是对多个气候要素进行重建,如温度^[7-9]、降水^[10-14]、温暖指数^[15]、干旱指数^[16]等。在重建过去气候过程中,普遍采用线性统计回归,主要考虑的是单一因子的影响。而统计分析并不能说明树木的生理特性,统计上的相关很有可能是一种间接的相关,是否具有明确的生理学意义还有待商榷。而树木对气候的生理机制研究在我国还比较薄弱^[17]。

本文以树轮气候学研究程度比较高的贺兰山地区为例,对树轮宽度与气候因子之间的相关关系进行生理学方面的论证,对未来的树轮气候重建提供资料。

1 研究地区和材料

贺兰山($38^{\circ}27'N \sim 39^{\circ}30'N$, $105^{\circ}20'E \sim 106^{\circ}41'E$)位于宁夏银川平原和内蒙古阿拉善高原之间,山体狭长,近似南北走向,南北延伸 200 余 km,东西宽约 20 ~ 40km,最宽处 60km,总面积约 7500km^2 ,海拔一般 2000 ~ 3000m。该地区的降水集中在 6 ~ 8 月份,平均占全年降水量的 50% ~ 60%,有些年份高达 80% ~ 90%。该地区的夏季降水主要由东亚夏季风带来,然而夏季风经过长途跋涉,到达贺兰山地区时其强度已大大减弱。

目前,已经在贺兰山地区开展了大量的树轮气候学重建工作^[18-20]。对树木生长的气候响应机制也做了初步探讨^[17]。本研究就是在这些工作的基础上,对贺兰山油松树轮宽度与气候因子之间统计相关的生理机制进行详细研究,明确油松生长的气候响应特征。

本文所用资料包括 3 个气象站和 1 个树轮样点。气象站分别为吉兰泰(JLT, $39^{\circ}47'N$, $105^{\circ}45'E$, 海拔 1031.8m)、阿左旗(AZQ, $38^{\circ}50'N$, $105^{\circ}40'E$, 海拔 1561.4m)和高山站(HM, $38^{\circ}46'N$, $105^{\circ}54'E$, 海拔 2901m),树轮样点为北寺沟(MHL02 组, $39^{\circ}05'N$, $106^{\circ}05'E$, 海拔 1500 ~ 2000m),都位于贺兰山西坡。树轮样点的详细特征见文献^[19]。年表的建立过程是先采用负指数函数或线性拟合去除与树龄有关的生长趋势,再采用算术平均法得到标准年表。

2 降水、温度特征

对 3 个站点的温度和降水量都按月计算多年平均值,计算结果见图 1。可以看出,贺兰山地区温度随海

拔高度升高而降低,全年温度以 6、7、8 月份为高,7 月份温度最高;降水量随海拔高度升高而增加,全年降水量以 8 月份为最高。经计算,贺兰山西坡年平均温度随海拔高度升高 100m 降低 0.45℃,年降水量随海拔高度升高 100m 增加 17mm。

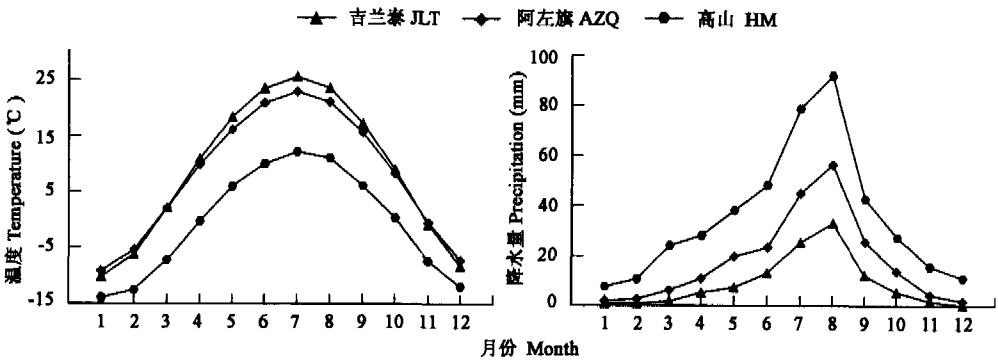


图 1 多年平均逐月平均气温和逐月降水量
Fig.1 Mean monthly temperature and precipitation of more than 29 years

按月分别对阿左旗站与吉兰泰站、高山站气象数据做相关分析,结果表明对温度而言,最低相关都满足 0.05 显著水平;对降水而言,有个别月未达到 0.05 显著水平。考虑到阿左旗站与树轮样点的高差不大,对温度、降水分别按高程做简单的线性校正。阿左旗站与 MHL02 点海拔相差约 200m,对温度做 -0.9℃的修正,对降水做 1.2 倍的修正。

对阿左旗站的温度和降水量作了相关分析(表 1),结果表明 6~8 月份温度和降水显著负相关,5 月份温度和降水也呈负相关关系。

表 1 阿左旗站单月温度和降水量的相关分析

Table 1 Correlation analysis between temperature and precipitation in Azuqi												
月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
相关系数 Correlation Coefficient	-0.33	-0.02	0.28	0.00	-0.18	-0.52	-0.40	-0.36	-0.03	-0.11	-0.18	-0.21

* 重叠时段 46a(1953~1998 年),显著性水平 0.05 时,临界相关系数为 0.29 The common interval is 46a (1953~1998) and the critical correlation coefficient is 0.29 at $\alpha = 0.05$ significant level

3 树轮宽度与气候因子的相关

用 MHL02 点的 STD 年表与阿左旗气象站的月平均气温和月降水量做相关分析(图 2)。比较明显的相关是与 5~8 月份降水量的正相关、温度的负相关,以及与 9、10 月份温度的正相关。这些相关所代表的生理意义如何,后面将做详细回答。

由于月分辨率太低,不能看到一些现象的细节,本文将日数据转化为候数据,进一步细化分析。习惯上,以 5 日为一候。树木的某一生长发育阶段一般要经过十几天或几十天,为了将气象资料与树木发育情况对照,用较短时段(如候)的资料是恰当的^[21]。当然,如果用逐日资料也未尝不可,但逐日资料毕竟有较多的随机脉动,对于研究十几天以上的时段是欠妥的。在本文中,5 日平均气温称为候温;5 日降水量和称为候降水量。用候数据对 MHL02 点作相关分析发现,在第 48、49 候之间,降水、温度对树木生长的影响方向发生变化(图略)。该两候的温度分别为 19.6℃和 19.2℃。

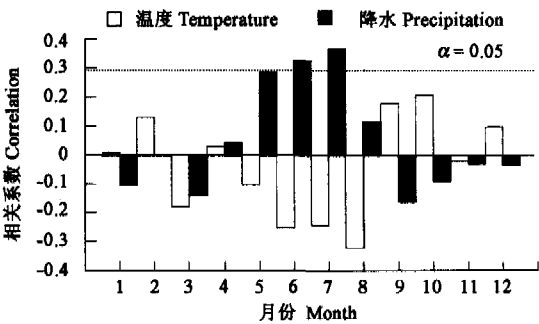


图 2 MHL02 点 STD 年表与阿左旗气象站月温度、降水相关分析
Fig.2 Response function analysis between STD chronology of MHL02 site and mean monthly temperature and precipitation of Azuqi

4 生理机制研究

4.1 Vaganov-Shashkin 模型基本原理

一般而言,树木生长除受到土壤因素的影响外,还受到多个气候因子的联合控制。本文采用 Vaganov-Shashkin 模型(简称 VS 模型)进行生长机制分析。模型中假设土壤因素在树木生长的过程中保持恒定,树木生长由温度、降水和光照 3 个气候因子控制。

树木的日生长速率 $Gr(t)$ 表示为:

$$Gr(t) = g_E(t) \times \min[g_T(t), g_w(t)] \quad (1)$$

式中, $g_E(t)$ 、 $g_T(t)$ 和 $g_w(t)$ 为假定其他因子不构成树木生长限制因子的情况下,由光照、温度和土壤体积含水率独立计算的生长速率。

(1) 生长对温度的响应 在模型中,当某一时段的日温度总和达到给定的温度水平(T_{beg})时,树木开始生长^[22]。生长速率决定着 1a 中所形成的细胞个数,而细胞个数与树轮宽度成正比,所以在模型拟合中用细胞个数代表树轮宽度指标。

树木生长对温度的响应 $g_T(t)$ 用分段线性函数来表示,气温低于最低生长温度(T_{min})时,生长不发生;高于 T_{min} 而低于最优生长温度下限(T_{opt1})时,生长随温度的升高线性增加;在 T_{opt1} 和最优温度上限(T_{opt2} , $T_{opt2} > T_{opt1}$)之间,生长保持在最高水平,为常数;温度高于 T_{opt2} 而低于最高生长温度(T_{max})时,随温度的升高,生长速度呈线性下降趋势。

(2) 生长对土壤含水率的响应 树木生长对土壤体积含水率的响应 $g_w(t)$ 类似于对温度的响应。土壤中每日含水率的变化 dW 用土壤水动态平衡方程表示:

$$dW = f(P) - E_T - Q \quad (2)$$

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

$f(P)$ 可表示为:

$$f(P) = \min[k_1 \times P, P_{max}] \quad (3)$$

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进水量。

(3) 生长对太阳辐射的响应 生长对太阳辐射的响应 $g_E(t)$ 表示为纬度 φ 、太阳的入射角 θ 和日长 ϕ 的函数:

$$g_E(t) = \sin\varphi\sin\theta + \cos\varphi\cos\theta\cos\phi \quad (4)$$

在此忽略了地球绕太阳运行轨道的离心率和大气透射率。

4.2 模型参数选择

本文参数的选择参照角注^①,最终所取得的参数见表 2。其中最主要的不同是降水渗入到土壤中的参数 k ,本文取 0.95,而引用文取 0.72,这主要是因为贺兰山树轮样点主要采集的是孤树,或郁闭度很小处的树木,这样降水就容易进入土壤中。据 Shashkin 认为,如果是孤立的一棵树,这个值可以取 1,所以本文中取 0.95 是合理的。

另外,有一点需要指出,树木生长的最小土壤体积含水率、最优土壤体积含水率下限、植物主要根系的深度,这 3 个参数在本文和有关文献存在着很大的差别^[17],其原因是由于假定不同的植物主要根系深度造成的。在文献,其值为 300mm^[17],在本文,其值为 1000mm,后者为前者的 3.3 倍。造成土壤含水率变化的主要原因是降水,把降水换算成相对植物主要根系深度后的含水率,前者应该是后者是 3.3 倍。在本文中,两组的最小土壤体积含水率、最优土壤体积含水率下限基本上是按照这个比例取值的,当然也会有其他因素的影响,所以经过初始拟合后的微调,两者在这个比例基础上有很小的差异。对于树木生长的最优土壤体积含水率上

① Reichert B K, Evans M N, Kaplan A, et al. A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data. Journal of Climate, 2005

限、最大土壤体积含水率,两组参数又基本一致,这主要是因为当地土壤体积含水率很少能达到这个值,在干旱地带,降水很难满足树木生长的需求。

表 2 拟合 MHL02 点树轮宽度的 VS 模型参数
Table 2 VS model parameters for simulating tree-ring width variation in MHL02 site

参数 Parameter	描述 Description	在本文 In this paper	文献 In reference[17]	角注 ^① In footnote
T_{min}	最小生长温度 Minimum growth temperature(℃)	5	5	5
T_{opt1}	最优生长温度下限 Lower optional growth temperature(℃)	20	20	18
T_{opt2}	最优生长温度上限 Upper optional growth temperature(℃)	22	22	24
T_{max}	最大生长温度 Maximum growth temperature(℃)	31	31	31
W_{min}	树木生长的最小土壤体积含水率 Minimum volumetric water content for growth	0.02	0.1	0.02
W_{opt1}	树木生长的最优土壤体积含水率下限 Lower optional volumetric water content for growth	0.1	0.4	0.1
W_{opt2}	树木生长的最优土壤体积含水率上限 Upper optional volumetric water content for growth	0.4	0.48	0.4
W_{max}	树木生长的最大土壤体积含水率 Maximum volumetric water content for growth	0.45	0.5	0.45
T_{beg}	树木开始生长的某一时段 τ_{beg} 的温度总和 The sum of temperature for the beginning of tree growth at time interval τ_{beg} (℃)	60	60	60
τ_{beg}	计算树木开始生长的温度总和的时段 The interval to calculate the beginning of tree growth(d)	10	10	10
D_{root}	植物主要根系的深度 Root depth(mm)	1000	300	1000
P_{max}	使土壤饱和的日最大进水量 Maximum daily input water to saturate soil(mm/d)	20	20	20
k	降水渗入到土壤中去系数 Coefficient for water to penetrate soil	0.95	0.95	0.72

对于文献^[17]中的参数,最优土壤体积含水率下限值很大,似乎从树木生长对土壤含水率的响应看有些偏高。但是,考虑到植物主要根系深度取值较小,即用于计算含水率的土壤厚度就较小。这么高土壤体积含水率之所以能成立,是因为这层内的含水在下渗过程中仍然被树木利用,也就是说最终考虑的是有多少降水为树木生长所利用。所以,从树木对降水的使用量上看,这两组参数没有什么差异。模型参数中最优土壤温度下限(20℃)与相关分析中降水、温度对树木生长影响方向发生变化时段的候均温(19.6℃)比较接近。

4.3 模型稳定性分析

在此,定义生长开始为第 1 个细胞形成时的日期,生长结束为最后一个细胞形成时的日期。本文计算的生长开始时间范围是第 91 ~ 133 天,平均为第 112 天,大概是 4 月 22 日左右,标准差为 9d;生长结束时间范围是第 182 ~ 299 天,平均为第 272 天,大概是 10 月 2 日左右,标准差为 22d(图 3a)。文献^[17]计算的生长开始时间范围是第 88 ~ 129 天,平均为第 111 天,大概是 4 月 21 日左右,标准差为 11d;生长结束时间范围是第 171 ~ 300 天,平均为第 275 天,大概是 10 月 5 日左右,标准差为 22d(图 3b)。

本文参数计算出的细胞个数范围是 8 ~ 20 个,平均 13.4 个;文献^[17]参数计算出的细胞个数范围是 7 ~ 19 个,平均 13.1 个。

两组参数分别计算出的平均生长开始、结束的时间差不超过 3d。生长开始、结束时间分别构成两个序列,对两组参数计算的结果求相关,得出生长开始两个序列的相关系数是 0.32,生长结束两个序列的相关系数是 0.74,说明计算出的结束时间,两者是比较相近的。本文生长开始日期序列与 MHL02 年表序列和模拟序列的相关性不明显,生长结束序列与两者的相关分别是 0.27、0.43,说明生长与结束日期的关系更为紧密些;文献^[17]生长开始日期序列与 MHL02 年表序列和模拟序列的相关性也不明显,生长结束序列与两者的相关分别是 0.39、0.42,也说明生长与结束日期的关系更为紧密些。1965、1966 年的窄轮都对对应着生长结束时间很早,是两个比较典型的例子。这也就是尽管两组参数计算出的生长开始时间差异较大,生长结束时间比较相近,最终得出相似结果的原因之一。对两组参数模拟的结果求相关,得出相关系数是 0.95,而且本文参数模拟结果与年表相关是 0.63,远远满足 0.01 的显著性水平。

同时采用这两组参数对树木生长进行拟合,均得出很好的效果,说明模型内在的机理是稳定的,对参数选

① Reichert B K, Evans M N, Kaplan A *et al.* A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data. *Journal of Climate*, 2005

择的依赖性不强,适用参数范围很广,具有很强的机理特性。

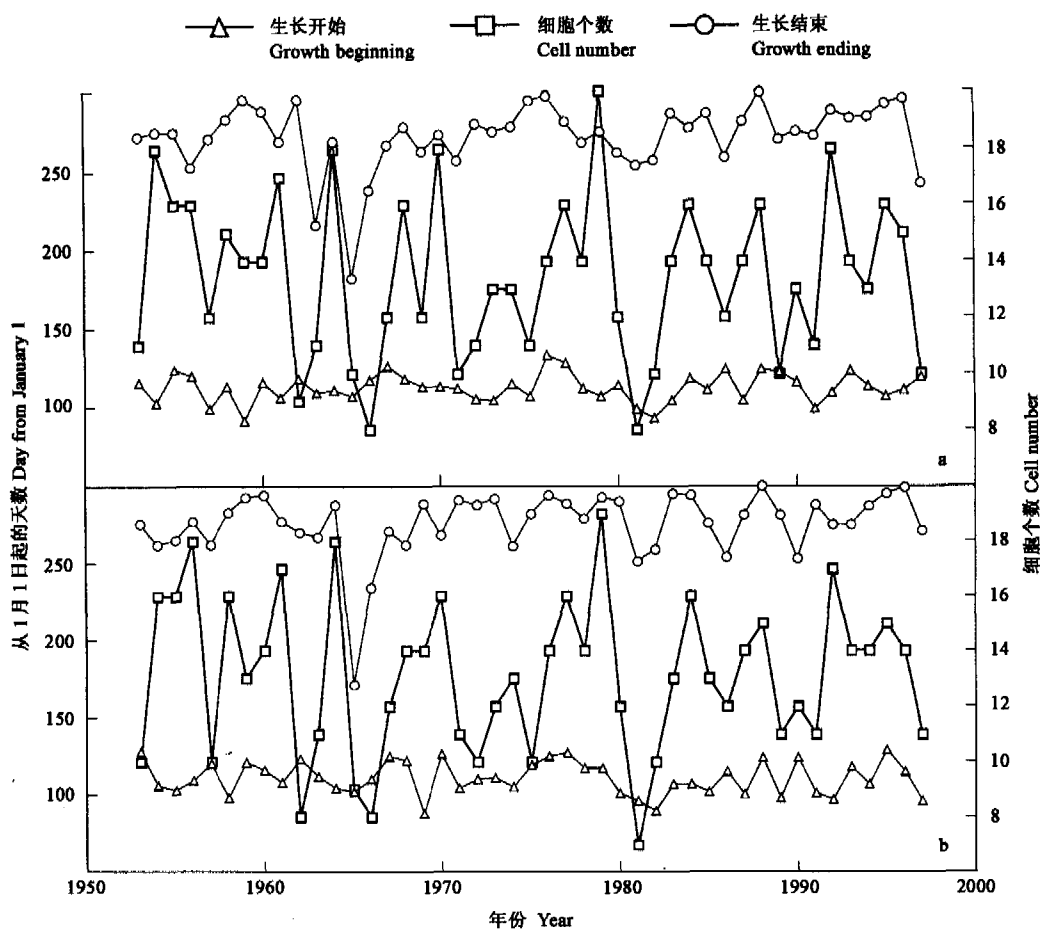


图3 本文和文献^[17]两组参数分别计算出的树木生长开始、结束时间及形成的细胞个数
Fig.3 Beginning and ending of tree growth and cell numbers calculated in this paper and reference^[17]

4.4 模型分析结果

应用本文参数对 MHL02 点的树木生长进行了拟合,对每一年的土壤体积含水率、植物蒸腾、与温度有关的生长、与水分有关的生长、总生长,以及形成的细胞个数作了计算,在此,仅列出宽窄具有明显变化的时段 1975 ~ 1982 年的分析结果(图 4)。

在这 8a 里,显著的窄轮年有 1975、1981 和 1982 年;显著的宽轮年有 1977 和 1979 年。1975 年初始土壤体积含水率很低,从 5 月中旬起,生长速度一直持续下降到 8 月底,9 月份才有所抬升,但升高幅度不大,且还是受体积含水率的控制。1981 年生长开始时间比较早,初始体积含水率比较低,先是受控于温度,到 5 月初,已转为由体积含水率控制,生长持续下降到 8 月中旬的最低,近乎为 0;随后有所上升,但幅度不大,整个 9 月也是受到体积含水率的控制。1982 年生长起始体积含水率比较高,一直到 5 月中旬,生长速度在持续增加;此后,由于降水贫乏,生长速度就一直快速下降,在 9 月份也没有升高的趋势。

1979 年初始土壤体积含水率就比较高,生长速度随温度升高而加快,到 5 月底就接近最优生长速度;然后有所回落,但还是保持在一个比较高的范围内;从 7 月下旬起,又快速上升,直到 8 月上旬的最优生长速度;此后,生长才在温度、降水的交互控制下徐徐下降;生长结束也很晚,直到 10 月 20 日左右。所以就形成了分析时段内的最高值。

5 讨论与结论

(1)生长结束时间的早晚对轮宽的形成影响很大,生长结束早,相应会形成窄轮;生长结束晚,相应会形成

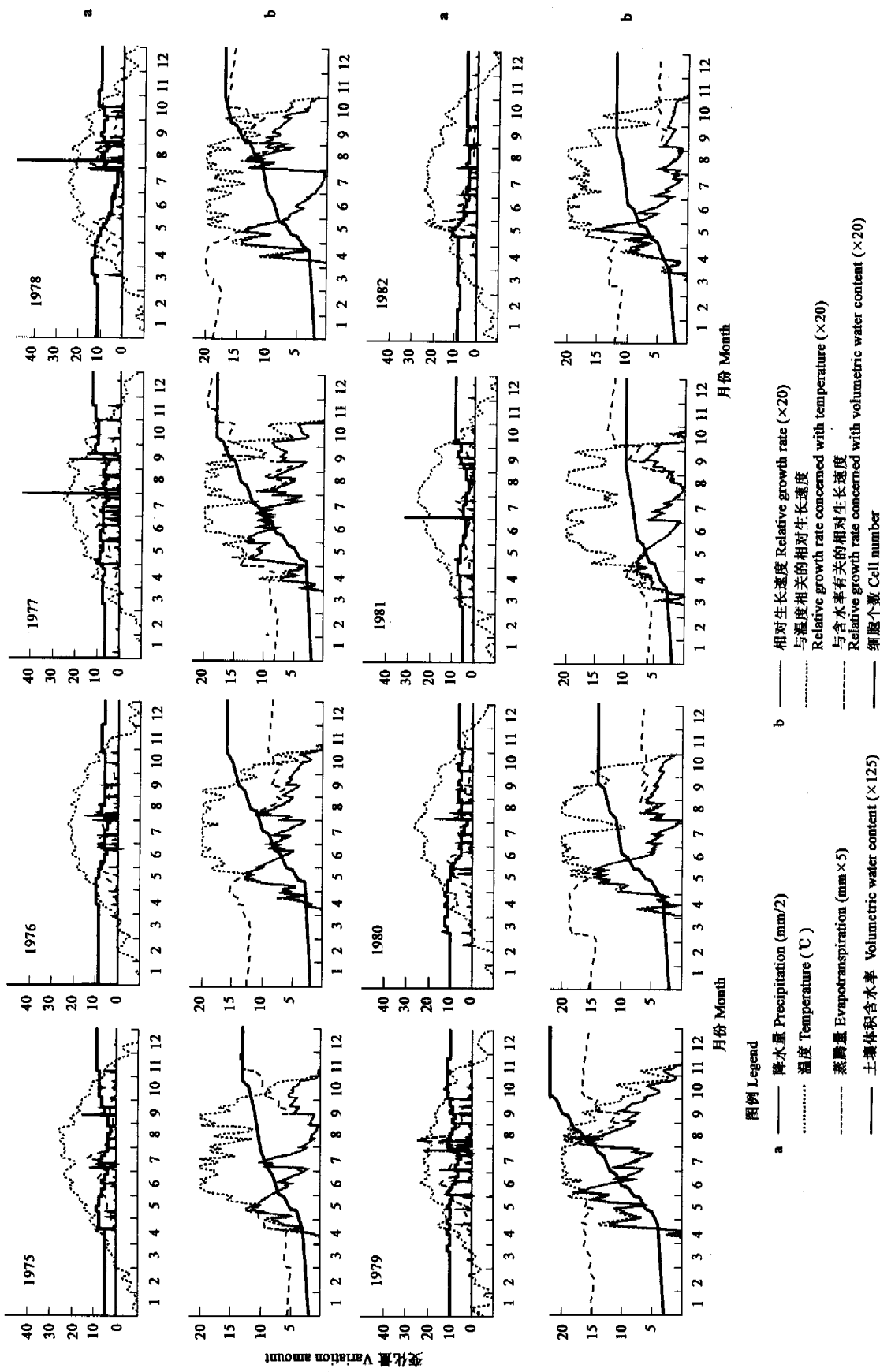


图4 土壤体含水率和温度的变化对树木生长的控制作用
Fig.4 Controlling effects on tree growth due to volumetric water content and temperature variation

宽轮。而生长开始时间的早晚对轮宽的形成影响不大。

(2)4月到5月中旬,树木生长主要受到温度的控制,但土壤体积含水率很少能达到最优体积含水率范围,所以这个时段体积含水率的增加可以延长生长加速的时间范围。从5月下旬到8月底,温度已经基本落在最适宜范围,降水量成为生长的最主要控制因子。一般来说,经过5~7月份快速生长的强烈蒸腾作用,7月底都是一个土壤极度干旱的时期;尽管8月份的降水远高于其他月份,但也不足以补偿水分的缺失,所以8月份也是主要由降水控制生长的;在大多数年份,尤其是窄轮形成年,8月份土壤表现为极端干旱。还可以看出,6~8月份与土壤体积含水率有关的生长速率都很小,说明在这个干旱地区,生长旺季的缺水是很严重的。到9月份,温度开始下降,树木就受到温度和降水的联合影响,以温度的影响为主。

(3)从相关上看,比较明显的相关有树轮宽度与5~8月份降水正相关,与5~8月份温度负相关,与9、10月份温度正相关。通过上面生理机制分析认为,5~8月份树木生长的限制因素是降水,降水多,则树木生长量大;降水少,则树木生长量小。温度和树轮宽度的负相关,主要是通过降水与树轮宽度相关所表现出来的一种间接相关;另外,温度在这一段时间基本能满足生长的要求,温度高会使得原本不足的土壤水分更为贫瘠。9、10月份,因为温度已显著降低,树木生长减慢,蒸腾作用降低,水分的限制越来越少,这时温度就成为限制生长的主要因素,故形成与温度的正相关。

References:

- [1] Briffa K R, Schweingruber F H, Jones P D, *et al.* Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 1998, 391: 678 ~ 682.
- [2] Davi N K, Jacoby G C, Wiles G C. Boreal temperature variability inferred from maximum latewood density and tree-ring data, Wrangell Mountain, Alaska. *Quaternary Research*, 2003, 60: 252 ~ 262.
- [3] Vaganov E A, Hughes M K, Kirdyanov A V, *et al.* Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, 1999, 400: 149 ~ 151.
- [4] Barber V A, Juday G P, Finney B P. Reduced growth of Alaska white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 2000, 405: 668 ~ 672.
- [5] Mann M E, Bradley R, Hughs M. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 759 ~ 762.
- [6] Briffa K R, Osborn T J. Seeing the wood from the trees. *Science*, 1999, 284: 926 ~ 927.
- [7] Yuan Y J, Li J F. Reconstruction and analysis of 450 years' winter temperature series in the Urumqi river source of Tianshan mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(1): 63 ~ 69.
- [8] Liu H B, Shao X M. Reconstruction of early-Spring temperature series of Qiling mountains using tree-ring chronologies. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 879 ~ 884.
- [9] Wang Q C, Zhou L S, Qin N S, *et al.* Winter temperature of Tuotuo river reconstructed using tree-ring chronology of Wulan. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 518 ~ 523.
- [10] Liu Y, Cai Q F, Won-Kyu P, *et al.* Tree-ring precipitation records from Baiyinaobao, Inner Mongolia since A.D. 1838. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(11): 1140 ~ 1145.
- [11] Liu Y, Shi J F, Shishov V, *et al.* Reconstruction of May—July precipitation in the north Helan Mountain, Inner Mongolia since A.D. 1726 from tree-ring late-wood widths. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 405 ~ 409.
- [12] Shao X M, Huang L, Liu H B, *et al.* Millennial precipitation variations recorded by tree-ring in Delingha region, Qinghai. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(2): 145 ~ 153.
- [13] Yuan Y J, Shao X M, Li J F, *et al.* Discussion of precipitation information in Xiagansate tree-ring chronology and 360 year precipitation reconstruction. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2048 ~ 2053.
- [14] Gou X H, Chen F H, Wang Y J, *et al.* Spring precipitation reconstructed in the east of the Qilian Mountain during the last 280a by tree ring width. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(1): 34 ~ 40.
- [15] Dai J H, Shao X M, Cui H T, *et al.* Reconstruction of past eco-climate by tree-ring width index of *Larix chinensis* on Mt. Taibai. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(4): 428 ~ 435.
- [16] Liu H B, Shao X M, Huang L. Reconsruction of early-summer drought indices in mid-north region of China after 1500 using tree ring chronologies. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(3): 428 ~ 435.

- [17] Shi J F, Liu Y, Vaganov E, *et al.* A primary discussion of the climatic response of *Pinus tauleformis* in the Helan Mountain. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 245 ~ 251.
- [18] Liu Y, Ma L M, Cai Q F, *et al.* Reconstruction of summer temperature(June—August) at Mt. Helan, China, from tree-ring stable carbon isotope values since 1890. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(12): 1127 ~ 1136.
- [19] Liu Y, Shi J F, Shishov V, *et al.* Reconstruction of May-July precipitation in the north Helan Mountain, Inner Mongolia since A.D. 1726 from tree-ring late-wood widths. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 405 ~ 409.
- [20] Liu Y, Ma L M, Leavitt S W, *et al.* A preliminary seasonal precipitation reconstruction from tree-ring stable carbon isotopes at Mt. Helan, China. *Global and Planetary Change*, 2004, 41: 229 ~ 239.
- [21] Yao Z S, Ding Y G. *Climate Statistics*. Beijing: Meteorology Press, 1990. 1 ~ 954.
- [22] 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.

参考文献:

- [7] 袁玉江,李江风.天山乌鲁木齐河源 450a 冬季温度序列的重建与分析.冰川冻土,1999,21(1):63 ~ 69.
- [8] 刘洪滨,邵雪梅.利用树轮重建秦岭地区历史时期初春温度变化.地理学报,2003,58(6):879 ~ 884.
- [9] 汪青春,周陆生,秦宁生,等.利用乌兰树木年轮重建托托河冬季气温序列.高原气象,2003,22(5):518 ~ 523.
- [12] 邵雪梅,黄磊,刘洪滨,等.树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化.中国科学(D 辑),2004,34(2):145 ~ 153.
- [13] 袁玉江,邵雪梅,李江风,等.夏于萨特树轮年表中降水信息的探讨与 326 年降水重建.生态学报,2002,22(12):2048 ~ 2053.
- [14] 勾晓华,陈发虎,王亚军,等.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 ~ 295.
- [15] 戴君虎,邵雪梅,崔海亭,等.太白山树木年轮宽度资料对过去生态气候要素的重建.第四纪研究,2003,23(4):428 ~ 435.
- [16] 刘洪滨,邵雪梅,黄磊.中国陕西关中及周边地区近 500 年来初夏干燥指数序列的重建.第四纪研究,2002,22(3):220 ~ 229.
- [17] 史江峰,刘禹,Vaganov E,等.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.
- [21] 么枕生,丁裕国.气候统计.北京:气象出版社,1990. 1 ~ 954.