利用生理模型模拟的柴达木东北缘祁连圆柏对气候要素的响应过程

张永香^{①②}, 邵雪梅^{①*}, 徐岩^①, WILMKING Martin^②

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② Institute for Botany and Landscape Ecology, University Greifswald, Greifswald 17487, Germany

* 联系人, E-mail: shaoxm@igsnrr.ac.cn

2010-10-19 收稿, 2010-12-30 接受

国家重点基础研究发展计划(2010CB950101)和国家自然科学基金(40671194, 41071061)资助项目

摘要 借助 Vaganov-Shashkin 模型, 从生理过程的角度讨论了柴达木祁连圆柏径向生长与主要限制性气候因子之间的关系。模拟结果表明, 祁连圆柏生长对其主要限制性气候因子的响应过程主要发生在生长季的前期。具体来讲, 降水(尤其是5和6月的降水)对祁连圆柏年径向生长起着决定性作用; 而气温的影响主要表现为夏季高温对生长的抑制以及伴随全球变暖所出现的生长季延长。另外, 模拟结果也揭示出近20年来随着区域水分条件的增加, 祁连圆柏径向生长量也随之出现增长趋势。这些均预示着若这一暖湿的气候条件持续发展, 将不但有助于祁连圆柏在该区域的生长, 也有益于增加区域森林的碳积累。

关键词

柴达木东北缘

祁连圆柏

生理响应过程

Vaganov-Shashkin 模型

树木年轮的宽度、密度和同位素等指标在研究历史时期的气候变化中具有不可替代的作用^[1,2]。当前, 树轮气候学家们利用这些指标已经成功地重建了过去千年的区域乃至半球尺度上的气候变化历史^[3,4]。这对我们理解过去气候的变化, 更好地预测未来气候起到了重要作用^[5]。众所周知, 树轮气候学研究中有一个重要的假设, 即树木径向生长与其主要限制性气候因子之间的响应过程可以用一个稳定的近线性关系来描述。在此前提下, 借助统计手段建立回归方程来重建历史时期的气候变化^[6,7]。然而, 随着全球气温近一个世纪以来的快速升高, 众多针对北半球环极地地区和中纬度山地地区的研究发现树轮资料记录的气候信息与实测气候资料之间在近半个世纪内出现了分异现象, 如, 重建的温度值与实测值之间的分异^[8-10]、树木径向生长与其主要限制性气候因子之间的分异^[11,12]以及同一样点内单株树木响应方式的分异^[13,14]。这些研究共同表明用简单的近线性

关系来解释树木生长和其主要限制因子(如温度)之间的响应关系可能存在某些不足, 换句话说, 树轮与气候因子之间的近线性关系可能是不稳定的。这就需要进一步从生理上了解树木生长和气候要素之间的关系^[15,16]。否则, 借助目前统计方法得到的重建结果很有可能低估或高估气候变化的过程, 进而影响后续的相关研究。

目前在树轮形成的生理过程研究中存在着众多的生理模型, 其中尤以 Vaganov-Shashkin 模型(VS 模型)的使用最为广泛^[15,16]。所谓树轮生理模型, 指的是建立在树轮生长与气候因子非线性关系上的生理响应过程模型。它是在前人各类树轮生理模型的基础上建立的一个能够描述树轮形成层活动与气候因子之间关系的模型。与其他模型相比较, VS 模型存在以下优势, 首先, VS 模型假设外在因素对树木径向生长的影响主要体现在形成层的活动上, 即外在因素主要影响形成层细胞的线性生长速度。其次, 温

英文版见: Zhang Y X, Shao X M, Xu Y, et al. Process-based modeling analyses of *Sabina przewalskii* growth response to climate factors around the north-eastern Qaidam Basin. Chinese Sci Bull, 2011, 56: 1518-1525, doi: 10.1007/s11434-011-4456-5

度、光照和土壤湿度是其主要的外在因素。再次,将主要限制因子原理^[6]应用到细胞生长的速率上。例如,在某个季节的一定时间段内,细胞生长速率不能超过其重要限制因子所允许的范围。另外,形成层内的生长变化决定了将要形成管胞的解剖特性(如细胞直径、胞壁厚度)。最后,它主要模拟由当年气候变化引起的生长和树轮结构。需要指出的是,尽管该模型考虑了树木生长的主要限制性环境因子,但与涉及树木光和产物再分配和储存等更多详细生理过程的模型(如 TREERING2000)相比,其仍存在一定的局限性^[17]。但是,由于 VS 模型简化了树木细胞生长的复杂过程,其仍是当前最为快速有效并被广泛应用的树木生理模型。例如,在北美干旱区和西伯利亚地区,VS 模型对多个针叶树种生理过程的模拟均取得了较好的效果^[18,19]。并且,对我国贺兰山区的油松和华山的华山松生理机制的模拟也取得了很好的结果^[20-22]。因而,利用 VS 模型模拟树木径向生长的生理过程是可行的。

祁连圆柏(*Sabina przewalskii* Kom.)作为我国的特有针叶树种,具有耐高寒、干旱、瘠薄以及根系发达和抗风力强的特性,是青藏高原东北部干旱和半干旱区森林生态系统的重要组成部分^[23]。同时它还是我国寿命最长的树种之一,因此常被用于树轮气候学的研究。目前,借助祁连圆柏的年轮宽度资料,树轮学家已经建立了我国最长的树轮宽度年表,并重建了相关研究区过去百年至千年的气候变化历史^[24-27]。然而,关于祁连圆柏的树轮-气候因子之间响应的生理过程的研究目前还是空白。因此,本文将利用 VS 模型从生理过程来探索和揭示祁连圆柏的径向生长和气候因子之间的关系,以期利用祁连圆柏所进行的历史时期气候变化以及其他研究提供生理基础和依据。

1 资料与方法

1.1 树轮与气候资料

研究所用的祁连圆柏取自柴达木东北缘的宗务隆山和沙利克山,山体海拔高度约为 3500~4000 m a.s.l.左右。在这一区域共采集了 7 个样点,共约上千株祁连圆柏的宽度样芯。所有这些资料都曾被用于重建过去千年的德令哈降水变化历史^[24]。DLH3 (37°27'05"N, 97°32'33"E)是 7 个样点中最具代表性的一个样点(图 1),它距德令哈市最近,采样海拔为 3920 m a.s.l.,坡度约为 20°,坡向南偏西,土层约为 50 cm。其所有样芯均采自祁连圆柏纯林的健康孤立木。共选了该样点的 28 株祁连圆柏共 56 根样芯。将它们经过准确定年后,借助 ARSTAN 程序将各单个序列合成为树轮宽度年表^[24]。结合器测资料记录的各年降水的多寡和研究区树木生长的公共窄年和宽年,通过图像分析读取了各特征年的细胞数。具体做法:随机选取了 11 棵树、9 个特征年的年轮(5 个窄年:1957, 1966, 1979, 1995 和 1998 年;4 个宽年:

图1 采样点及气象站点分布图

1959, 1989, 1993 和 2002 年), 分别在每轮上读取 5 条细胞串的细胞个数, 然后取这 5 列的均值, 再对每棵树各年的细胞数做标准化, 最后计算各年的均值, 得出样点内树木在这些特征宽窄年的细胞标准化序列^[28]。

气温和降水资料选取了德令哈气象站观测的日均温、日降水、月均温和月降水。该气象站虽然自 1955 年开始连续观测, 但 1955 年却存在大量的缺测值, 因此这里主要选取了 1956~2002 年的观测资料。对于气温, 考虑到该气象站海拔为 2981.5 m, 所以在分析中利用山地温度垂直递减率(0.56℃/100 m)将其插值到了样点高度。而降水则沿用了站点的实测值。在模拟分析过程中也利用气象站点记录的原始资料进行了模拟。与利用插值后器测资料的模拟结果相比, 二者主要的不同在于温度的取值范围上。插值后的模拟值更能反映样点树木实际的径向生长情况。因此, 最终选取了插值后的气象资料做了模拟分析。

1.2 VS 模型原理

在 VS 模型中, 树木的生长速率由 3 个最主要的因子决定, 即:

$$Gr(t) = GrE(t) \times \min[GrT(t), GrW(t)], \quad (1)$$

式中, $Gr(t)$ 为树木的日生长速率, $GrE(t)$, $GrT(t)$ 和 $GrW(t)$ 为假定其他因子不影响生长时, 分别由光照、温度和土壤湿度所计算得到的生长速率。

(i) 光照对树木生长的影响。树木生长对太阳辐射的响应 $GrE(t)$, 可表示为纬度 φ 、太阳入射角(θ)和日长(ϕ)的函数。

$$GrE(t) = \sin\varphi\sin\theta + \cos\varphi\cos\theta\cos\phi, \quad (2)$$

这里忽略了地球绕太阳运行时的离心率以及大气的透射率。

(ii) 温度对树木生长的影响。在 VS 模型中, 只有当积温达到给定温度(T_{beg})时, 树木才开始生长, 并遵循温度三基点原则。用分段函数表示, 即当气温低于最低生长温度(T_{min})时, 树木不生长; 当气温大于 T_{min} 而低于最适生长温度(T_{opt1})时, 树木生长随着气温的升高以线性速度增加; 当气温在 T_{opt1} 和最适宜温度的上限(T_{opt2})之间时($T_{opt2} > T_{opt1}$), 生长速度保持在最高水平, 对应一常数; 当气温高于 T_{opt2} 小于 T_{max} 时, 随着气温升高树木生长呈线性下降。

(iii) 土壤湿度对树木生长的影响。类似于温度, 土壤湿度对树木生长的影响 $GrW(t)$ 也可用分段线性

函数来表示。同样, 包含了 W_{min} , W_{opt1} , W_{opt2} 和 W_{max} 等 4 个参数, 它们对应的含义同上。每日土壤含水量的变化(dW)由土壤水动态平衡方程计算得到:

$$dW = f(P) - Er - Q, \quad (3)$$

式中, $f(P)$ 为日降水量, Er 是日蒸腾量, Q 为土壤中水的日径流量。其中,

$$f(P) = \min[k_1 \times P, P_{max}], \quad (4)$$

上式 P 表示实际的日降水量, k_1 为渗透系数。

模型中的参数可分别由实测资料和模式模拟调整 2 种方式来确定。由于实测资料的确定, 需要长期大量的实地观测支持。因此本文先参照已有模拟研究的参数范围^[21]给出一个估计的参数初始值来模拟出生长量, 然后利用模拟结果不断地与实测值进行对比, 并调试模式, 最终获得各个参数。根深、土壤萎蔫系数、地下径流系数、日土壤饱和进水量等参数则结合采样点的实际情况来确定。

2 结果

2.1 研究区气候概况

柴达木盆地是典型的内陆干旱区。德令哈站器测资料显示(图 2), 区域内雨热同期, 年最高气温和最大降水量均多出现在 7 月。统计表明, 过去 50 年月最高气温为 20.5℃, 而月均最大降水只有 36.1 mm。虽然随着海拔上升降水量有所增加, 但总体而言区域内气候条件严酷。需要说明的是, 该站的年均温和降水在过去 50 年里均有显著增加趋势($P < 0.0001$), 其中显著增温的月份集中在秋冬两季(1, 2, 9, 10, 11 和 12 月), 而降水显著增加的月份有 7 月($P = 0.0008$), 1 月($P = 0.01$)和 6 月($P = 0.09$)。总体而言, 区域的气候条件趋向暖湿。

图 2 研究区的气候条件

2.2 树木径向生长与主要限制性气候因子的关系

柴达木东北缘各样点的祁连圆柏因生境相近, 因此所得到的树木径向生长过程的记录信息也较为一致. 表 1 给出了在最大限度保留低频信号并去除生长趋势后, 各样点标准年表之间的相关系数^[24]. 由表可知, 各样点树木在过去千年内不仅在低频信息上有很好的共性, 而且在高频上(一阶差)也表现出非常高的一致性. 在低频上 DLH1 和 DLH2 的相关最高, 达到了 0.827; 而最小相关系数出现在 DLH1 和 WL4 之间, 为 0.598. 在高频上, 两组同样相关显著, 相关系数分别达到了 0.919 和 0.696. 此外, 由表 1 还可知, DLH3 样点与其他各样点相关均较高. 因此, 本文选取该样点代表整个区域树木径向生长的状况, 并基于此来进行模拟分析.

DLH3 样点内树木生长的一致性较高, 点内树木平均敏感度为 0.4, 缺轮率为 1.238%. 本文所用的宽度年表选取了 AD 404~2002 年, 共 1599 年. 计算其与气候因子的相关系数, 结果显示 DLH3 祁连圆柏与生长季当年 6 月的气温呈显著负相关($R=-0.39$, $P<0.01$), 而与生长季当年 5 和 6 月的降水为显著正相关($R=0.38$, $P<0.01$; $R=0.65$, $P<0.001$)(图 3).

2.3 树木径向生长的生理过程模拟

表 2 列出了 VS 模型模拟的近 50 年树木径向生长的各个参数值. 在调试各参数的过程中(图 4), 我们发现柴达木祁连圆柏生长对于 W_{opt1} , T_{min} 和 T_{opt1} 最为敏感. 当 $0.1 < W_{opt1} < 0.18$ 时, 模式对其变化非常敏感, 此时树木径向生长与实际生长之间的相关系数随着 W_{opt1} 的增加呈线性增加; 当 $W_{opt1} > 0.18$ 时, 模式对它的变化不再敏感. 而模式对其他参数, 如

图 3 祁连圆柏与生长季各月气温和降水的关系

表 2 柴达木祁连圆柏生理过程模拟参数

参数	描述	取值
T_{min}	最低生长温度(℃)	4
T_{opt1}	最适生长温度下限(℃)	14.6
T_{opt2}	最适生长温度上限(℃)	22.0
T_{max}	最高生长温度(℃)	31.0
W_{min}	生长的最低土壤湿度	0.04
W_{opt1}	生长的最适土壤湿度下限	0.18
W_{opt2}	生长的最适土壤湿度上限	0.8
W_{max}	生长的最高土壤湿度	0.9
T_{beg}	开始生长的积温	60
D_{root}	根深(mm)	500
P_{max}	使土壤饱和的最大日降水量(mm)	20
k_1	降水渗透到土壤的系数	0.86
k_2	植物蒸腾量的第一系数, 和降水有关	0.12
k_3	植物蒸腾量的第二系数, 和温度有关	0.175
k_R	计算土壤水地下径流系数	0.001

表 1 各样点树轮宽度指数序列间的相关分析
(AD 1005~2001 年)^{a)}

	DLH1	DLH2	DLH3	DLH4	DLH5	WL3	WL4
DLH1	1.00	0.919	0.855	0.734	0.797	0.735	0.696
DLH2	0.827	1.00	0.887	0.785	0.853	0.780	0.749
DLH3	0.679	0.783	1.00	0.784	0.852	0.753	0.733
DLH4	0.621	0.737	0.724	1.00	0.873	0.759	0.773
DLH5	0.686	0.787	0.771	0.837	1.00	0.788	0.776
WL3	0.610	0.727	0.689	0.728	0.792	1.00	0.895
WL4	0.598	0.710	0.691	0.733	0.776	0.890	1.00

a) 左下角为各样点轮宽指数的年际间相关系数, 右上角为一阶差后各序列间的相关系数. 数据来自文献[24]

图 4 各参数敏感性范围

T_{opt2} , W_{opt2} 的改变却没有明显变化.

基于表 2 的参数, 我们计算了 VS 模型模拟得到的树木径向生长序列和 DLH3 的标准宽度年表之间的相关, 结果显示二者在 1956~2002 年的相关以及 5

年的滑动相关分别高达 0.681($P<0.001$)和 0.81, 说明它们之间具有很好的一致性. 这一点由图 5 也可看出: 除个别年份略有差异外, 无论在年代际还是在年际时间尺度上, 模拟的生长量与树木实际生长的变化趋势均基本一致. 模拟的特征宽窄年的木质部细胞数量与实测值之间也有很好的一致性, 两者之间呈显著正相关($R=0.73$, $P<0.01$), 其中与单株的相关, 最大相关系数达到了 0.92($P<0.001$), 最低为 0.50 ($P<0.1$).

由模拟结果可见(图 6), 树木径向生长在宽窄年的最大差异主要体现在水分限制上. 在生长前段(5~7 月)的土壤水分条件好, 气温相对较低, 树木的年径向生长量就大, 从而形成宽轮; 反之, 当同期的土壤水分条件相对较差, 尽管气温决定的生长速度相对较快, 树木的年径向生长量仍很小从而形成窄轮. 对比实测的气候条件可以看出, 特征窄年和宽年各年降水的总量差别并不大, 除了 1957 年为 70 mm 外, 其余年份均大于 100 mm. 但各月降水的分布情况则有不同, 尤其是 1~6 月的累积降水(特别是 4, 5 和 6 月的累积降水), 差异更明显; 在宽轮形成的年份, 其可达 150 mm 左右, 占全年总降水量的 50%, 甚至到 75%以上; 而窄轮形成的年份, 它不足 50 mm, 最高仅占到全年总降水量的 28%. 对于气温来讲, 各点的差异并不大.

模拟结果显示(图 7), 在过去的半个世纪内, 柴达木东缘山地祁连圆柏的生长开始日主要分布在第 114~218 天之间(对应于 4 月末至 8 月初), 生长结束日主要在第 234~284 天之间(对应于 8 月末至 10 月初). 同时区域祁连圆柏的生长期呈现逐渐增长的趋势, 对比模拟期前后两段的均值可知, 后 25 年的生长开始日提前了约 9 天, 而结束日推后了约 6 天. 树木的

图 5 DLH3 实测和模拟的径向生长序列对比

图 6 特征宽(黑实线)窄(灰虚线)年温度和土壤湿度决定的树木平均径向生长(阴影部分为序列加减一个标准差)

图 7 生长开始与结束日和树木径向生长的对比

年径向生长量与生长开始日之间存在显著负相关, 其相关系数可达-0.611($P<0.001$), 但与生长结束日的相关则不显著.

3 讨论

研究者借助 VS 模型对北半球多个地区的各针叶树种进行了生理过程的模拟, 均取得了很好的结果^[17,19,21,22]. 对比了 VS 模型对柴达木祁连圆柏的模拟值和实测值, 结果显示该模型对生长于高海拔干旱区的祁连圆柏同样适用. 该模型无论在总径向生

长量上,还是在细胞尺度上,均能很好地反映出树木径向生长对所在环境因子的响应过程.因此,借用VS模型揭示祁连圆柏与气候因子之间的响应过程是可行的,同时能够帮助我们更好地从生理过程理解该树种径向生长和其限制性气候因子的关系.

从树木生理角度来讲,不同的树种以及不同地区的同一树种对其环境要素的响应均是不同的.因此利用模式模拟得到的各个参数也具有各自的特征.比如,模拟贺兰山油松得到的参数为 $W_{opt1} = 0.4$, $T_{min} = 5^{\circ}\text{C}$, $T_{opt1} = 20^{\circ}\text{C}$ ^[22].相比之下,柴达木祁连圆柏的最低生长温度和最适温度下限值均较低,但它对土壤水分的利用率则较高.这些差异可能与祁连圆柏本身的生境有关.具体来讲,祁连圆柏主要生长于柴达木盆地周边山地的阳坡地带^[23],接受光照较多,这使得树木能够在气温相对较低的情况下有足够的热量开始生长,即 T_{min} 相对较低;而在干旱区,降水少且蒸发量大,树木必须利用所有可以获得的水源来保证生长需求.换句话讲, W_{opt1} 较低时也能满足其生长.此外,祁连圆柏生长的各参数与极地森林树线处的部分树种(如 Yakutia 地区, $T_{min} = 4^{\circ}\text{C}$, $15^{\circ}\text{C} < T_{opt1} < 20^{\circ}\text{C}$)^[16]较为相似.这可能是由于柴达木盆地处于青藏高原上,同样具有高寒的气候条件决定的.

研究表明,中高纬度地区生长季前段的气候条件对轮宽的形成具有重要作用^[17,29,30].具体到柴达木东北缘山地祁连圆柏的径向生长,生长季初期的降水对其具有非常重要的影响.这在统计模型中主要表现为轮宽值与5、6月的降水显著正相关,与6月的气温呈显著负相关;而在生理模型中,表现为所有生长量大、细胞数量多的宽年,均对应于5和6月份较多的降水量(如1989,1993和2002年).而气温的作用则相对较小,同期的高温只能降低土壤水分从而间接影响生长.因此,生长季前期的水分状况对于祁连圆柏的生长起着决定性作用.这就使得尽管20世纪区域的气温不断上升,生长季延长,但气温对树木的径向生长速度并无显著影响.

20世纪70年代以来树轮宽度和密度指标与其主要限制性气候因子(尤其是生长季气温)之间的分异现象已成为树轮气候学热点研究问题之一^[8~10].这一现象不仅广泛存在于北半球高纬度地区^[9,10],在中纬度地区的欧亚大陆山地地区也同样存在^[30,31].树木径向生长与气温之间的分异最为广泛,这种分异的最大可能原因就是温度引起的水分胁迫^[10,13,14].水分

对于柴达木边缘山地的祁连圆柏径向生长极其重要.在近半个世纪以来,已有的水分对于祁连圆柏径向生长的限制作用无论是在统计模型还是VS模型中均非常显著.升温对于树木径向生长和其主要限制性气候因子的关系并没有产生明显影响.

柴达木盆地的气温和降水在过去50年里都呈增加趋势^[32~34].其中,显著升温的月份主要集中在秋冬两季,而降水则以冬夏季为主.这一水热条件的变化为柴达木祁连圆柏的生长提供了有利条件.图8给出了不同时段树木生长速率的对比,由图可见降水控制的生长速率在后半段明显大于前半段,而温度控制的径向生长速率(GrT)前后时段没有明显变化.因此,总的径向生长速率(Gr)受降水影响在夏季明显加快.这点在树木实测的径向生长上也能看出,即后半段的平均轮宽大于前半段.已有研究预测,随着全球变暖西北地区将会出现一个暖湿的气候条件^[35].目前在柴达木盆地地区,这一趋势已有初步表现,可以推论如果这一暖湿气候组合在未来持续发展,必将会有助于祁连圆柏的生长,有利于区域森林碳储量的增加.

4 结论

利用VS模型模拟了广泛用于气候变化研究的柴达木祁连圆柏的生理过程.结果表明,该模型能够很好地在径向生长和细胞尺度上模拟祁连圆柏的生理过程,揭示祁连圆柏对各气候要素的响应以及不同时段气候要素对于树木径向生长的促进和限制作用.具体来讲,生长季初期水分状况对祁连圆柏的径向生长起决定性作用,表现为5和6月的降水和当年径

图8 不同时段树木生长速率对比

向生长量呈显著正相关, 而生长季初期的高温引起的水分胁迫反而限制了树木的径向生长. 研究区树木径向生长与其主要限制性气候因子的关系并无显著变化, 没有出现分异现象. 另外, 模拟结果还表明 20 世纪的升温使得树木的生长季有所延长, 特别是

随着近几十年生长季前期降水量的增加, 使得祁连圆柏的径向生长量也出现了明显的增加. 这就意味着如果该区域的水热条件在未来能够继续保持暖湿的话, 将会有利于祁连圆柏的生长, 并增加区域森林的碳储量.

致谢 感谢美国 Arizona 大学的 Michael Evans 教授对模式部分的支持.

参考文献

- Mann M, Jones F D. Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1–4
- IPCC. IPCC Fourth AR Summary for Policy Makers. In: *Climate Change 2007*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- Mann M, Zhang Z, Hughes M, et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 13252–13257
- Mann M, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 2009, 326: 1256–1260
- Jones P, Briffa K, Osborn T, et al. High-resolution paleoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects. *Holocene*, 2009, 19: 3–49
- Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976
- Hughes M K. Dendrochronology in climatology—the state of the art. *Dendrochronologia*, 2002, 20: 95–116
- Jacoby G C, D'Arrigo R. Tree-ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. *Glob Biogeochem Cycle*, 1995, 9: 227–234
- 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
- D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, et al. On the “divergence problem” in northern forests: A review of tree-ring evidence and possible causes. *Global Planet Change*, 2007, 60: 289–305
- Oberhuber W. Influence of climate on radial growth of *Pinus cembra* within the alpine timberline ecotone. *Tree Physiol*, 2004, 24: 291–301
- Carrer M, Urbinati C. Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. *New Phytol*, 2006, 170: 861–872
- Wilmking M, Juday G P, Barber V A, et al. Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds. *Global Change Biol*, 2004, 10: 1724–1736
- Wilmking M, Juday G P. Longitudinal variation of radial growth at Alaska's northern treeline—Recent changes and possible scenarios for the 21st century. *Glob Planet Change*, 2005, 47: 282–300
- Fritts H C, Shashkin A V, Downes G M. A simulation model of conifer ring growth and cell structure. In: Wimmer R, Vetter R E, eds. *Tree-Ring Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 3–32
- Vaganov E A. Analysis of a seasonal growth patterns of trees and modelling in dendrochronology. In: Dean J T, Swetnam T, Meko D, eds. *Tree-Rings, Climate and Humanity*. Arizona, Radiocarbon, 1996. 73–87
- Vaganov E A, Hughes M K, Shashkin A V. *Growth Dynamics of Tree Rings: An Image of Past and Future Environments*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 189–243
- Anchukaitis K J, Evans M N, Kaplan A, et al. Forward modeling of regional scale tree-ring patterns in the southeastern United States and the recent influence of summer drought. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L04705, doi:10.1029/2005GL025050
- Evans M N, Reichert B K, Kaplan A, et al. A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data. *J Geophys Res*, 2006, 111: G03008, doi:10.1029/2006JG000166
- 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: 257–264
- Vaganov E A, Anchukaitis K J, Evans M N. How well understood are the processes that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics. In: Hughes M K, Swetnam T W, Diaz H F, eds. *Dendroclimatology: Progress and Prospects*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 37–76
- Shi J, Liu Y, Vaganov E A, et al. Statistical and process-based modeling analyses of tree growth response to climate in semi-arid area of north central China: A case study of *Pinus tabulaeformis*. *J Geophys Res*, 2008, 113: G01026, doi: 10.1029/2007JG000547
- 《青海森林》编辑委员会. *青海森林*. 北京: 中国林业出版社, 1993

- 24 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: 地球科学, 2004, 34: 145–153
- 25 Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D, et al. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1739–1741
- 26 刘禹, 安芷生, 马海州, 等. 青海都兰地区公元 850 年以来树轮记录的降水变化及其与北半球气温的联系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 461–471
- 27 Yin Z Y, Shao X M, Qin N S, et al. Reconstruction of a 1436-year soil moisture and vegetation water use history based on tree-ring widths from Qilian junipers in northeastern Qaidam Basin, northwestern China. *Int J Climatol*, 2007, 28: 37–53
- 28 Cook E R, Kairiukstis L. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. New York: Springer, 1990. 394
- 29 Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, et al. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 2007, 152: 1–12
- 30 Zhang Y X, Wilmking M, Gou X H. Changing relationships between tree growth and climate in Northwest China. *Plant Ecol*, 2009, 201: 39–50
- 31 Carrer M, Urbinati C. Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. *New Phytol*, 2006, 170: 861–872
- 32 马晓波, 李栋梁. 青藏高原近代气温变化趋势及突变分析. 高原气象, 2003, 22: 507–512
- 33 李远平, 杨太保. 柴达木盆地气温、降水突变与周期特征分析. 地理与地理信息科学, 2007, 23: 105–108
- 34 Li J B, Cook E R, D'Arrigo R, et al. Common tree growth anomalies over the northeastern Tibetan Plateau during the last six centuries: Implications for regional moisture change. *Glob Change Biol*, 2008, 14: 2096–2107
- 35 Shi Y, Shen Y, Kang E, et al. Recent and future climate change in northwest China. *Clim Change*, 2007, 80: 379–393