树木年轮宽度与气候变化关系研究进展

王 婷^{1 2} 于 丹¹ 李江风³ 马克平^{2 *}

(1 武汉大学生命科学学院, 武汉 430072) (2 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

(3 新疆气象科学研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘 要 树木的生长和立地环境密切相关并受多种气候因子的影响。树木年轮宽度的增加与温度、降水、太阳辐射、CO₂ 浓度等气候因子有着复杂的相关关系。在干旱或半干旱地区, 温度是限制树木生长的重要气候因子。生长季开始时最低温度的升高有利于延长生长季, 与年轮宽度正相关, 但是当生长季温度过高时, 即使降水非常充裕, 当年也只能形成窄年轮。生长季的温度过高则会加快土壤蒸发失水量并提高蒸汽压差, 使土壤水分不足而不利于树木生长, 因而生长季的高温多表现为与年轮宽度的负相关。生长期内降水量与树木的径向生长也成正相关, 但当生长季的降水量充足或过多时, 降水对树木径向生长不相关或负相关。受温度和降水共同调控的土壤湿度是树木径向生长的主要限制因子, 良好的水分状况对树木生长起决定性作用。某一地区的太阳辐射能量高常会导致高温少雨, 故高强度的太阳辐射使表土的湿度降低而不利树木的径向生长。而在受季风影响的地区, 树木年轮宽度的增加与当年雨季的气候变化关系不大。当年季风到来之前的气候(温度和降水)是树木生长的主要限制因子。有关 CO₂ 浓度的升高对树木生长的影响, 研究的结果很不一致。一些温室实验及田间控制实验证明, CO₂ 浓度的升高能对短命的一年生草本植物和植物幼苗产生“施肥效应”, 并有利于其生长; 还有些研究证明 CO₂ 浓度的升高能使高海拔地带的树木年轮宽度增加, 但也有些研究认为 CO₂ 浓度的升高对生长在自然条件下的自然植被影响不大。近年来, 有关树木径向生长和气候变化的研究越来越引起人们的关注, 相关研究也取得了较大的进展。这些研究在帮助人们了解和研究古气候变化对森林植被的影响, 以及预测未来全球变化对陆地生态系统的影响等方面有重要的理论和现实意义。综述了气候变化对树木年轮宽度影响的研究进展和应用, 并概述了研究方法和发展前景, 希望能加快和拓宽这一领域的发展。

关键词 树木年轮宽度 气候变化 气候因子

ADVANCES IN RESEARCH ON THE RELATIONSHIP BETWEEN CLIMATIC CHANGE AND TREE-RING WIDTH

WANG Ting^{1 2} YU Dan¹ LI Jiang-Feng³ and MA Ke-Ping^{2 *}

(1 College of Life Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(2 Institute of Botany, the Chinese Academy of Science, Beijing 100093, China)

(3 Xinjiang Institute of Meteorology, Urumqi 830002, China)

Abstract There are significant correlations between tree growth and environment. Growth of trees is strongly influenced by environment and climatic factors. Tree-ring widths are significantly correlated with some climatic factors, such as temperature, precipitation, solar radiation and increasing atmospheric CO₂. Temperature is found to be an important climatic factor for the growth of trees in arid and semiarid regions. The increment of the lowest temperature at the beginning of growing season can extend the growing period favoring tree growth, and significantly increase tree ring widths, while trees will have narrow rings at extreme high temperature even when accompanied with abundant precipitation in the growing season. High temperature accelerates evaporation and evapotranspiration, which can result in anomalous moisture stress for the growth of the trees. Temperature and tree ring width are inversely proportional i.e. higher the temperature, lower the tree ring width. Similarly, the precipitation in growing season also plays an important part in the growth of trees. Tree-ring widths also respond positively to precipitation at the beginning of the growing period. In contrast, they show adverse or neutral response to excessive rainfall because precipitation is no more the limiting factor to tree growth at that time. The significant relation between trees growth and climatic factors could be primarily attributed to the availability of soil moisture, which is determined by temperature and precipitation together. A favorable water balance seems to be decisive to the increment of tree-ring width. High solar radiation has a negative effect on

收稿日期: 2002-05-21 接受日期: 2002-08-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“西部生态环境演变规律与水土资源可持续利用研究”(KZCX1-10-05-01)和国家自然科学基金重点项目“新疆天山中段植被演变研究”(90102009)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: makp@brim.ac.cn

the tree growth , because high solar radiation usually means both low rainfall and high temperature , which in turn often result in low soil moisture and hampers tree growth. Although the rainfall is abundant in the areas influenced by monsoon , it shows no evident effect on tree-ring widths through monsoon. Pre-monsoon weather conditions (e. g. temperature and precipitation) are important limiting parameters for tree growth. Up to now , there have been no consistent conclusions about the relationship between tree-ring width and the increasing atmospheric CO₂. It is confirmed that the increasing CO₂ level increase growth of some tree seedlings and some short-life plant in greenhouses or in limit field experiments. Some experimental evidences also show that CO₂ level can be an important limiting factor in the growth of plants in the high-altitude environment. However , there are some experiments having failed to give tree-ring evidence for a possible CO₂ fertilization effect under natural environmental condition. Recently , scientists have made considerable progress in this field. These achievements can greatly help not only probe into the impact of paleo-climate on forest vegetation but also predict the effect of global climate change on terrestrial ecosystem. This paper reviewed the advances , applications and methods in this field , which aimed to widen people 's knowledge and accelerate the development of this field.

Key words Tree-ring width , Climatic change , Climatic factor

树木是人类生态环境的重要组成部分 , 它的生长和立地环境密切相关并受气候变化的影响 , 大多数树木年轮的宽窄能够真实地记录下每年有利或不利的因素(Fritts ,1976)。从树木年轮的变化中 , 我们不但可以了解树木历年的生长情况及其所在地历年和远期气候变化的情况和规律 , 还能得出气候变化对人类赖以生存的生态系统资源的影响。因而 , 利用树木年轮资料获取气候与环境的变化 , 不仅成为获取过去气候环境演变数据的重要方法之一(Fritts ,1976) , 在古气候研究中得到了广泛的应用(Cook *et al.* ,1991 ;Fritts ,1991) ;而且可以帮助人们预测未来气候变化和研究气候变化对生态系统的影响 , 在全球变化研究中起着举足轻重的作用。

早在 19 世纪初或更早的时候 , 就曾有一些科学家 , 如法国的 Duhamel 和 Buffon、美国的 Twining 及前苏联的 Shvedov 等 , 都对树木年轮的形成进行过研究 , 尝试建立树木年轮宽窄变异与某种气候要素变化的可能联系(吴祥定 ,1990)。20 世纪初期 , 著名的美国天文学家 Douglass(1914 ;1920) 就致力于在美国西南部干旱区进行树木年轮研究。他在研究过程中发现亚利桑那地区的树木年轮生长与当地的降水存在着良好的对应关系 , 他由此创立并推动了树木年代学(Dendrochronology) 的发展。树木年代学是一门研究树木木质部各年的生长轮 , 并利用年轮来定年和评价过去环境变化的科学(Fritts ,1976)。它是从生理学为基础 , 以树木生长特点为依据 , 用来研究环境变化影响树木生长的规律 , 旨在获取气候代用资料 , 重建环境变化的史实(Fritts ,1976 ;吴祥定 ,1990)。

自从 Douglass 确立了树木年代学的原理和方法以来 , 树木年轮宽度一直是树木年代学的主要研究

对象 , 且大部分的研究都是利用年轮宽度来重建过去上百甚至几千年的降雨和温度变化 , 以弥补气象资料的不足(Fritts ,1976 ;Hughes *et al.* , 1982 ;Stahle *et al.* , 1985 ;Schweingruber , 1988 ;Overpeck *et al.* , 1997)。本文旨在概述主要气候因子对树木年轮宽度的影响 , 并探讨相关的研究方法和最新研究进展 , 以展现这一领域的研究在全球气候变化对生态系统影响中的重要作用。

1 气候变化对树木年轮宽度的影响

Fritts(1966)认为半干旱地区树木年轮宽度和气候变化之间的关系可以从生物学的意义上这样进行解释 : 气候变化基本上控制着树木合成养分的过程 , 树木年轮宽度的不同主要是因为树木在生长季所得到的养分和激素的量不同。在潮湿的地方或良好的气候条件下 , 树木能产生充分的养分供给生长所需 , 因而能形成宽年轮。但在干燥的地方或高温、干旱的年份 , 树木内部吸收营养的竞争比较激烈 , 养分和激素在从树冠向根部运输的过程中因被消耗而减少 , 树干基部的形成层只能吸收到有限的养分 , 这种情况下就极易形成窄年轮。尽管树木年轮的宽度可能与树的种类及树木所处地点和地理环境不同而异 , 但主要还是与所处大环境的降水量和温度有关。

实际上 , 树木生长过程中每一年年轮的形成都取决于当年及生长前期的许多气候因子(主要是温度和降水) 的综合影响 , 这种影响在树木生长和年轮结构中是很重要的(吴祥定 ,1990)。

1.1 温度对树木年轮宽度的影响

在干旱半干旱地区 , 温度是影响树木生长的比较敏感的气候因子(Bhattacharyya , *et al.* ,1988 ;Bor-gaonkar *et al.* ,1999)。春季温度升高可促进形成层

活动提早和加速阴坡的积雪融化,从而相应地延长植物的生长期,有利于树木的生长(Graumlich, 1991)。生长季的温度对树木年轮宽度的影响较为复杂,研究的结果也很不一致。邵雪梅等(1991)研究发现,当年的生长季是川西云杉(*Picea balfouriana*)生长旺盛的时段,较高的气温有利于光合作用,与年轮宽度正相关。Sheppard 等(1996), Akkemik (2000)以及 Mäkinen 等(2001)的研究证明生长季开始时最低温度的升高有利于延长生长季,与年轮宽度正相关。但另有些研究发现,当生长季的温度过高而水分又不足时,生长季的高温多表现为与年轮宽度的负相关(Rolland, 1993; Larsen & MacDonald, 1995; Szeicz & MacDonald, 1996)。Gindl 等(2000)研究也发现温度较低且较短的生长季不利于树木的径向生长,这样的生长季容易形成窄年轮。这可能是因为生长季的高温容易加快土壤蒸发失水量并提高蒸汽压差,从而限制了树木的生理代谢活动,不利于树木的径向生长(Oberhuber *et al.*, 1998)。Fritts (1992)则认为生长季温度的降低常与年轮宽度负相关或不相关,而温度较高的生长季不但利于形成宽年轮,还能使晚材的密度比较大。

温度对树木生长的影响,一般表现为某年的温度状况与当年的年轮宽度变化相对应,但有的也能影响到下一年生长轮的宽窄,这在生理学上被称之为“滞后效应”(李江风等, 2000)。上一年 8~9 月的高温能减缓第二年的生长速率(Rolland, 1993; Mäkinen *et al.*, 2001)。因为这段时间的高温使土壤含水量减少,降水量不能满足树木蒸腾作用所需,这样必然动用体内所储存的水分来满足需要,并影响下一年的生长。因此树木年轮宽度多与上一年夏季的温度负相关(Bräuning, 1999; Mäkinen *et al.*, 2001)。上一年冬季的温度状况也影响着树木第二年的生长速率。当某年冬季温度偏低时,使植物叶细胞内原生质脱水,还可能因土壤冻结而导致树木根系冻死,造成来年光合作用减低,且使树木生长期缩短,从而形成窄年轮(袁玉江等, 1999)。而温暖的冬季则可以避免叶组织冻结,保证代谢活动正常,从而使树木的来年生长潜力增大(邵雪梅等, 1999)。另外,温暖的冬季还会延长生长期,有利于树木进行光合作用为下一年的生长积累较多的能量,使树木在下一生长季的径向生长加快(Fritts, 1976; Gutiérrez, 1991)。但当秋末和冬季的温度过高时,树木的呼吸作用和代谢作用加强,加速体内所储存的以供次年生长所需的营养物质的消耗,对植物的

次年生长不利。故树木年轮宽度常表现为与上一年秋末和冬季的高温负相关(Gutiérrez, 1991; Rolland, 1993; Edwards & Hanson, 1996; Cherubini *et al.*, 1997)。

1.2 降水对树木年轮宽度的影响

在干旱半干旱地区,降水也是影响树木生长的重要气候因子。Caritat 等(2000)研究发现欧洲栓皮栎(*Quercus suber*)的形成层宽度与每月(特别是秋季和冬季)的降水量正相关。但一般来讲,生长期内的降水量对树木的作用最大。许多资料证明,生长期内降水量与树木的径向生长成正相关(Stahle *et al.*, 1985; Archambault & Bergeron, 1992; Rolland, 1993; Hughes *et al.*, 1994; Stahle *et al.*, 1998; Bräuning, 1999; Akkemik, 2000),这可能是由于这期间的降水可加快光合作用产物的积累和加速植物的后期生长(Liang *et al.*, 2001)。Xiong 等(2000)还发现树木年轮的宽窄还与生长当年夏季的降水多少成正相关。但当生长季的降水量充足或过多而不再成为树木生长的限制因子时,降水与树木径向生长不相关或负相关(Fritts, 1992; Wimmer & Grabner, 1997)。

积雪融化的水分对树木的作用与降雨基本相同。因雪融的速度较慢且持续的时间较长,故降雪对树木的作用不可忽视。在干旱半干旱地区,当春夏季缺水时,山区积雪以融水的形式发挥了重要的作用(Vaganov *et al.*, 1999)。雪对树木生长的作用主要体现在两个方面:1)使前期生长得到比较完备水分,有利于后期生长能力增强;2)增加土壤水分含量。当后期水分不足时,融雪能使水分得到补偿,使树木能够正常生长(李江风等, 1984)。

降水对树木年轮宽窄的影响也具有明显的“滞后效应”。相对于温度而言,降水对树木年轮的滞后影响要大一些。若上一年降水条件好,树体内储存的养分就多,次年即使降水很少,也往往只能形成一个正常或偏窄的年轮。但若连续 2~3 年降水偏少,则必然形成窄年轮(李江风等, 2000)。Larsen 和 MacDonald(1995)在研究北美白云杉(*Picea glauca*)和美国短叶松(*Pinus banksiana*)的树木年轮和气候变化关系时发现,树木的径向生长与上一年的 7 或 8 月的降水量成正相关。这可能是由于上一年 7 或 8 月的充足降水所导致的夏季末期的土壤水分状况良好,使树木落叶减少且有利于树木进行光合作用并积累营养(Rolland, 1993; Larsen & MacDonald, 1995)。如果上一年的秋冬季降水量比较丰富,树体内就有可能储存足够的水分供来年生长所需。因此,树

木年轮宽度还与上一年秋冬季的降水量正相关 (Fritts, 1992; Rolland, 1993; Larsen & MacDonald, 1995; Oberhuber *et al.*, 1998; Liang *et al.*, 2001)。但当上一年秋冬季的累计降雨量达到一定的极限值之后, 次年的年轮宽度反而与其负相关 (Caritat *et al.*, 2000)。

1.3 温度和降水对树木年轮宽度的综合影响

树木在满足一定的温度和湿度的情况下开始生长。温度和降水常常是相互制衡, 共同作用的。例如, 积雪厚度及积雪融化的时间与冬季的降水和夏季的温度都有关系。冬季较多的降水利于降雪积累, 而夏季温度升高则可加速积雪融化和加快树木形成层的活动 (Groisman *et al.*, 1994)。Peterson 和 Peterson (1994) 在研究气候变化与生长在美国北卡斯克德山脉的亚高山针叶树木径向生长与气候变化的关系时, 发现气候变化对亚高山森林的影响主要依赖于冬季积雪的积累厚度和春季雪融化的速度。春季积雪融化时间提前和较暖的夏季有利于北部山坡树木的生长, 与树木年轮宽度成正相关, 但却有可能加快山脊和南坡上夏季的干旱频率并使夏季的干旱程度更加严重, 从而加剧本已存在的土壤湿度的不足并限制树木的生长, 与年轮宽度负相关 (Peterson & Peterson, 1994; Vaganov *et al.*, 1999)。

在干旱半干旱地区, 受温度和降水共同调控引起的土壤湿度是树木年轮径向生长的主要限制因子 (Tessier *et al.*, 1989; Szeicz & Macdonald, 1996; Borgeonkar *et al.*, 1999; Bräuning, 1999)。Graumlich (1991) 认为, 温度和降水的综合作用对树木生长的影响大致可分为以下 3 种类型: 1) 干旱的胁迫。高温和低降水量的联合作用引起的干旱提高了水分胁迫并由此降低了光合作用 (Fritts *et al.*, 1965a), 不利于储存光合作用产物以供树木生长所需。2) 短而冷的生长季的交互作用。生长季中低温和高降水量的联合作用 (如厚且持久的积雪) 使光合作用降低 (Fritts, 1976), 不利于树木生长。3) 温度-降水的相互作用。低降水量的冬季引起的干旱胁迫以及高降水量的冬季所引起的低温都会限制树木的生长 (Graumlich, 1991)。

受温度和降水共同调整引起的土壤湿度对树木生长的影响具体表现为: 当降水量低于一定值时, 温度的高低和树木年轮宽度的生长呈现明显的负相关性, 而且降水量越少这种负相关性越显著; 在降水适宜的情况下, 温度对树木生长的影响不明显; 而在降水高于某一极限值时, 随着温度的上升, 树木的生

长达到某一最高值, 而后温度的升高对树木生长的影响不大 (张志华等, 1996)。这可能是因为, 在温度满足树木生长的情况下, 温度升高, 增加林区的蒸发量, 降低森林的土壤含水量, 从而抑制树木的生长。且这种影响在降水稀少的情况下更为明显。而在降水适宜的情况下, 树木本身对降水的正需求和因温度增高而导致森林土壤含水量的降低所产生的负影响, 在某种情况下相互持平。当降水比较充分时, 降水不再是树木生长的限制因子, 树木对温度的需要则明显地表现出来。

1.4 太阳辐射对树木年轮宽度的影响

一般情况下, 太阳辐射能量高常会导致高温少雨。高强度的太阳辐射能抑制树木的生长 (Oberhuber *et al.*, 1998; Liang *et al.*, 2001)。当树木在当年生长季节需要适宜的温度和充分的降雨量时, 高强度的太阳辐射使表土的湿度降低而不利于植物根系吸收土壤肥力, 结果必然减缓树木的生长 (Rolland, 1993; Oberhuber *et al.*, 1998)。例如, 适于在湿地环境中生长的柏树即使在土壤水分饱和的状况下, 如果遭受到强烈的太阳辐射和高温, 也有可能引起干旱, 不利于树木生长, 以致形成窄年轮。这主要是因为强烈的太阳辐射使树木的蒸腾作用速率超过吸水速率, 导致蒸汽压的不连续, 使水分不能满足树木生长需要 (Rolland, 1993)。

另外, 太阳辐射能量的高低还与坡度、坡向等环境因子有关 (Rolland, 1993)。Oberhuber 等 (1998) 还发现山体的南坡较北坡吸收的太阳辐射能量高, 而导致南坡春季早期的干旱程度要比北坡严重得多。这种现象或许可部分地解释树木年轮的宽窄与坡度和坡向的相关关系。

1.5 季风对树木年轮宽度的影响

在受季风影响的地区, 当年季风到来之前的气候 (温度和降水) 是树木生长的主要限制因子, 树木年轮宽度的增加与当年雨季的气候变化关系不大。季风对树木生长的影响也主要体现在由季风所引起的温度和降水的变化对树木生长发挥作用, 由温度和降水共同决定的土壤湿度是决定树木生长的主要限制因子 (Borgeonkar *et al.*, 1999; Bräuning, 1999)。

例如, 在受西南季风影响的喜马拉雅山西部地区, 降水集中在受季风影响的雨季, 树木年轮宽度的增加与当年雨季的气候变化关系不大。雨季到来之前的几个月 (3~5 月) 的气候 (温度和降水) 是树木生长的主要限制因子。其中, 树木年轮宽度跟降水正相关, 与温度负相关。这些地区从 3 月起温度开

始上升,到雨季来临之前的5月达到生长季的最高温,但在这个季节的降水却很稀少。这几个月的高温加快了蒸发,由此引起的蒸发和蒸腾失水导致土壤湿度的降低而不利于树木的生长(Borgaonkar *et al.*, 1999)。这个季节的少量降水将有利于树木年轮的生长。5月之后,由于雨季的到来,温度不再是树木生长的限制因子(Borgaonkar *et al.*, 1999)。

而在不受季风影响的地方,主要是由温度和降水共同调控的土壤湿度对树木生长的过程起着非常重要的作用。这些地方一年中的5~8月的温度最高,降水稀少。由温度决定的土壤湿度是树木生长的限制因子,与树木年轮宽度负相关。这几个月中的少量降水能加快树木的径向生长,并与其正相关(Borgaonkar *et al.*, 1999)。

1.6 CO₂ 浓度对树木年轮宽度的影响

上一世纪以来,由于人类活动的加剧使地球上的CO₂ 浓度不断上升(Woodwell *et al.*, 1983)。大气中不断上升的CO₂ 浓度直接影响植物的生长、生产力和净光合作用(Lemon, 1983; Emanuel *et al.*, 1985; Solomon, 1986; LaDeau & Clark, 2001)。对于CO₂ 浓度的升高对树木生长的影响,人们得出的研究结果较不一致。

LaMarche 等(1984)以及 Graybill 和 Shiyatov (1989)提出 CO₂ 浓度的升高可加快高海拔地带树木的径向生长。他们在研究美国加利福尼亚南部干旱地区和科罗拉多州洛矶山脉的亚高山森林上限(3 100 m)的几种松树(*Pinus longaeva*, *P. aristata*, *P. flexilis*)的生长与气候变化的关系时发现,1950~1980年间的树木生长与气候变化没有明显的相关。他们因而提出假设:可能是因为空气中不断增加的CO₂ 浓度引起的“施肥效应”促进了亚高山针叶树的径向生长(LaMarche *et al.*, 1984a; Graybill & Shiyatov, 1989)。人工控制的温室及田间试验证明了CO₂ 浓度的升高可加快高海拔地带植物的径向生长(Green & Wright, 1977; Rogers *et al.*, 1983; Ceulemans & Mousseau, 1994; Körner & Diemer, 1987)。Mooney 等(1964)在实验室的试验则证明CO₂ 浓度的降低可限制有些植物的径向生长。另有一些研究也发现CO₂ 浓度的升高可加快高海拔自然植被的径向生长(Nicolussi *et al.*, 1995)。

但以上实验多是一些控制实验且研究对象大部分是一年生植物,对多年生植物的研究通常只限于很短时间的观测。另有些科学家的研究发现自然环境下树木生长和CO₂ 浓度之间并没有确定的联系。

如 Kienast 和 Luxmoore (1988)研究发现在科罗拉多州洛矶山脉高海拔处的树木年轮宽度变化与CO₂ 的施肥效应成负相关。Graumlich(1991)也发现加利福尼亚州内华达山脉针叶树的径向生长与CO₂ 浓度的升高没有直接的关系。而 Jacoby 和 D'Arrigo (1997)则认为CO₂ 浓度升高对自然生态系统树木径向生长的施肥效应是非常有限的。

虽然大量的研究工作试图评价大气CO₂ 浓度升高和变暖是否有利于植物的生长,但目前尚无定论(Ceulemans & Mousseau, 1994; 蒋高明等, 1997)。植物对气候变暖和CO₂ 浓度升高的反应,既与树种的不同及降水量的多少有关,也与树木所处的海拔及土壤水分和土壤营养等环境条件密切相关(Graumlich, 1991; Ceulemans & Mousseau, 1994)。因此,研究自然环境条件下的CO₂ 浓度的增加及由温室效应所导致的大气温度的升高对生态系统的影响是当前生态研究的焦点问题之一。研究时如能将CO₂ 浓度与温度及降水变化结合起来综合考虑其对树木生长的影响,将有望得出较好的结果。

1.7 其它气候因子与树木年轮宽度的关系

Fritts 等(1965b)提出树木年轮生长状况沿生态梯度变化而不同。后来 LaMarche (1974a; 1974b)及 Kienast 等(1987)的研究则表明在亚高山地区,由坡度、坡向等地形条件决定的温度、湿度等条件是决定树木径向生长的主要因素。LaMarche 等(1984b)研究发现火山喷发可引起霜冻轮的形成, Yamaguchi 等(1997)还发现地震对树木年轮的宽度也有一定的影响。还有些研究表明树木的种类不同,对气候变化的响应特征也不相同(Becker, 1989; Peterson & Peterson, 1994; Tardif & Bergeron, 1997; Xiong *et al.*, 2000)。随着人们对气候变化和树木年轮形成原因和结构特点认识的加深,有关气候变化与树木径向生长关系的研究范围将越来越广泛。

2 研究方法进展

树木年轮与气候变化之间关系的研究是一项十分复杂的工作,主要是基于木质部生长层变化能够响应环境条件这样的事实,依据树木年轮气候学和数理统计学等基本原理,并通过年轮宽度等生长量与各种气候因子的相关分析,来进行树木年轮与气候变化的关系及其应用方面的研究。其中,最初主要是利用年轮量测仪器与计算机联机使用,从而得到树木年轮宽度值(吴祥定, 1990),再根据所测得的树木年轮宽度数据建立树轮年表并结合现有气象资

料来重建过去的气候和环境变化。但重建的精度和可靠性在很大程度上取决于树木年轮定年的准确性和能否最大限度地剔除非气候环境因子对树木生长的影响。20 世纪 80 年代初, Meko(1981)、Cook(1985)等提出了用时间序列模式消除树木生长持续性和树木相互竞争产生的非同步扰动在气候重建过程中的影响的方法, 在干旱、半干旱地区或森林上限附近等特殊生境研究的基础上, 使在湿润地区和森林内部的研究取得了较大的进展(Wiles *et al.*, 1996; Jacoby & D'Arrigo, 1997)。

20 世纪 60 年代, X 射线技术成功地应用于树木年代学研究中, 并发展了以木材密度为环境代用资料的测量技术(Polge, 1970)。木材密度作为树轮细胞直径及木质部细胞壁厚度和细胞腔大小等结构的间接反映, 它包含了从年轮宽度中无法提取的环境信息(Parker & Henoch, 1971; Wimmer & Grabner, 2000; D'Arrigo & Jacoby, 1999)。但由于密度分析所用的仪器相当昂贵, 操作过程也比较繁琐, 目前这方面的研究主要集中在欧美几个国家的树木年轮实验室中。

随着年轮密度越来越受树木年代学家的重视, 便产生了用图像分析技术获取图像亮度资料的研究(Thetford *et al.*, 1991)。图像分析把树木年轮对可见光的反射程度作为指标, 研究指标变化与气候变化之间的关系。其物质基础是年轮细胞大小和细胞壁厚度受环境因子影响而显示的差异(邵雪梅, 1997)。由于细胞大小和细胞壁厚度会直接影响年轮灰度, 可以从年轮灰度中提取气候变化信息(刘洪滨等, 1996; 邵雪梅, 1997)。利用图像分析能同时得到年轮宽度、早材宽度、晚材宽度、早材反射亮度、晚材反射亮度、整个轮的平均亮度等 8 个指标(邵雪梅, 1997)。研究证明, 采用图像分析系统与树轮宽度测量仪两种不同的途径得到的年轮宽度系列基本相同, 说明图像分析结果在树轮气候学分析中是可信的(刘洪滨等, 1996)。图像分析是继 X 射线密度分析之后的树木年代学研究技术上的又一大进步, 这项技术的应用使计算机系统代替价格昂贵与繁杂的密度分析仪, 在不影响分辨率和数据质量的前提下, 大大减轻了劳动量, 降低了实验成本(Thetford *et al.*, 1991; 刘洪滨等, 1996; Sheppard *et al.*, 1996; 邵雪梅, 1997)。

先进的树轮分析仪器 Dendro-2003 densitometer 和 WinDENDRO 的发明和应用, 使得图像分析技术获取图像资料的研究水平也相应有所提高。这两种

仪器都是在基于 X 射线技术的基础上, 利用高分辨率的光扫描仪代替摄像机, 通过平板扫描仪直接获取树轮信息, 并运用计算机手段和数字图像技术对树轮图像进行分析处理, 从而得到所分析样品的年轮密度或宽度值。与普通的照相机和摄像机相比, 利用高分辨率扫描仪可直接接触树轮样本, 无需额外的光学系统, 避免了放大率非线性失真问题; 同时, 稳定的冷阴极灯管也克服了因光源波动而产生的干扰, 并使得图像分析技术在质量上和精度上可以满足树木年代学研究的需求(谢昆青等, 2000)。利用 Dendro-2003 densitometer 和 WinDENDRO 仪器不仅能分析出年轮的密度, 还能同时得到年轮宽度及早、晚材宽度和早、晚材密度以及它们分别占全年年轮的总宽度和总密度的百分比等多项指标, 这样就大大地节省了时间。但由于 X 射线密度分析法对切片样本的处理有很高的要求, 并且需要多次转换及复杂的维护管理, 一般情况下, WinDENDRO 多用来测量树木年轮的宽度。Savva 等(2002) 利用 Dendro-2003 densitometer 研究了种植在中西伯利亚的南部针叶林带的欧洲赤松(*Pinus sylvestris*) 的年轮, 成功地得到了不同起源的欧洲赤松年轮中遗传基因和环境条件的关系。Abrams 等(1997; 1998) 也利用 WinDENDRO 成功地研究了气候变化与树木年轮的关系。但是, 对于那些除了早晚材颜色变化以外, 还有其它因素可能引起颜色变化的树种, 或心材、边材有明显颜色变化的树种, 图像技术就无法代替密度分析(邵雪梅, 1997)。

近年来, 为了在有限的树轮宽度资料中提取更多的气候变化信息, 并使根据宽度分析的结果更加可靠, 其它学科的方法不断被引用到树轮气候学研究中来(邵雪梅, 1997)。例如, 卡尔曼滤波方法被用来描述树木生长对气候要素在不同时段的不同响应(Steele & Fiedler, 1996); 响应面分析方法被用来同时重建温度和降水两个变量(Graumlich, 1991); 贝叶斯方法被用来展示重建结果的可靠性(Van Deusen & Reams, 1996)。另外, 20 世纪 80 年代末兴起的模式研究在树木年代学研究中的应用, 保证了利用相关关系对气候要素重建的可靠性(邵雪梅, 1997)。与此同时, 新的技术也不断地被引用到树轮分析中来。这些技术的成功引用并辅以数学分析和计算机技术, 为树轮宽度与气候变化关系的研究开辟了新的领域, 并显示出广阔的研究前景。

3 应用研究

树木年轮结构对气候变化的响应的研究, 树木

年轮学最初的研究目的就是通过年轮宽度的变化规律找出气候变化的规律。自从 Douglass 确立了一套完整的从取样到定年进而了解过去环境变迁的树木年轮学的基本原理和方法以来,利用树木年轮宽度来推断环境的气候变化一直是树木年代学研究的一个主要方面。目前,世界各国均在利用树木年轮宽度重建古气候变化的研究方面,无论是从长时期气候要素的重建还是某个短时期的甚至 1 个月以内的气候变化的认识(Byram & Doolittle, 1950 ; Mäkinen *et al.*, 2001)都取得了可喜的成绩。其中,英国成功地重建了爱丁堡 1721 ~ 1975 年间的温度(Hughes, 1984);美国重建了 1 000 多年来的温度(Graybill & Shiyatov, 1989 ; Graumlich, 1993)和降水(Graumlich, 1993);芬诺斯堪迪地区自从公元 500 年到 1990 年间的共 1 400 年的夏季温度也得到了成功重建(Briffa *et al.*, 1990)。在中国,利用树轮宽度资料重建了陕西镇安 200 多年来的初春温度(刘洪滨等, 2000)和陕西秦岭 300 多年来的季节降水(Hughes *et al.*, 1994),以及乌鲁木齐河 360 年的径流量变化(李江风等, 1997)和青海都兰 1 835 多年来的气候变化(康兴成等, 1997)。

大范围的森林虫害、火灾、旱灾等不利因素对树木生长的影响都能在年轮结构和年轮宽度的变化模式上反映出来(Schweingruber, 1996),因而,可利用树木年轮宽度特征来分析和重建森林干扰历史(Fritts, 1976 ; Schweingruber, 1988 ; Veblen *et al.*, 1991a ; 1991b ; Nowack & Abrams, 1997 ; 夏冰等, 2001)。近年来,通过利用树木年轮序列中提取的信息来重建森林干扰的应用研究受到了广大生态学家的重视,相关研究范围越来越广泛,如干旱(Jenkins & Pallardy, 1995)、涝灾(Holmes *et al.*, 1979)、虫害(Veblen *et al.*, 1991b)、火灾(Swetnam, 1993)、火山爆发(LaMarche & Hirschboeck, 1984b)等干扰事件都得到了很好的研究和重建。另外,通过利用树木年轮资料, Jones 等(1984)还研究了英国南部的河流量变化, Schweingruber(1988)和 Hughes 等(1982)也研究了当地的极端气候变化状况。McClenahan(1995)则概括阐述了如何利用树木年轮分析的方法来恢复森林的干扰历史。

随着人类活动的加剧和现代工业的发展,以及伐木毁林的不断增加,大气中的 CO₂ 等温室气体也日趋升高。研究温室气体浓度增加及由温室效应所导致的大气温度的升高对生态系统的影响是当前生态学研究的热点之一。近年来,随着全球变化及其

对陆地生态系统的影响日益受到关注,树木年轮资料由于定年准确、连续性强和分辨率高等特点,利用年轮资料来研究和预测环境因素(尤其是气候因素)对树木生长和森林结构与功能影响的研究也逐渐受到重视(Johnson & Fryer, 1989 ; 兰涛等, 1994 ; Szeicz & MacDonald, 1994 ; 王森等, 1995 ; Jacoby *et al.*, 1997)。这些研究在帮助人们了解和研究古气候变化对森林植被的影响,以及预测未来全球变化对陆地生态系统的影响等方面有重要的理论和现实意义。

另外,虽然作物的产量与树木的生长之间没有直接的联系,但无论作物的产量还是树木的生长都与同一地区的环境变化紧密相关。这样,作物的产量和树木年轮宽度之间可能存在某种潜在的联系(梁尔源, 2001)。能否利用普遍存在的树木年轮来分析或预测作物产量,显然是一件值得尝试的有价值的工作。但这类研究在国际并不多见。袁玉江(1987)认为,当年轮与作物产量受相同的主要气候限制因子制约时,可用年轮来延长作物气候产量系列,并由此外推可得到作物气候产量的多年预报值。Vaganov(1990)提出的用年轮宽度序列预测作物产量的方法,以及 Vaganov 和 Kachaev(1992)提出的利用树木年轮重建小麦产量的方法等,对用树木年轮宽度变化来研究当地的作物产量具有一定的指导作用。夏冰等(1994)通过对江苏溧阳马尾松年轮的分析,与当地的作物平均产量建立回归模型,不仅较好地再现了过去 116 年的作物产量的变化趋势,而且还预测了未来短期内的作物产量的波动情况。这样,通过同一地区的树木生长和作物产量与环境变化之间的关系,进而利用年轮宽度来重建作物产量是一项非常值得尝试的研究,也使树木年代学的应用范围得到进一步的拓宽。随着人们对自然环境的认识和研究的加深,有关树木年代学的应用范围将会越来越广泛。

4 研究前景

利用树木年轮宽度的年际间变异重建过去的气候和环境变化,在全球变化研究中已被广泛应用(Cook *et al.*, 1991)。随着研究理论和技术手段的改进,除了注意温度、降水等影响外,对厄尔尼诺现象紧密关联的南方涛动指数、冰川进退、径流与水位、全球 CO₂ 增温等,利用树木年轮将得到更多的再现(吴祥定, 1990)。研究的物种和区域范围也将进一步扩大,不再仅仅局限于干旱半干旱的温带或高山地区的一些树木,甚至被埋藏的硅化木和炭化木的

年轮宽度也不断被用于气候变化分析(Briffa *et al.* , 1990)。不同种类树木的生长对气候变化表现出不同的响应特征(Peterson & Peterson ,1994 ;Tardif & Bergeron ,1997) ,也是决定未来气候变化条件下森林物种组成变化的一个重要因素 ,故物种的差别也将会成为相关研究的一个主要方面(侯爱敏等 ,1999 ; Xiong *et al.* , 2000)。另外 ,有关利用树轮资料对气候要素的重建工作及其对生态系统的影响已逐渐从中小尺度上向空间大尺度上转移。空间上大尺度地重建气候要素的过去变化 ,是树轮宽度应用研究的延伸 ,也是树木年轮气候学发展的必然方向(邵雪梅 ,1997)。

但随着科学技术的进步 ,新仪器设备的使用 ,年轮宽度不再是唯一的数据来源 ,年轮密度及细胞结构分析等正在成为研究中的新焦点(刘洪滨等 , 1996)。许多研究证明 ,年轮平均密度特别是晚材密度特征相对于年轮宽度来说对气候变化更为敏感(D 'Arrigo *et al.* ,1996 ; Wiles *et al.* ,1996)。Wimmer & Grabner(1997)则发现年轮中的树脂导管密度相对于年轮宽度特征与气候的相关更为密切。Gindl等(2000)还发现晚材的木质素和树轮宽度及最大密度一样易受气候变化的影响。D 'Arrigo 等(1992)在研究北美森林树线上的白云杉与气候变化关系过程中发现 ,树木年轮宽度与最大晚材密度虽然都是反应树木生长状况的敏感指示器 ,但它们对某些气候因子的反应互不相同却又相互补充。如果能将它们联合起来分析则能更充分地反映高海拔地带的气候变化。Hughes 等利用树轮宽度结合密度资料成功地重建了爱丁堡 1721 ~ 1975 年间 7 ~ 8 月的温度(Hughes *et al.* , 1984)和中国北中部自从 1 600 年来的降雨量(Hughes *et al.* , 1994)。更值得一提的是 ,有关树轮纤维素碳同位素的研究表明 ,纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 可独立提供与树轮宽度和密度共存的气候信息(Lipp *et al.* , 1996)。因此 ,对它进行研究与树轮宽度指数进行综合分析 ,无疑更有利于我们更准确地认识气候历史。陈拓等(2000)利用新疆昭苏云杉树轮纤维素 $\Delta^{13}\text{C}$ 与降水之间交互相关的函数关系 ,恢复了近 300 年来的新疆昭苏地区的降水变化 ,恢复的系列与历史文献记录和树轮宽度指数所揭示的历史降水有很好的对应性。

从现实的研究需要来看 ,为减少树木年轮宽度用于古气候研究中的不确定性 ,今后有关树木年轮对气候变化影响所引起的多方面响应特征综合起来进行的研究将会进一步加强。在现代科技手段作为

坚强后盾的情况下 ,各交叉学科的发展为这方面的研究提供了更广阔的应用前景 ,这一领域的研究也将会为人类的发展和社会的进步做出不可低估的贡献。

参 考 文 献

- Akkemik, Ü. 2000. Dendroclimatology of umbrella pine (*Pinus pine* L.) in Istanbul, Turkey. *Tree-Ring Bulletin*, **56**: 17 ~ 20.
- Abrams, M. C., D. A. Orwig & M. J. Dockry. 1997. Dendroecology and successional status of two contrasting old-growth oak forests in the Blue Ridge Mountains, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, **27**: 994 ~ 1002.
- Abrams, M. C., C. M. Ruffner & T. A. Morgan. 1998. Tree-ring responses to drought across species and contrasting sites in the ridge and valley of central Pennsylvania. *Forest Science*, **44**: 550 ~ 558.
- Archambault, S. & Y. Bergeron. 1992. An 802-year tree-ring chronology from Quebec boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, **22**: 674 ~ 682.
- Becker, M. 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges Mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research*, **19**: 1110 ~ 1117.
- Bhattacharyya, A., V. C. LaMarche & F. W. Telewski. 1988. Dendrochronological reconnaissance of the conifers of northwest Indian. *Tree-Ring Bulletin*, **48**: 21 ~ 30.
- Borgaonkar, H. P., G. B. Pant & K. R. Kumar. 1999. Tree-ring chronologies from western Himalaya and their dendroclimatic potential. *International Association of Wood Anatomists*, **20**: 295 ~ 309.
- Bräuning, A. 1999. Dendroclimatological potential of drought-sensitive tree stands in southern Tibet for the reconstruction of monsoonal activity. *International Association of Wood Anatomists*, **20**: 325 ~ 338.
- Briffa, K. R., T. S. Bartholin, D. Eckstein, P. D. Jones, W. Karlén, F. H. Schweingruber & P. Zetterberg. 1990. A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature*, **346**: 434 ~ 439.
- Byram, G. M. & W. T. Doolittle. 1950. A year of growth for a shortleaf pine. *Ecology*, **31**: 27 ~ 35.
- Caritat, A., E. Gutierrez & M. Molinas. 2000. Influence of weather on cork-ring width. *Tree Physiology*, **20**: 893 ~ 900.
- Ceulemans, R. & M. Mousseau. 1994. Effects of elevated atmospheric CO_2 on wood plants. *New phytologist*, **127**: 425 ~ 446.
- Chen, T. (陈拓), D. H. Qin(秦大河), J. F. Li(李江风), J. W. Ren(任贾文), X. H. Liu(刘晓宏) & W. Z. Sun(孙维贞). 2000. Study on climatic signification of fir tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ from Zhaosu Country of Xinjiang region, China. *Journal of Glaciology and Geocryology (冰川冻土)*, **22**: 347 ~ 352. (in Chinese with English abstract)
- Cherubini, P., F. H. Schweingruber & T. Forester. 1997. Morphology and ecological significance of intra-annual radial cracks in living conifers. *Trees*, **11**: 216 ~ 222.
- Cook, E. R. 1985. A time series approach to tree-ring standardization. Ph. D. dissertation of University of Arizona, Tucson, AZ, USA.
- Cook, E., T. Bird, M. Peterson, M. Barbetti, B. Buckley, R. D'Arrigo, R. Francey & P. Tans. 1991. Climate change in Tasmania inferred from a 1089-year tree-ring chronology of Huon pine. *Science*, **253**: 1266 ~ 1268.
- D'Arrigo, R. D., G. C. Jacoby & R. M. Free. 1992. Tree-ring width and maximum latewood density at the North American tree line: parameters of climatic change. *Canadian Journal of Forest Research*, **22**: 1290 ~ 1296.

- D'Arrigo, R. D., E. R. Cook & G. C. Jacoby. 1996. Annual to decadal-scale variations in northwest Atlantic sector temperatures inferred from Labrador tree rings. *Canadian Journal of Forest Research*, **26**: 143 ~ 148.
- D'Arrigo, R. D. & G. C. Jacoby. 1999. Northern North American tree-ring evidence for regional temperature changes after major volcanic events. *Climatic Change*, **41**: 1 ~ 15.
- Douglass, A. E. 1914. A method for estimating rainfall by the growth of trees. In: Huntington, E. ed. *The climatic factors as illustrated in arid America*. Lancaster, Pennsylvania: Carnegie Institute of Washington Publication. **192**: 101 ~ 121.
- Douglass, A. E. 1920. Evidence of climatic effects in the annual rings of trees. *Ecology*, **1**: 24 ~ 32.
- Edwards, N. T. & P. J. Hanson. 1996. Stem respiration in closed canopy upland oak-forest. *Tree Physiology*, **16**: 433 ~ 439.
- Emanuel, W. R., H. H. Shugart & M. L. Stevenson. 1985. Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. *Climatic Change*, **7**: 29 ~ 43.
- Fritts, H. C., D. G. Smith & M. A. Stokes. 1965a. The biological model for paleoclimatic interpretation of Mesa Verde tree-ring series. *American Antiquity*, **31**: 101 ~ 121.
- Fritts, H. C., D. G. Smith, J. W. Cardis & C. A. Budelsky. 1965b. Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in northern Arizona. *Ecology*, **46**: 393 ~ 401.
- Fritts, H. C. 1966. Growth-rings of trees: their correlation with climate. *Science*, **154**: 973 ~ 980.
- Fritts, H. C. 1969. Bristlecone pine in the White Mountains of California: growth and ring-width characteristics. In: *Papers of the Laboratory of Tree-ring Research*, University of Arizona, No. 4. Tucson: The University of Arizona Press.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree rings and climate*. London: Academic Press. 534.
- Fritts, H. C. 1991. *Reconstruction large-scale climate patterns from tree-ring data*. Tucson: The University of Arizona Press.
- Fritts, H. C. 1992. Dendrochronological modeling of the effects of climatic change on tree-ring width chronologies from the Chaco Canyon area, southwestern United States. *Tree-Ring Bulletin*, **52**: 31 ~ 58.
- Gindl, W., M. Grabner & R. Wimmer. 2000. The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width. *Trees*, **14**: 409 ~ 414.
- Graybill, D. A. & S. G. Shiyatov. 1989. A 1009 year tree-ring reconstruction of mean June-July temperature deviations in the Polar Urals. In: *Tree-Ring Bulletin*, 1997, special issue (Reprinted from Nobel, R. D., J. L. Martin & K. F. Jensen eds. 1989. Symposium on air pollution effects of vegetation. USDA forest service, northwestern forest experiment station. 37 ~ 42).
- Graumlich, L. J. 1991. Subalpine tree growth, climate, and increasing CO₂: an assessment of recent growth trends. *Ecology*, **72**: 1 ~ 11.
- Graumlich, L. J. 1993. A 1000-year record of temperature and precipitation in Sierra Nevada. *Quaternary Research*, **39**: 249 ~ 255.
- Green, K. & R. Wright. 1977. Field response of photosynthesis to CO₂ enhancement in ponderosa pine. *Ecology*, **58**: 687 ~ 692.
- Groisman, P. Y., T. R. Karl & R. W. Knight. 1994. Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures. *Science*, **263**: 198 ~ 200.
- Gutiérrez, E. 1991. Climate tree-growth relationships for *Pinus uncinata* Ram. in the Spanish pre-Pyrenees. *Acta Oecologia*, **12**: 213 ~ 225.
- Holmes, R. L., C. W. Stockton & V. C. LaMarche Jr. 1979. Extension of river flow records in Argentina from living tree-ring chronologies. *Water Resources Bulletin*, **15**: 1081 ~ 1085.
- Hou, A. M. (侯爱敏), S. L. Peng (彭少麟) & G. Y. Zhou (周国逸). 1999. The study of the reconstruction of tree rings to the climate change and its application. *Ecologic Science (生态科学)*, **18**: 16 ~ 23. (in Chinese with English abstract)
- Hughes, M. K., P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. 1982. *Climate from tree rings*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hughes, M. K., F. H. Schweingruber, D. Cartwright & P. M. Kelly. 1984. July-August temperature at Edinburgh between 1721 and 1975 from tree-ring density and width data. *Nature*, **308**: 341 ~ 344.
- Hughes, M. K., X. D. Wu, X. M. Shao & G. M. Garfin. 1994. A preliminary reconstruction of rainfall in North-central China since A. D. 1600 from tree-ring density and width. *Quaternary Research*, **42**: 88 ~ 99.
- Jacoby, G. C. & R. D. D'Arrigo. 1997. Tree rings, carbon dioxide, and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **94**: 8350 ~ 8353.
- Jacoby, G. C., R. D. D'Arrigo & T. Davaajamts. 1997. Mongolian tree rings and 20th-century warming. *Science*, **273**: 771 ~ 773.
- Jenkins, M. A. & S. G. Pallardy. 1995. The influence of drought on red oak group species growth and mortality in the Missiuri Ozarks. *Canadian Journal of Forest Research*, **25**: 1119 ~ 1127.
- Jiang, G. M. (蒋高明), X. G. Han (韩兴国) & G. H. Lin (林光辉). 1997. Response of plant growth to elevated [CO₂]: a review on the chief method and basic conclusions based on experiments in the external countries in past decade. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **21**: 489 ~ 502. (in Chinese with English abstract)
- Johnson, E. A. & G. I. Fryer. 1989. Population dynamics in lodgepole pine-Engelmann spruce forests. *Ecology*, **70**: 1335 ~ 1345.
- Jones, P. D., K. R. Briffa & J. R. Pilcher. 1984. River-flow reconstruction from tree rings in Southern Britain. *Journal of Climatology*, **4**: 461 ~ 472.
- Kang, X. C. (康兴成), L. J. Graumlich & P. Scheppard. 1997. The last 1835 years climates inferred from tree ring records in Dulan region, Qinghai, China. *Quaternary Sciences (第四纪研究)*, **1**: 70 ~ 75. (in Chinese with English abstract)
- Kienast, F., F. H. Schweingruber, O. U. Bräker & E. Schär. 1987. Tree-ring studies on conifers along gradients and the potential of single-year analyses. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**: 687 ~ 696.
- Kienast, F. & R. J. Luxmoore. 1988. Tree-ring analysis and conifer growth responses to increased atmospheric CO₂ levels. *Oecologia*, **76**: 487 ~ 495.
- Körner, C. & M. Diemer. 1987. *In situ* photosynthetic response to light, temperature and carbon dioxide in herbaceous plants from low and high latitude. *Functional Ecology*, **1**: 179 ~ 194.
- LaDeau, S. L. & J. S. Clark. 2001. Rising CO₂ levels and the fecundity of forest trees. *Science*, **292**: 95 ~ 98.
- LaMarche, V. C. Jr. 1974a. Paleoclimatic inferences from long tree-ring records. *Science (Washington)*, **183**: 1043 ~ 1048.
- LaMarche, V. C. Jr. 1974b. Frequency-dependent relationships between tree-ring series along an ecological gradient and some dendroclimatic implications. *Tree-Ring Bulletin*, **34**: 1 ~ 20.
- LaMarche, V. C. Jr., D. A. Graybill, H. C. Fritts & M. R. Rose. 1984a. Increasing atmospheric and carbon dioxide: tree ring evidence for growth enhancement in annual vegetation. *Science*, **225**: 1019 ~ 1021.
- LaMarche, V. C. Jr. & K. K. Hirschboeck. 1984b. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. *Nature*, **307**: 121 ~ 126.

- Lan, T. (兰涛), B. Xia(夏冰) & S. A. He(贺善安). 1994. Tree ring analysis on relation of *Pinus massoniana* growth to climate factors. Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 5: 422 ~ 424. (in Chinese with English abstract)
- Larsen, C. P. S. & G. M. MacDonald. 1995. Relations between tree-ring widths, climate, and annual area burned in the boreal forest of Alberta. Canadian Journal of Forest Research, 25: 1746 ~ 1755.
- Lemon, E. R. 1983. CO₂ and plants: the response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide. Boulder, Colorado: Westview Press.
- Li, J. F. (李江风) & Y. J. Yuan (袁玉江). 1984. Affect of snow in the tree-ring. Journal of Xinjiang University (Nature Science) (新疆大学学报(自然科学版)), 2: 85 ~ 92. (in Chinese with English abstract)
- Li, J. F. (李江风), Y. J. Yuan (袁玉江) & X. Y. You (由希尧). 1997. 360 years' runoff reconstruction in Urumqi river basin using tree rings. Quaternary Sciences (第四纪研究), 2: 131 ~ 146. (in Chinese with English abstract)
- Li, J. F. (李江风), Y. J. Yuan (袁玉江) & X. Y. You (由希尧). 2000. The study on tree ring hydrology and its applications. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Liang, E. Y., X. M. Shao, Y. X. Hu & J. X. Lin. 2001. Dendroclimatic evaluation of climate-growth relationships of Meyer spruce (*Picea meyeri*) on a sandy substrate in semi-arid grassland, north China. Trees, 15: 230 ~ 235.
- Liang, E. Y. (梁尔源). 2001. A dendroecological study of *Picea meyeri*. Ph.D. dissertation of Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract)
- Lipp, J., P. Trimbom, T. W. D. Edwards, W. Graf & B. Becker. 1996. Climate signals in ²H and ¹³C chronology (1882-1989) from tree rings of spruce (*Picea abies* L.), schussbach forest, Germany. In: Dean, J. S., M. Meko & T. W. Swetnam eds. Tree rings, environment and humanity. Tucson: University of Arizona Press. 603 ~ 610.
- Liu, H. B. (刘洪滨), X. D. Wu (吴祥定) & X. M. Shao (邵雪梅). 1996. A preliminary study on climate change research during historical time using image analysis of tree ring in Kangding area, Sichuan province. Geographical Research (地理研究), 15: 44 ~ 51. (in Chinese with English abstract)
- Liu, H. B. (刘洪滨) & X. M. Shao (邵雪梅). 2000. Reconstruction of early-spring temperature at Zhen'an from 1755 using tree ring chronology. Acta Meteorologica Sinica (气象学报), 58: 223 ~ 233. (in Chinese with English abstract)
- Mäkinen, H., P. Nöjd & K. Mielikäinen. 2001. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst.) in south Finland. Trees, 15: 177 ~ 185.
- McClenahan, J. R. 1995. Potential dendroecological approaches to understanding forest decline. In: Lewis, T. E. ed. Tree rings as indicators of ecosystem health. Florida: CRC Press, 59 ~ 79.
- Meko, D. M. 1981. Applications of Box-Jenkins Methods of time series analysis to the reconstruction of drought from tree rings. Ph.D. dissertation of University of Arizona, Tucson, AZ, USA.
- Mooney, H. A., R. D. Wright & B. R. Strain. 1964. The gas exchange capacity of plants in relation to vegetation zonation in the White Mountains of California. American Midland Naturalist, 72: 281 ~ 297.
- Nicolussi, K., S. Bortenschlager & C. Komer. 1995. Increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from the central Alps that may be CO₂-related. Trees, 9: 181 ~ 189.
- Nowack, G. J. & M. D. Abrams. 1997. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks. Ecological Monographs, 67: 225 ~ 249.
- Oberhuber, W., M. Stumböck & W. Kofler. 1998. Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. Trees, 13: 19 ~ 27.
- Overpeck, J., K. Hughen, D. Hardy, R. Bradley, R. Case, M. Douglas, B. Finney, K. Gajewski, G. Jacoby, A. Jennings, S. Lamoureux, A. Lasca, G. MacDonald, J. Moore, M. Retelle, S. Smith, A. Wolfe & G. Zielinski. 1997. Arctic environmental change of the last four centuries. Science, 278: 1251 ~ 1256.
- Parker, M. L. & W. E. S. Hensch. 1971. The use of Engelmann spruce latewood density for dendrochronological purposes. Canadian Journal of Forest Research, 1: 90 ~ 98.
- Peterson, D. W. & D. L. Peterson. 1994. Effects of climates on radial growth of subalpine conifers in the North Cascade Mountains. Canadian Journal of Forest Research, 24: 1921 ~ 1932.
- Polge, H. 1970. The use of X-ray densitometric methods in dendrochronology. Tree-Ring Bulletin, 30: 1 ~ 10.
- Rogers, H. H., J. F. Thomas & G. E. Bingham. 1983. Response of agronomic and forest species to elevated atmospheric carbon dioxide. Science, 220: 428 ~ 429.
- Rolland, C. 1993. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the internal Alps. Tree-Ring Bulletin, 53: 1 ~ 11.
- Savva, Y., F. Schweingruber, L. Milyutin & E. Vaganov. 2002. Genetic and environmental signals in tree rings from different provenances of *Pinus sylvestris* L. planted in the southern taiga, central Siberia. Trees, 16: 313 ~ 324.
- Schweingruber, F. H. 1988. Tree rings: basics and applications of dendrochronology. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publisher.
- Schweingruber, F. H. 1996. Tree rings and environment: dendroecology. Berne: Paul Haupt Publishers. 21 ~ 39.
- Shao, X. M. (邵雪梅) & X. D. Wu (吴祥定). 1994. Tree-ring chronologies for *Pinus armandi* Franch from Huashan, China. Acta Geographica Sinica (地理学报), 2: 174 ~ 181. (in Chinese with English abstract)
- Shao, X. M. (邵雪梅). 1997. Advancements in dendrochronology. Quaternary Sciences (第四纪研究), 3: 265 ~ 271. (in Chinese with English abstract)
- Shao, X. M. (邵雪梅) & J. M. Fan (范金梅). 1999. Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-width of dragon spruce. Quaternary Sciences (第四纪研究), 1: 81 ~ 89. (in Chinese with English abstract)
- Sheppard, P. R., L. J. Graumlich & L. E. Conkey. 1996. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate. Holocene, 6: 62 ~ 68.
- Solomon, A. M. 1986. Transient response of forests to CO₂-induced climate change: simulation modeling experiments in eastern North America. Oecologia (Berlin), 68: 567 ~ 579.
- Stahle, D. W., M. K. Cleaveland & J. G. Hehr. 1985. A 450-year drought reconstruction for Arkansas, United States. Nature, 316: 530 ~ 532.
- Stahle, D. W., M. K. Cleaveland, D. B. Blanton, M. D. Therrell & D. A. Gay. 1998. The lost colony and Jamestown droughts. Science, 280: 564 ~ 567.
- Steele, B. & C. Fiedler. 1996. Kalman filter analysis of growth-climate relations in old-growth Ponderosa pine/Douglas-fir stands. In: Dean, J. S., D. M. Meko & T. W. Swetnam eds. Tree rings, environment and humanity. Tucson: Department of Geoscience, the University of Arizona. 303 ~ 314.
- Swetnam, T. W., 1993. Fire history and climate change in giant Sequoia Groves. Science, 262: 885 ~ 889.
- Szeicz, J. M. & G. M. MacDonald. 1994. Aged-dependent growth responses of subarctic white spruce to climate. Canadian Journal of Forest Research, 24: 120 ~ 132.
- Szeicz, J. M. & G. M. MacDonald. 1996. A 930-year ring-width chronology from moisture-sensitive white spruce (*Picea glauca* Moench) in the northwestern Canada. The Holocene, 6: 345 ~

- 351.
- Tardif, J. & Y. Bergeron. 1997. Comparative dendroclimatological analysis of two blank ash and two white cedar population from contrasting sites in the lake Duparquet region, northwestern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, **27**: 108 ~ 116.
- Tessier L. 1989. Spatio-temporal analysis of climate-tree ring relationships. *New Phytologist.*, **11**: 517 ~ 529.
- Thetford, R. D., D. D'Arrigo & G. C. Jacoby. 1991. An image analysis for determining dendritometric and ring-width time series. *Canadian Journal of Forest Research*, **21**: 544 ~ 549.
- Van Deusen, P. C. & G. A. Reams. 1996. Bayesian Procedures for reconstructing past climate. In: Dean, J. S., D. M. Meko & T. W. Swetnam eds. *Tree rings, environment and humanity*. Tucson: Department of Geoscience, the University of Arizona. 335 ~ 339.
- Vaganov, E. A. 1990. Method for forecasting grain yield with the aid of dendrochronological data. *Soviet Journal of Ecology*, **20**: 139 ~ 146.
- Vaganov, E. A. & A. Kachaev. 1992. Construction and usage of a complex model to illustrate the relationship between tree increment and wheat crop yield. *Lundqua Report*, **34**: 327 ~ 330.
- Vaganov, E. A., M. K. Hughes, A. V. Kirdyanov, F. H. Schweingruber & P. P. Silkin. 1999. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, **400**: 149 ~ 151.
- Veblen, T. T., K. S. Handley & M. S. Reid. 1991a. Disturbance and stand development of a Colorado subalpine forest. *Journal of Biogeography*, **18**: 707 ~ 716.
- Veblen, T. T., K. S. Handley, M. S. Reid & A. J. Rebertus. 1991b. Methods of detecting past spruce beetle outbreaks in Rocky Mountain subalpine forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **21**: 242 ~ 254.
- Wang, M. (王森), S. J. Bai (白淑菊), D. L. Tao (陶大立) & J. P. Shan (单建平). 1995. Effect of rise in air-temperature on tree ring growth of forest on Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **6**: 128 ~ 132. (in Chinese with English abstract)
- Wiles, G. C., R. D. D'Arrigo & G. C. Jacoby. 1996. Temperature changes along the Gulf of Alaska and the Pacific northwest coast modeled from coastal tree rings. *Canadian Journal of Forest Research*, **26**: 474 ~ 481.
- Wimmer, R. & M. Grabner. 1997. Effects of climate on vertical resin duct density and radial growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Trees*, **11**: 271 ~ 276.
- Wimmer, R. & M. Grabner. 2000. A comparison of tree-ring features in *Picea abies* as correlated with climate. *International Association of Wood Anatomists*, **21**: 403 ~ 416.
- Woodwell, G. M., J. E. Hobbie., R. A. Houghton, J. M. Melillo, B. Moore, B. J. Peterson & G. R. Shaver. 1983. Global deforestation: contribution to atmospheric carbon dioxide. *Science*, **222**: 1081 ~ 1086.
- Wu, X. D. (吴祥定). 1990. *Tree rings and climate change*. Beijing: Meteorology Press. (in Chinese)
- Xia, B. (夏冰), S. A. He (贺善安) & T. Lan (兰涛). 1994. A preliminary study on the relationships between tree rings of *Pinus massoniana* Lamb. and local crop yield. *Journal of Plant Resources and Environment (植物资源与环境)*, **3**: 27 ~ 32. (in Chinese with English abstract)
- Xia, B. (夏冰), F. Deng (邓飞), K. Zhou (周康), Q. Wang (王谦) & X. Dong (董旭). 2001. A case study on the verification of density of forest disturbance through tree-ring analysis. *Journal of Plant Resources and Environment (植物资源与环境学报)*, **10**: 1 ~ 6. (in Chinese with English abstract)
- Xie, K. Q. (谢昆青) & Z. Y. Li (李志尧). 2000. Method of scanning image analysis for tree-ring research and its application in environmental change. *Quaternary Sciences (第四纪研究)*, **20**: 259 ~ 269. (in Chinese with English abstract)
- Xiong, L. N. Okada & T. Fujiwara. 2000. The dendrochronological potential of the species in the Three Gorges Reservoir region of China. *International Association of Wood Anatomists*, **21**: 181 ~ 196.
- Yamaguchi, D. K., B. F. Atwater, D. E. Buunk, B. E. Benson & M. S. Reid. 1997. Tree-ring dating the 1700 Cascadia earthquake. *Nature*, **389**: 822 ~ 823.
- Yuan, Y. J. (袁玉江). 1987. Forecasting climatic output of spring-wheat in Altay county by using of tree-ring chronologies. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology (新疆气象)*, **10**: 16 ~ 19. (in Chinese with English abstract)
- Yuan, Y. J. (袁玉江) & J. F. Li (李江风). 1999. Reconstruction and analysis of 450 years' winter temperature series in the Ürtmqi river source of Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology (冰川冻土)*, **1**: 64 ~ 70. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, Z. H. (张志华), X. D. Wu (吴祥定) & J. Li (李骥). 1996. Utilizing tree ring chronologies to reconstruct 300-year drought days in eastern Tianshan Mountains. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (应用气象学报)*, **7**: 53 ~ 60. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 黄建辉 责任编辑: 张丽赫