

中国利用树轮资料重建干湿变化研究进展

王亚军, 李明启*

(中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 树木年轮资料定年准确、分辨率高、连续性强, 已成为研究过去全球变化的重要信息来源之一。中国树轮与干湿变化研究, 样点分布广泛, 研究树种较多, 重建尺度较长。基于树轮宽度、密度和同位素等各种代用指标, 在分析树木径向生长对干湿变化响应、重建历史时期干湿变化等方面取得很大进展。一般来说, 在干旱半干旱区的低海拔区域, 水分条件, 尤其是春季、秋季和年湿润状况, 是树木径向生长的重要影响因素。森林上限、相对冷湿区域以及亚热带气候区, 树木生长与降水的相关性偏弱。在时间尺度上, 基于树轮重建的长于1000年甚至超过2000年的干湿变化序列已有多条, 主要分布在青藏高原地区。目前最长年表已达4500年, 最长降水序列为3500年。本文通过对部分树轮成果的简要概括, 以期对树轮采样和干湿变化重建提供借鉴与帮助。

关键词: 树木年轮; 代用指标; 响应; 干湿变化; 气候重建; 研究进展; 中国

1 引言

自20世纪80年代国际地圈—生物圈计划(IGBP)发起以来, 关于全球及区域范围的气候与环境变化成为研究热点。过去全球变化计划(PAGES)作为IGBP的核心计划之一, 着重于高分辨率古气候资料的获取及气候重建。树木年轮资料具有季节或年的高分辨率、连续性强、分布广泛, 在历史时期气候变化研究中, 起到了不可替代的作用, 成为获取过去气候变化信息的重要来源之一(LaMarche, 1974; Hughes et al, 1984; Moberg et al, 2005; Cook et al, 2010)。

树木年轮气候学是根据树木径向生长推断和重建过去长期气候变化的科学, 注重研究气候要素(降水、气温、光等)与树木生长的关系。中国树木年轮气候学研究始于20世纪30年代, 70-80年代大范围开展, 采样、室内分析等经验也逐渐积累(吴祥定, 1990b)。迄今为止, 中国已大范围开展了树轮气候学研究。中国东部、中部及西部地区建立了大

量树木年轮年表, 如东北长白山(邵雪梅等, 1997; 陈列等, 2013; 陈力等, 2014)、包头(刘禹等, 2001)、呼和浩特(刘禹等, 1999)、华山(邵雪梅等, 1994)、贺兰山(Liu et al, 2004; 刘禹等, 2005)、川西高原(邵雪梅等, 1999)、祁连山东段(勾晓华等, 1999)和中段(Zhang et al, 2011)、柴达木盆地东北(邵雪梅等, 2006)、天山(袁玉江等, 2000)等。分析树木径向生长对气候要素变化的响应, 并利用其重建历史时期降水、气温和径流等变化, 为历史时期环境演变研究提供了可靠的科学数据。本文主要概述中国利用树轮重建干湿变化的若干研究, 分别从树轮重建干湿变化所采用的代用指标、树木径向生长对干湿变化的响应以及基于树木年轮重建干湿变化研究工作的分布等3个方面加以阐述。

2 重建区域干湿变化的树轮代用指标

目前, 利用树木年轮资料重建区域干湿变化的代用指标主要有宽度、密度、同位素和图像分析等。

收稿日期: 2016-05; 修订日期: 2016-10。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430528) [Foundation: Key Program of National Natural Science Foundation of China, No.41430528]。

作者简介: 王亚军(1973-), 女, 辽宁凌源人, 博士后, 主要从事气候变化与树轮气候学研究, E-mail: hbyjwang@163.com。

通讯作者: 李明启(1979-), 男, 山东东明人, 助理研究员, 主要从事树轮气候学研究, E-mail: limq@igsrr.ac.cn。

引用格式: 王亚军, 李明启. 2016. 中国利用树轮资料重建干湿变化研究进展[J]. 地理科学进展, 35(11): 1397-1410. [Wan Y J, Li M Q. 2016. Research progress of dry-wet climate reconstruction by tree ring in China[J]. Progress in Geography, 35(11): 1397-1410.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.11.010

树木年轮宽度是树轮气候学研究中利用最早的指标,也是重建历史时期干湿变化的主要代用指标。早在20世纪70-80年代,吴祥定等利用树轮宽度数据重建了西藏(吴祥定等,1978)和横断山区(吴祥定等,1987)过去气候演化历史,揭示了过去数百年来这2个区域的温度和降水变化过程。此后,越来越多的中国研究人员投入树轮气候学研究,利用树轮宽度数据重建了中国不同区域过去数百年至数千年的干湿变化过程(包括降水、帕默尔干旱指数PDSI等)。如内蒙古呼和浩特过去近376年来2-6月降水量演变历史的重建(刘禹等,1999),青藏高原东北部降水变化的重建(Zhang et al, 2003; Shao et al, 2005; 黄磊等, 2005; 邵雪梅等, 2006),祁连山区(勾晓华等, 2001; Gou et al, 2015)、宁夏(马利民, 刘禹, 蔡秋芳等, 2003; Liu et al, 2004)、山西(李强等, 2006)、陕西(蔡秋芳等, 2005)、河南(张艳华等, 2013)、新疆(袁玉江等, 2000; 崔宇等, 2007; 张同文等, 2008)、甘肃(刘昶智等, 2013)等地的降水变化重建等。经过多年积累,邵雪梅等在2010年发表了利用活树、死树及古墓中出土的祁连圆柏建立的当时中国最长的宽度年表(3585年),该年表反映柴达木盆地的降水变化(Shao et al, 2010)。随后, Yang等(2014)同样利用活树、死树及墓葬中祁连圆柏将中国的树轮宽度年表延长到了4500年前,并重建了柴达木盆地过去3500年的降水变化。可见,中国利用树轮宽度资料推测过去区域干湿演变历史研究取得了丰硕的成果。

树木年轮密度分析是树轮气候学研究在20世纪80年代的一个突破(吴祥定等, 1994),最早尝试用于树轮宽度变化不大的情况(吴祥定, 1990a)。中国树轮密度研究工作始于20世纪90年代初。吴祥定等(1994)在研究秦岭树木年轮密度与气候变化的关系后,指出利用密度年表分析过去气候变化是可行的。目前大量研究发现,树轮密度与温度变化密切相关,且已用于重建历史时期温度变化(Chen et al, 2009; Chen et al, 2012a; Yu et al, 2013; Chen et al, 2014)。不过众多研究成果也表明了树轮密度在干湿变化重建中具备一定潜力。研究发现,华山树轮最小密度变化与5-6月降水量显著负相关,最大密度与7月降水显著正相关(吴祥定等, 1994)。随后,根据早材最小密度重建了陕西黄陵4-6月降水序列(刘禹等, 1997)。黑龙江树轮密度与气象要素关系表明,漠河兴安落叶松最大密度与8月降水显

著负相关,樟子松最小密度与4月降水显著正相关(王丽丽等, 2005)。鄂尔多斯中部1888-2002年6-10月降水量变化则是采用油松树轮最大密度重建(杨银科等, 2013)。相对于树轮宽度指标来说,密度用于重建干湿变化的研究较少。

树轮中稳定同位素比例的变化,与气候要素变化存在着一定关联,所以国内外许多学者致力于研究树轮碳、氢和氧同位素变化。中国树轮稳定同位素研究近年发展迅速,在新疆昭苏地区(陈拓等, 2000)、天山(Xu et al, 2014a)、阿尔泰山(Xu et al, 2014b; 张瑞波等, 2015)、西藏林芝(刘晓宏等, 2002)、柴达木盆地(Wang, Liu et al, 2013)、巴塘理塘高原(An et al, 2014)、川西卧龙亚高山(靳翔等, 2013)、贡嘎山(Liu, Zhao et al, 2011)、贺兰山(马利民, 刘禹, 赵建夫等, 2003; Liu et al, 2008)和天目山(钱君龙等, 2001; Qian et al, 2002; 赵兴云等, 2005)等地的树轮同位素研究工作取得了卓越成果。

图像分析也是一种成功的树轮气候学分析方法。树轮微观结构如细胞大小、细胞壁厚度、导管的厚薄直接影响年轮灰度。寻找年轮灰度与气候变化的关系,从而提取气候变化信息。刘洪滨等(1996)首先用树轮图象分析方法研究了四川西部川西云杉年轮灰度与气候因子的相关关系。天山北坡西段博尔塔拉河流域的天山云杉树轮灰度研究表明,最大灰度与降水相关性较高,并重建了近百年来1-5月降水序列(潘娅婷等, 2007),说明利用树轮灰度参数重建干湿变化是可行的。此外,新疆伊犁雪岭云杉全轮灰度、早材灰度与6月降水相关较好(张瑞波, 喻树龙等, 2009)。此外,树轮灰度与密度呈显著负相关,使得树轮灰度能近似地反映树轮密度的变化,因而在研究中得到应用。

从已有研究成果看,年轮宽度、密度、同位素以及灰度等分析方法都已经独立地用于重建过去干湿变化且效果较为理想。不过,现在的树轮研究工作,开始倾向于尽可能采用多种指标,研究中相互印证,多途径分析,这也是树轮气候学发展的趋势之一。

3 树木年轮对干湿变化的响应研究

中国幅员辽阔,自然环境千变万化,树木生长环境各不相同,树木径向生长的限制因素相差较大。众多研究结果表明,树木径向生长受区域干湿

条件的控制,与不同月份以及不同时段干湿变化呈显著相关。本小节主要介绍树木径向生长对干湿变化的响应研究成果。

3.1 树木径向生长对干湿状况的敏感响应

在众多树轮与干湿变化响应研究中,关于树木径向生长对干湿变化的敏感响应,抽取了3个主要时段进行概述,分别为:春季、秋季和年。

3.1.1 树木径向生长与春季干湿状况

春季树木开始萌芽生长,此时降水多,早材细胞分裂速度快、数量多且体积大。早材在整个年轮中所占比例大,所以降水多,树木易形成较宽年轮;反之,则形成窄年轮。众多研究成果均表明,树木年轮宽度与春季(月份)降水呈显著正相关,春季降水量多寡是制约树木径向生长的主要因素之一。如内蒙古包头地区树木轮宽与3月、4月和5月降水量均呈显著正相关(刘禹等, 2001),呼和浩特附近油松轮宽与4月和5月降水(刘禹等, 1999)显著正相关,华山松径向生长与5月和6月降水变化(邵雪梅等, 1994)显著正相关。另外,贺兰山油松轮宽与5月降水(Liu et al, 2004),祁连山东段祁连圆柏轮宽与3月和4月降水量(勾晓华等, 1999),祁连山西段树轮宽度与4月、5月和6月降水(Liang et al, 2009),祁连山东中—柴达木盆地东北祁连圆柏轮宽与5-6月降水(Zhang et al, 2013)以及柴达木盆地东北部祁连圆柏轮宽与3月、4月和5月土壤水分(Yin et al, 2008)、与3月和5月降水(Zhang et al, 2003)均呈显著正相关。此外,东北长白山岳桦(Yu et al, 2007)、南太行山万仙山油松(彭剑峰等, 2011)、大别山油松(郑永宏等, 2012)、秦岭小陇山油松(Fang et al, 2012)、宁夏罗山油松(王亚军等, 2009)、柴达木盆地东缘青海云杉(李雁等, 2008)和喜马拉雅山糙皮桦(Dawadi et al, 2013)以及南天山北坡雪岭云杉(朱海峰等, 2004)等树木径向生长均与春季(月份)降水呈现显著正相关。

由此可见,中国大部分地区树木径向生长受到春季干湿条件的明显制约,对春季干湿状况响应显著。

3.1.2 树木径向生长与上一年秋季干湿状况

研究发现,树木径向生长除了与春季干湿变化密切相关外,还有一个重要时段也不容忽视,那就是秋季干湿状况。众多研究结果表明,秋季干湿与树木径向生长呈显著正相关。如研究发现,内蒙古海拉尔樟子松生长受到降水限制,与上年9月降水

相关系数最高(Liu et al, 2009);包头地区树木年轮宽度与上年9月和10月降水量显著正相关(刘禹等, 2001);阿尼玛卿山祁连圆柏第一主分量与上年10月降水(彭剑峰等, 2007a)、青海云杉与上年9月和10月降水(彭剑峰等, 2007b)、昌灵山油松与上年9月降水(Gao et al, 2005)、祁连山中段祁连圆柏与上年9月降水(Tian et al, 2012)均显著正相关。此外,对长白山不同海拔红松(陈列等, 2013)、宁夏罗山(王亚军等, 2009)、西藏林芝(刘晓宏等, 2003)、内蒙喀喇沁旗(Liu, Wang et al, 2011)、横断山脉(Fang et al, 2010)、山西汾河流域(Sun et al, 2012)、天山中段乌鲁木齐河流域(Xu et al, 2014a)、万仙山(彭剑峰等, 2011)、西大别山北坡(彭剑峰等, 2014)、天山中段海拔2256和2260 m的雪岭云杉(郭允允等, 2007)等的树轮气候学研究均表明,树木生长与上年秋季(月份)干湿变化呈显著正相关。

干旱地区针叶树树轮宽度与气候因子的相关关系表明,生长季前期的秋季等季节气候条件对树木生长具有显著影响(Fritts, 1976)。对青海牧草生长与气候条件的关系研究得出:如果上年秋雨多,土壤墒情好,即使春季早一些,牧草仍可正常返青;反之,如果上年秋雨少,即便春雨接近历年同期平均值,也可能发生春旱而影响牧草返青(汪青春, 1998)。Yin等(2008)的研究指出,上年秋季月份土壤水分条件的累积效应影响植被生长。可见,秋雨对自然界植被生长具有非常重要的影响。在分析树木生长对干湿变化响应时,上一年生长季末期的秋季降水也是需要重点考虑的影响要素之一。

但必须指出的是,在中国气候湿润区,降水充足,树木径向生长对干湿变化呈现出不同的响应模式。如东南亚热带地区的福建,长苞铁杉与上年9月降水呈显著负相关关系(Chen et al, 2015),这种树木的径向生长—降水响应模式与中国北方大部分研究结果不一致,可能与所处气候区有关。

3.1.3 树木径向生长与年干湿状况

树木在生长过程中,如遇降水量多的年份,则生长用水需求得到满足,径向生长速度加快,易形成宽年轮,因此树木径向生长与年干湿状况密切相关。如内蒙古海拉尔(Liu et al, 2009)、喀喇沁(Liu, Wang et al, 2011)、内蒙古赤峰和围场(Liu et al, 2010)、昌灵山(Gao et al, 2005)、宁夏罗山(Wang, Lu et al, 2013)、祁连山东段(Liu et al, 2013)和中段(Zhang et al, 2011)、横断山(Fang et al, 2010)和柴达

木盆地(邵雪梅等, 2006)等地的树轮气候学研究成果均表明, 树木径向生长受到年湿润条件的显著制约。可见, 在分析树木生长与干湿变化的相关性时, 年湿润状况也是要重点考虑和分析的条件。

3.2 树木径向生长对干湿变化的相对弱响应

以上成果均表明树木径向生长对干湿变化的敏感响应, 但也有一些区域树木径向生长与干湿变化相关关系相对偏弱。

首先是森林上限。高大山体森林上限树木生长与降水的相关性偏弱, 主要反映温度信息。如天山北坡玛纳斯河流域(齐元元等, 2013)、柴达木盆地东部(Yin, Li et al, 2016)、祁连山(Liu et al, 2005)、横断山(吴祥定等, 1987)、阿尼玛卿山(Zhang, Shao et al, 2015)、川西高原(邵雪梅等, 1999)、川西邛崃山区(徐宁等, 2013)和秦岭太白山(康永祥等, 2010)等地的树轮气候学研究皆得出类似结论。如柴达木盆地东祁连圆柏上限 100 m 范围内, 温度是树木生长的主要控制要素(Yin, Li et al, 2016); 阿尼玛卿山祁连圆柏上限树木径向生长受到低温的显著制约(Zhang, Shao et al, 2015); 川西米亚罗林区高海拔岷江冷杉生长也主要受温度限制, 与冬季最低温度呈显著正相关(徐宁等, 2013)。

其次是相对冷湿区域。如东北地区, 大兴安岭、小兴安岭和长白山树轮研究结果表明, 部分地区树木径向生长对干湿变化响应相对不明显。大兴安岭低纬度和高纬度兴安落叶松(884~1160 m)径向生长与降水未表现出显著相关关系, 降水变化对兴安落叶松径向生长的影响较小, 不属于限制该区域此树种生长的主要因子(张朋磊等, 2015)。相对温度来说, 小兴安岭不同海拔臭冷杉(海拔 319~541 m)(姚启超等, 2013)的径向生长与降水相关性较弱。长白山低海拔(598 m)红松对降水响应不明显, 主要受气温限制(陈力等, 2014); 对于长白落叶松, 低海拔(730~1258 m)树木径向生长与当年降水的相关系数未达到显著水平, 高海拔(1790 m)长白落叶松生长则受气温影响, 可能与此地水分条件能满足树木生长的生理要求有关(陈力等, 2014)。

再次是中国亚热带气候区。该区域树木生长与干湿变化的相关关系不明显。如东南地区福建的长苞铁杉, 树木径向生长与大部分月份降水相关系数较小, 而与大部分月份温度呈正相关, 且相关系数较大; 总体来看, 长苞铁杉对干湿变化的响应, 相对温度来说相对较弱(Chen et al, 2015); 大别山黄

山松径向生长与降水相关不显著, 主要受当年 2-7 月平均气温限制(郑永宏等, 2012)。另外, 东南地区的马尾松(Chen et al, 2012b)、长江下游的台湾松(Shi et al, 2010)、湖南和江西的马尾松(Duan et al, 2012)树木径向生长对干湿变化的响应也与此相似。

综上所述, 树木径向生长对干湿变化的响应表现出复杂性。一般来说, 在干旱半干旱区中低海拔地区, 树木径向生长对干湿变化的响应敏感。如何从树木年轮中准确提取这些变化信息, 是树木年轮气候学面临的复杂而艰巨的科学任务。

4 基于树轮重建干湿变化研究的空间分布

自从中国开展树轮研究以来, 取得了丰硕成果, 许多地区建立了树轮年表并重建历史时期干湿变化。图 1 展示了中国树轮研究成果分布概况(图 1 中气候区划分引自“中国气候区划新方案”(郑景云等, 2010), 并且对个别气候分区进行合并)。可见, 尽管树轮样点分布广泛, 但并不均衡, 且重建序列长短不一, 现有研究成果主要集中在中温带干旱区和高原亚寒带区。

4.1 中温带干旱半干旱区

中温带干旱区的树轮研究成果主要分布在西部的新疆及中部的内蒙等地。新疆地区树轮成果众多, 最长的树轮年表 850 年, 由帕米尔高原东北缘的昆仑圆柏树轮资料建立, 树轮宽度主要受水分条件限制(尚华明等, 2015)。其中, 长于 500 年的序列有: 北疆 526 年的年降水变化序列(袁玉江等, 1991)、阿勒泰西部 1481-2004 年 6-9 月降水量序列(张同文等, 2008)、1396-2005 年天山南坡降水序列(张瑞波, 魏文寿等, 2009)等; 还有部分重建序列少于 500 年(图 1 中紫色方块和蓝色圆点), 如新疆天山的树轮成果(袁玉江等, 2001; 喻树龙等, 2005; 崔宇等, 2007; 王劲松等, 2007; 陈峰等, 2009; 尚华明等, 2010; 张录等, 2010; 高卫东等, 2011; 张瑞波等, 2013; Xu et al, 2014a; 秦莉等, 2014)、阿尔泰山的树轮成果(Xu et al, 2014b; 陈峰等, 2015; 张瑞波等, 2015)等。

中温带干旱半干旱区中部的干湿变化重建序列一般少于 500 年。该区位置与东亚季风边缘区北部接近。东亚季风边缘是年平均降水总量 300~

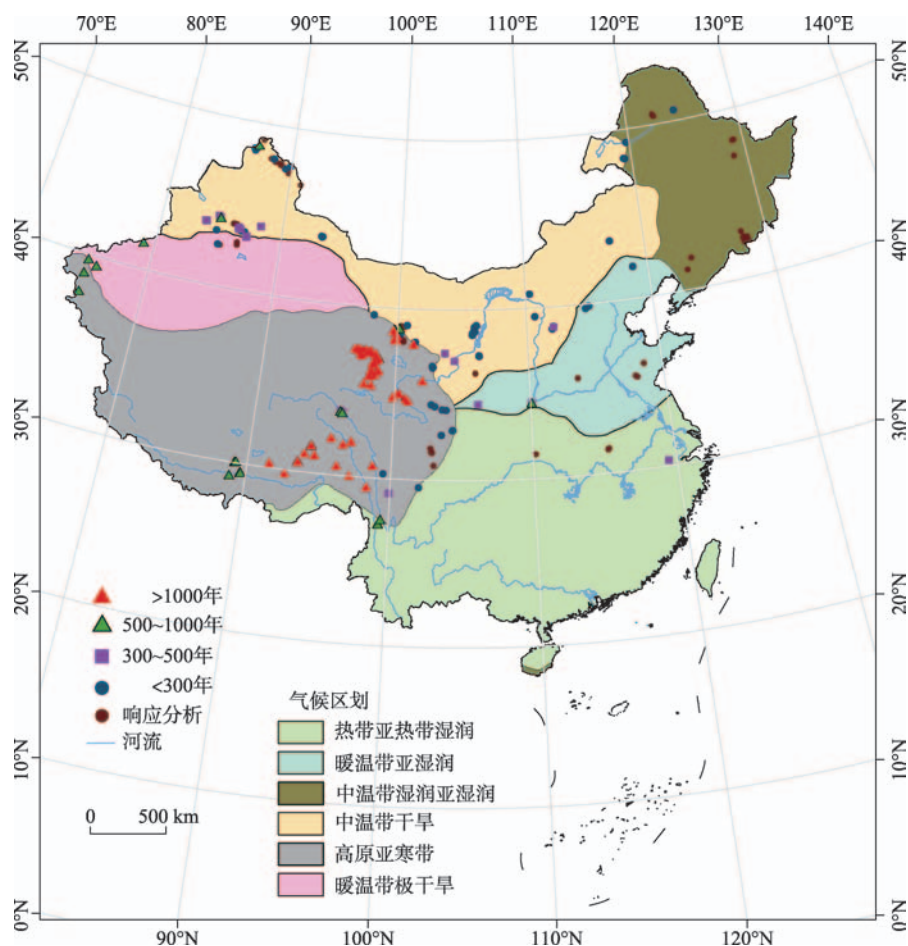


图1 中国树轮重建干湿变化分布

Fig.1 Sites of dry-wet climate reconstruction by tree ring in China

500 mm 的区域(图2), 考虑强弱季风年雨带进退(欧廷海等, 2006)的影响, 由于季风强弱年际变化大, 导致降水变率也较大, 在该区降水量本就较少的背景下(徐袁等, 2003), 致使树木径向生长对干湿变化响应敏感, 并为众多研究所证实。图1显示, 该区树轮研究成果颇多, 如采用浑善达克沙地树木轮宽恢复了1842-2004年5-7月PDSI变化(Liang et al, 2007), 依据贺兰山油松晚材轮宽重建1726-1997年5-7月降水变化(Liu et al, 2004); 此外, 还有内蒙古呼伦贝尔沙地南部樟子松(Liu et al, 2015)、内蒙古哈尔尔西山樟子松(Liu et al, 2009)、赤峰和围场油松(Liu et al, 2010)、喀喇沁油松(Liu, Wang et al, 2011)、锡林浩特白音敖包红皮云杉(Liu et al, 2003)、包头油松(刘禹等, 2001)、呼和浩特油松(刘禹等, 1999)、山西管涔山油松(李强等, 2006)、秦岭西段油松(Fang et al, 2012)、贺兰山油松(史江峰等, 2007)、昌灵山油松(Gao et al, 2005)、宁夏罗山油松(Wang, Lu et al, 2013)以及祁连山东段油松(Liu et al, 2013)

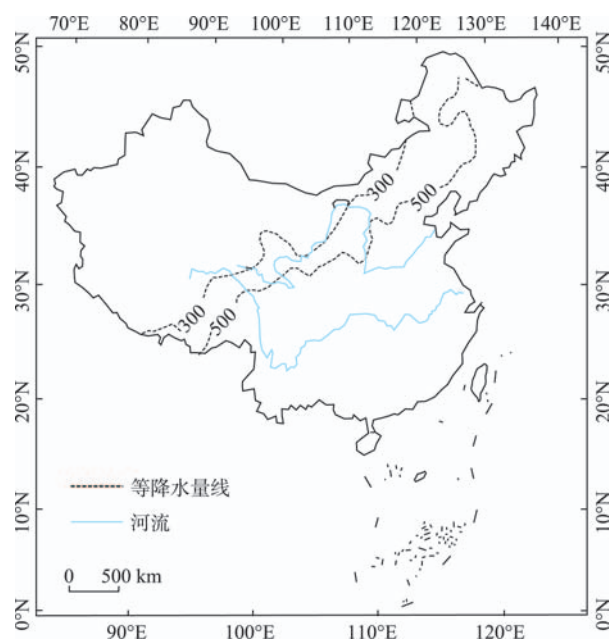


图2 中国境内东亚季风边缘(虚线范围)(欧廷海等, 2006)

Fig.2 The margin of East Asia Monsoon in China (dash line)
(Ou et al, 2006)

等的树轮气候学研究成果。

上述研究成果表明,该区域以油松为主要树种进行历史时期干湿变化重建,结合野外实地考察,油松分布西缘基本位于祁连山附近。油松采样点如贺兰山(Liu et al, 2004)、昌灵山(Gao et al, 2005)、罗山(王亚军等, 2009)和祁连山东段(Liu et al, 2013)油松径向生长对气候要素变化敏感,且响应关系基本一致。油松是中国季风边缘区、尤其是季风区西北缘树轮气候学研究的理想树种。

4.2 高寒气候区

高寒气候区的青藏高原东部,采样点密集,树轮研究成果众多,而且重建序列长。寻找长年代的树轮年表对于高分辨率的过去气候变化研究十分关键。该区域的树轮气候学研究特色是建立了中国最长的树轮年表,出现了众多长于1000年甚至超过2000年的重建干湿成果。以柴达木盆地东北的祁连圆柏树轮建立了长达4500年的序列(Yang et al, 2014),其次是3585年序列(Shao et al, 2010),并且重建了3500年的年降水序列(Yang et al, 2014),以及恢复了2847年以来的1-6月湿润状况序列(Yin, Zhu et al, 2016)。其他的长序列重建结果还

有:青海东北都兰2500多年年降水序列(Sheppard et al, 2004),都兰2326年春季降水变化(Zhang et al, 2003),柴达木盆地东北边缘1437年年降水序列(邵雪梅等, 2006),青海德令哈和乌兰1436年的土壤水分序列(Yin et al, 2008),青海都兰1150年来年降水序列(Liu et al, 2006),祁连山中段1232年的年降水序列(Zhang et al, 2011)以及祁连山东段1002年来6-7月标准化降水蒸散指数(SPEI)变化序列(Gou et al, 2015)等。此外,还有500-1000年的重建序列,如青藏高原南部(刘晶晶, 2014)、青海都兰(Huang et al, 2007)、青海省境内不同区域(王振宇等, 2005)、祁连山中段(Tian et al, 2012)、横断山(Fang et al, 2010)等地干湿变化;少于500年的重建成果如横断山(Gou et al, 2013)、巴塘理塘高原(An et al, 2014)、青海南部(秦宁生等, 2003)等。表1为中国树木年轮重建干湿变化(大于500年)的部分研究成果。

4.3 其他区域

湿润、亚湿润区树轮与干湿变化研究相对较少,采样点分布稀疏,重建序列有:华山1482-2012年4-6月降水变化序列(Chen et al, 2016)、近500年来5-6月干燥指数变化序列(刘洪滨等, 2002),秦岭

表1 中国树木年轮重建干湿变化(多于500年)的部分研究成果

Tab.1 Selected research of dry-wet climate reconstruction (more than 500a) by tree ring in China

采样点	经度/°E	纬度/°N	高度/m	树种	树轮指标	重建要素	文献
新疆北部	84.78	44.02	2510~2680	天山云杉	宽度	上年7-6月降水量	Yang et al, 2012
天山南坡阿克苏河流域	79.09	41.55	2280~3600	雪岭云杉	宽度	上年8-4月降水量	张瑞波, 魏文寿等, 2009
阿勒泰地区西部	86.84	48.66	2273	西伯利亚落叶松	宽度	6-9月降水量	张同文等, 2008
华山	110.08	34.48	2030~2050	油松华山松	宽度	4-6月降水量	Chen et al, 2016
横断山	99.29~99.45	27.31~27.59	3040~3060	川滇冷杉	宽度	上年5-4月PDSI	Fang et al, 2010
祁连山中段	99.73	38.78	2900~3150	祁连圆柏	宽度	上年8-7月降水量	Tian et al, 2012
青藏高原南部	88.88~89.61	29.25~30.1	4124~4693	大果圆柏	宽度	上年7-6月降水量	刘晶晶, 2014
青海省境内	96.13~100.13	33.8~38.85	3500~4060	祁连圆柏	宽度	5-10月降水量	王振宇等, 2005
乌兰	98.68	37.03	3100~3800	祁连圆柏	宽度	5-6月降水量	Huang et al, 2007
青藏高原东北	96.83~98.66	37.03~37.54	2877~4060	祁连圆柏	宽度	湿润状况	Shao et al, 2010
柴达木盆地东北	97.23~98.42	36.68~37.47	3660~3917	祁连圆柏	宽度	上年7-6月年降水量	Shao et al, 2005
青藏高原东北	97.15~99.97	35.45~38.7	3205~3995	祁连圆柏	宽度	年降水量	Yang et al, 2014
祁连山	101.24~101.26	37.95~37.97	3164~3265	祁连圆柏	宽度	6-7月SPEI	Gou et al, 2015
柴达木盆地	97.53	37.27	4000	祁连圆柏	宽度	生长季湿度	Wang, Liu et al, 2013
德令哈和乌兰地区	97.06~98.66	36.68~37.51	3500~3920	祁连圆柏	宽度	上年7-6月年降水量	邵雪梅等, 2006
都兰地区、东昆仑山和青海南部山脉之间	98.18~98.67	36.06~36.29	3800~4200	祁连圆柏	宽度	上年7-6月年降水量	Liu et al, 2006
青海湖天峻地区	98.40	37.31	3500	祁连圆柏	宽度	前一年年降水量	时兴合等, 2009
青藏高原	91.51~102.02	29.45~37.37	3260~4440	祁连圆柏	宽度	5-6月PDSI	Zhang, Evans et al, 2015
柴达木盆地东北	97.06~98.66	36.68~37.51	3500~3920	祁连圆柏	宽度	5-6月土壤湿度	Yin et al, 2008
都兰2326	97.67~98.33	35.83~36.5		祁连圆柏	宽度	5-6月降水量	Zhang et al, 2003

1629-2009年4-7月降水序列(Fang et al, 2012), 浙江天目山长达300多年9月降水量序列(赵兴云等, 2005), 以及大兴安岭北部阿里河过去200年冬季降水序列(吕姗娜等, 2014)等。

5 讨论和结论

海量的树轮与干湿变化研究成果, 表明了中国树轮气候学研究取得了重大进展: 采样地域广泛, 研究树种增多, 重建尺度延长。通过对所收集部分成果的归纳总结, 试图得出一定的规律, 以期为未来树轮干湿变化研究提供一定借鉴与帮助。

由于自然界条件千差万别, 树木径向生长对水热变化的响应方式也错综复杂。就收集到的中国树轮反映干湿变化成果来看, 在干旱半干旱地区, 中下限树木径向生长受水分条件制约作用明显, 高大山体树种分布上限以及相对湿润地区, 从树木径向生长中更易找到热量信号。当然这也不是一成不变的规律。要掌握树木径向生长对于水分变化的响应规律, 还需作更加细致、深入的工作, 如采样点降水、气温、地温、空气湿度、海拔、树种、坡度、坡向、土壤、生物种群、甚至土壤中微生物, 总之越详细越有利于规律的归纳与总结, 也更有利于提高判别的准确度。

自然界生长的树木, 见证并且记录了气候干湿变化。一般来说, 从较大的时间尺度看, 比如10年际, 处于同一气候区的树木, 径向生长反映的干湿变化可能一致性较强; 邻近地区的树木, 记录的干湿变化也具备同步性。尤其是对于一些较大的气候事件, 比如受海气耦合等大范围气候变化驱动机制影响的干旱事件, 因干旱强度大、影响范围广, 在半球甚至全球范围内留下痕迹, 树木径向生长会同时记录下这些事件。但如果从年际尺度看, 相同气候区甚至邻近地区树木径向生长记录的干湿变化起止时间可能存在差异, 这是由众多影响因素造成的, 如纬度、经度、高度、坡向、坡度、土壤、树种、种群和生境等。以树种为例, 即使自然界中存在其他条件完全相同的地域, 不同的树种由于自身遗传特性差异, 可能对外界变化的滞后响应方式也不同, 从而导致记录的干湿变化起止时间出现不同步。另外, 对于不同坡向条件, 树木可利用的热量水分条件存在差异, 即使是同一树种、同一海拔, 也会记录下不同的外界变化信息。

目前本文仅对部分树轮反映干湿变化工作作了一个初步总结。更为全面准确的归纳和总结还有待于日后对树轮文献进行更深入的研究。

参考文献(References)

- 蔡秋芳, 刘禹, 杨银科, 等. 2005. 陕西黄龙树轮年表的建立及其2-3月降水记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 25(2): 133-139. [Cai Q F, Liu Y, Yang Y K, et al. 2005. The reconstruction of tree-ring chronology and early spring (from February to March) precipitation information in Huanglong region, Shaanxi Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 25(2): 133-139.]
- 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 2009. 天山北坡呼图壁河流域近313年降水的重建与分析[J]. 干旱区研究, 26(1): 130-135. [Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2009. Reconstruction and analysis of precipitation in the Hutubi River Basin on the northern slope of the Tianshan Mountains during the last 313 years[J]. Arid Zone Research, 26(1): 130-135.]
- 陈峰, 袁玉江, 张同文, 等. 2015. 树轮记录的阿尔泰山北部PDSI指数变化及其对额尔齐斯河径流变化影响[J]. 干旱区资源与环境, 29(8): 93-98. [Chen F, Yuan Y J, Zhang T W, et al. 2015. Long-term drought severity variations in the northern Altay Mountains and its linkages to the Irtysh River streamflow variability[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29(8): 93-98.]
- 陈力, 尹云鹤, 赵东升, 等. 2014. 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异[J]. 生态学报, 34(6): 1568-1574. [Chen L, Yin Y H, Zhao D S, et al. 2014. Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 34(6): 1568-1574.]
- 陈列, 高露双, 张赞, 等. 2013. 长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系[J]. 生态学报, 33(4): 1285-1291. [Chen L, Gao L S, Zhang Y, et al. 2013. Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(4): 1285-1291.]
- 陈拓, 秦大河, 李江风, 等. 2000. 新疆昭苏云杉树轮纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候意义[J]. 冰川冻土, 22(4): 347-352. [Chen T, Qin D H, Li J F, et al. 2000. Study on climatic significance of fir tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ from Zhaosu County of Xinjiang region, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 22(4): 347-352.]
- 崔宇, 袁玉江, 金海龙, 等. 2007. 乌鲁木齐河源467年春季降水的重建与分析[J]. 干旱区地理, 30(4): 496-500. [Cui Y, Yuan Y J, Jin H L, et al. 2007. Reconstruction and analysis of 467-year spring precipitation series in the Urumqi River

- head[J]. *Arid Land Geography*, 30(4): 496-500.]
- 高卫东, 袁玉江, 张瑞波, 等. 2011. 树木年轮记录的天山北坡中部过去 338a 降水变化[J]. *中国沙漠*, 31(6): 1535-1540. [Gao W D, Yuan Y J, Zhang R B, et al. 2011. The recent 338-year precipitation series reconstructed from tree-ring in northern slope of Tianshan Mountain[J]. *Journal of Desert Research*, 31(6): 1535-1540.]
- 勾晓华, 陈发虎, 王亚军, 等. 2001. 利用树轮宽度重建近 280a 来祁连山东部地区的春季降水[J]. *冰川冻土*, 23(3): 292-296. [Gou X H, Chen F H, Wang Y J, et al. 2001. Spring precipitation reconstructed in the east of the Qilian Mountain during the last 280a by tree ring width[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 23(3): 292-296.]
- 勾晓华, 邵雪梅, 王亚军, 等. 1999. 祁连山东部地区树木年轮年表的建立[J]. *中国沙漠*, 19(4): 364-367. [Gou X H, Shao X M, Wang Y J, et al. 1999. The establishment of tree-ring chronology in east region of Qilian Mountains[J]. *Journal of Desert Research*, 19(4): 364-367.]
- 郭允允, 刘鸿雁, 任佳, 等. 2007. 天山中段树木生长对气候垂直梯度的响应[J]. *第四纪研究*, 27(3): 322-331. [Guo Y Y, Liu H Y, Ren J, et al. 2007. Responses of tree growth to vertical climate gradient in the middle section of the Tianshan Mountains[J]. *Quaternary Sciences*, 27(3): 322-331.]
- 黄磊, 邵雪梅. 2005. 青海德令哈地区近 400 年来的降水量变化与太阳活动[J]. *第四纪研究*, 25(2): 184-192. [Huang L, Shao X M. 2005. Precipitation variation in Delingha, Qinghai and solar activity over the last 400 years[J]. *Quaternary Sciences*, 25(2): 184-192.]
- 靳翔, 徐庆, 刘世荣, 等. 2013. 川西亚高山森林岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候要素的响应[J]. *林业科学*, 49(7): 10-15. [Jin X, Xu Q, Liu S R, et al. 2013. Relationships of stable carbon isotope of *Abies faxoniana* tree-rings to climate in the sub-alpine forest in western Sichuan[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(7): 10-15.]
- 康永祥, 刘婧辉, 代拴发, 等. 2010. 太白山不同海拔太白红杉年轮生长对气候变化的响应[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 38(12): 141-147. [Kang Y X, Liu J H, Dai S F, et al. 2010. Characteristics of ring-width chronologies of *Larix chinensis* and their responses to climate change at different elevations in Taibai Mountain[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 38(12): 141-147.]
- 李强, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 2006. 山西宁武地区 1686 年以来年降水重建[J]. *第四纪研究*, 26(6): 999-1006. [Li Q, Liu Y, Cai Q F, et al. 2006. Reconstruction of annual precipitation since 1686 A.D. from Ningwu region, Shanxi Province[J]. *Quaternary Sciences*, 26(6): 999-1006.]
- 李雁, 梁尔源, 邵雪梅. 2008. 柴达木盆地东缘青海云杉树轮细胞结构变化特征及其对气候的指示[J]. *应用生态学报*, 19(3): 524-532. [Li Y, Liang E Y, Shao X M. 2008. Variations of *Picea crassifolia* tree-ring cell structure and their implications to past climate in eastern margin of Qaidam Basin, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(3): 524-532.]
- 刘昶智, 勾晓华, 方克艳, 等. 2013. 甘肃南部公元 1824 年以来降水重建[J]. *第四纪研究*, 33(3): 518-525. [Liu C Z, Gou X H, Fang K Y, et al. 2013. Precipitation reconstruction in southern Gansu Province since A.D. 1824[J]. *Quaternary Sciences*, 33(3): 518-525.]
- 刘洪滨, 邵雪梅, 黄磊. 2002. 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[J]. *第四纪研究*, 22(3): 220-229. [Liu H B, Shao X M, Huang L. 2002. Reconstruction of early-summer drought indices in mid-north region of China after 1500 using tree ring chronologies[J]. *Quaternary Sciences*, 22(3): 220-229.]
- 刘洪滨, 吴祥定, 邵雪梅. 1996. 采用树轮图像分析方法研究历史时期气候变化的可行性[J]. *地理研究*, 15(2): 44-51. [Liu H B, Wu X D, Shao X M. 1996. A preliminary study on climate change research during historical time using image analysis of tree ring in Kangding area, Sichuan Province[J]. *Geographical Research*, 15(2): 44-51.]
- 刘晶晶. 2014. 树轮记录的青藏高原南部过去 526 年降水变化特征[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 50(3): 293-298. [Liu J J. 2014. Precipitation variations during the last 526 years inferred from tree-ring widths on the southern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 50(3): 293-298.]
- 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 2002. 西藏林芝冷杉树轮稳定碳同位素对气候的响应[J]. *冰川冻土*, 24(5): 574-578. [Liu X H, Qin D H, Shao X M, et al. 2002. Stable carbon isotope of *Abies spectabilis* from Nyingchi County of Tibet Autonomous Region and its response to climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(5): 574-578.]
- 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 2003. 西藏林芝地区近 350a 来降水变化及突变分析[J]. *冰川冻土*, 25(4): 375-379. [Liu X H, Qin D H, Shao X M, et al. 2003. Variation and abrupt change of precipitation in Nyingchi Prefecture of Tibet Autonomous Region in past 350 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(4): 375-379.]
- 刘禹, 蔡秋芳, 马利民, 等. 2001. 树轮降水记录及东亚夏季风强弱变化: 以内蒙古包头地区为例[J]. *地学前缘*, 8(1): 91-97. [Liu Y, Cai Q F, Ma L M, et al. 2001. Tree ring precipitation records from Baotou and the East Asia summer monsoon variations for the last 254 years[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(1): 91-97.]

- 刘禹, 马利民. 1999. 树轮宽度对近376年呼和浩特季节降水的重建[J]. 科学通报, 44(18): 1986-1992. [Liu Y, Ma L M. 1999. Reconstruction of seasonal precipitation from tree ring widths in the past 376 years in Hohhot region[J]. Chinese Science Bulletin, 44(18): 1986-1992.]
- 刘禹, 王雷, 史江峰, 等. 2005. 利用贺兰山北部树轮资料重建过去270年以来6-8月平均干燥指数[J]. 第四纪研究, 25(5): 540-544. [Liu Y, Wang L, Shi J F, et al. 2005. Reconstruction of mean drought index from June to August for the last 270 years using tree ring data in the northern Helan Mountain[J]. Quaternary Sciences, 25(5): 540-544.]
- 刘禹, 吴祥定, 邵雪梅, 等. 1997. 树轮密度、稳定C同位素对过去近100a陕西黄陵季节气温与降水的恢复[J]. 中国科学: 地球科学, 27(3): 271-276. [Liu Y, Wu X D, Shao X M, et al. 1997. Reconstruction of seasonal temperature and precipitation variations based on tree-ring density and stable carbon isotope on the past 100a from Huangling, Shaanxi Province[J]. Science in China: Earth Sciences, 27(3): 271-276.]
- 吕姗姗, 王晓春. 2014. 大兴安岭北部阿里河樟子松年轮气候响应及冬季降水重建[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 46(2): 110-116. [Lv S N, Wang X C. 2014. Growth-climate response and winter precipitation reconstruction of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in A'li River of Greater Khingan Range[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 46(2): 110-116.]
- 马利民, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 2003. 贺兰山树轮晚材宽度记录中的降水量变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(4): 109-114. [Ma L M, Liu Y, Cai Q F, et al. 2003. The precipitation records from tree-ring latewood width in the Helan Mountain[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 23(4): 109-114.]
- 马利民, 刘禹, 赵建夫, 等. 2003. 树木年轮中不同组分稳定碳同位素含量对气候的响应[J]. 生态学报, 23(12): 2607-2613. [Ma L M, Liu Y, Zhao J F, et al. 2003. Response of stable-carbon isotope composition of different tree-ring compounds to climatic change[J]. Acta Ecologica Sinica, 23(12): 2607-2613.]
- 欧廷海, 钱维宏. 2006. 东亚季风边缘带上的植被变化[J]. 地球物理学报, 49(3): 698-705. [Ou T H, Qian W H. 2006. Vegetation variations along the monsoon boundary zone in East Asia[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(3): 698-705.]
- 潘娅婷, 袁玉江, 喻树龙, 等. 2007. 采用树轮图像分析法重建过去气候变化[J]. 干旱区研究, 24(2): 255-260. [Pan Y T, Yuan Y J, Yu S L, et al. 2007. Feasible study on the deduced paleoclimate change using image analysis of tree-ring from the Bortala River Basin[J]. Arid Zone Research, 24(2): 255-260.]
- 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 2007a. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉(*Picea crassifolia*)树轮生长特性及其对气候的响应[J]. 生态学报, 27(8): 3268-3276. [Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. 2007a. Characteristics of ring-width chronologies of *Picea crassifolia* and their responses to climate at different elevations in the Anyemaqen Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 27(8): 3268-3276.]
- 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 2007b. 阿尼玛卿山地祁连圆柏径向生长对气候的响应[J]. 地理学报, 62(7): 742-752. [Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. 2007b. Horizontal variations of climatic response of Qilian Juniper (*Juniperus przewalskii*) in the Anyemaqen Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 62(7): 742-752.]
- 彭剑峰, 李国栋, 李玲玲. 2014. 西大别山小林海黄山松树轮宽度的气候意义[J]. 应用生态学报, 25(7): 1857-1862. [Peng J F, Li G D, Li L L. 2014. Dendroclimatic potentials for the tree rings of Huangshan pine (*Pinus taiwanensis*) at Xiaolinhai in the western Dabie Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(7): 1857-1862.]
- 彭剑峰, 杨爱荣, 田沁花. 2011. 万仙山油松径向生长与气候因子的关系[J]. 生态学报, 31(20): 5977-5983. [Peng J F, Yang A R, Tian Q H. 2011. Response of radial growth Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) to climate factors in Wanxian Mountain of He'nan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 31(20): 5977-5983.]
- 齐元元, 魏文寿, 袁玉江, 等. 2013. 玛纳斯河流域不同海拔树轮宽度年表特征及其对气候响应的对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 7(6): 36-41. [Qi Y Y, Wei W S, Yuan Y J, et al. 2013. Characteristics of tree-ring width chronologies and their response to climate for different elevations in Manasi River Basin[J]. Desert and Oasis Meteorology, 7(6): 36-41.]
- 钱君龙, 吕军, 屠其璞, 等. 2001. 用树轮 α -纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 重建天目山地区近160年气候[J]. 中国科学: 地球科学, 31(4): 333-341. [Qian J L, Lv J, Tu Q P, et al. 2002. Reconstruction of the climate in the Tianmu Mountain area, Zhejiang Province, in the last 160 years by $\delta^{13}\text{C}$ sequence of tree ring α -cellulose[J]. Science in China: Earth Sciences, 45(5): 409-419.]
- 秦莉, 史玉光, 喻树龙, 等. 2014. 天山北坡三屯河流域树轮重建的146a降水变化[J]. 沙漠与绿洲气象, 8(5): 23-28. [Qin L, Shi Y G, Yu S L, et al. 2014. Variability of precipitation over the past 146 years in the Santun River Basin recorded by tree-ring[J]. Desert and Oasis Meteorology, 8(5): 23-28.]
- 秦宁生, 邵雪梅, 靳立亚, 等. 2003. 青海南部高原圆柏年轮指示的近500年来气候变化[J]. 科学通报, 48(19): 2068-2072. [Qin N S, Shao X M, Jin L Y, et al. 2003. Climate

- change over southern Qinghai Plateau in the past 500 years recorded in *Sabina tibetica* tree rings[J]. Chinese Science Bulletin, 48(22): 2484-2488.]
- 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 2010. 树轮记录的中天山150年降水变化特征[J]. 干旱区研究, 27(3): 443-449. [Shang H M, Wei W S, Yuan Y J, et al. 2010. The 150-year precipitation change recorded by tree ring in the central Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 27(3): 443-449.]
- 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 2015. 帕米尔东北部昆仑圆柏850a树轮宽度年表的建立及其气候意义[J]. 沙漠与绿洲气象, 9(1): 6-11. [Shang H M, Wei W S, Yuan Y J, et al. 2015. An 850-year tree-ring width chronology of *Juniperus Jarkendensis* for northeastern Pamirs and its climatic implications[J]. Desert and Oasis Meteorology, 9(1): 6-11.]
- 邵雪梅, 范金梅. 1999. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化[J]. 第四纪研究, (1): 81-89. [Shao X M, Fan J M. 1999. Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of dragon spruce[J]. Quaternary Sciences, (1): 81-89.]
- 邵雪梅, 梁尔源, 黄磊, 等. 2006. 柴达木盆地东北部过去1437a的降水变化重建[J]. 气候变化研究进展, 2(3): 122-126. [Shao X M, Liang E Y, Huang L, et al. 2006. A reconstructed precipitation series over the past millennium in the northeastern Qaidam Basin[J]. Advances in Climate Change Research, 2(3): 122-126.]
- 邵雪梅, 吴祥定. 1994. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报, 49(2): 174-181. [Shao X M, Wu X D. 1994. Tree-ring chronologies for *Pinus armandi* Franch from Huashan, China[J]. Acta Geographica Sinica, 49(2): 174-181.]
- 邵雪梅, 吴祥定. 1997. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化[J]. 第四纪研究, (1): 76-85. [Shao X M, Wu X D. 1997. Reconstruction of climate change on Changbai Mountain, Northeast China using tree-ring data[J]. Quaternary Sciences, (1): 76-85.]
- 时兴合, 秦宁生, 邵雪梅, 等. 2009. 青海湖流域圆柏年轮指示的近千年降水变化[J]. 湖泊科学, 21(4): 579-586. [Shi X H, Qin N S, Shao X M, et al. 2009. Precipitation change over the past 1000 years recorded in *Sabina Tibetica* tree rings in Lake Qinghai Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 21(4): 579-586.]
- 史江峰, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 2007. 贺兰山过去196年降水的树轮宽度重建及降水变率[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(1): 95-100. [Shi J F, Liu Y, Cai Q F, et al. 2007. A 196-year precipitation reconstruction based on tree-ring width in the Helan Mountains of north China and the precipitation variability[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 27(1): 95-100.]
- 汪青春. 1998. 牧草生长发育与气象条件的关系及气候年景研究[J]. 中国农业气象, 19(3): 1-7. [Wang Q C. 1998. Researches on the relationship between grass growth and meteorological condition and climatic situation evaluation[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 19(3): 1-7.]
- 王劲松, 李金豹, 陈发虎, 等. 2007. 树轮宽度记录的天山东段近200a干湿变化[J]. 冰川冻土, 29(2): 209-216. [Wang J S, Li J B, Chen F H, et al. 2007. Variation of the dryness in the recent 200a derived from tree-rings width records in the east Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 29(2): 209-216.]
- 王丽丽, 邵雪梅, 黄磊, 等. 2005. 黑龙江漠河兴安落叶松与樟子松树轮生长特性及其对气候的响应[J]. 植物生态学报, 29(3): 380-385. [Wang L L, Shao X M, Huang L, et al. 2005. Tree-ring characteristics of *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and their response to climate in Mohe, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 29(3): 380-385.]
- 王亚军, 马玉贞, 郑影华, 等. 2009. 宁夏罗山油松(*Pinus tabulaeformis*)树轮宽度对气候因子的响应分析[J]. 中国沙漠, 29(5): 971-976. [Wang Y J, Ma Y Z, Zheng Y H, et al. 2009. Response of tree-ring width of *Pinus tabulaeformis* to climate factors in Luoshan Mountains of Ningxia[J]. Journal of Desert Research, 29(5): 971-976.]
- 王振宇, 李林, 汪青春, 等. 2005. 树轮纪录的500年来青海地区夏半年降水变化特征[J]. 气候与环境研究, 10(2): 250-256. [Wang Z Y, Li L, Wang Q C, et al. 2005. Characteristic of precipitation variation in summer season over Qinghai Province in 500 years recorded from tree-rings[J]. Climatic and Environmental Research, 10(2): 250-256.]
- 吴祥定. 1990a. 树木年轮分析在环境变化研究中的应用[J]. 第四纪研究, 10(2): 188-196. [Wu X D. 1990a. Application of tree ring analysis to the study on environment variation[J]. Quaternary Sciences, 10(2): 188-196.]
- 吴祥定. 1990b. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社. [Wu X D. 1990b. Shumu nianlun yu qihou bianhua [M]. Beijing, China: China Meteorological Press.]
- 吴祥定, 林振耀. 1978. 西藏近代气候变化及其趋势的探证[J]. 科学通报, 23(12): 746-750. [Wu X D, Lin Z Y. 1978. Xizang jindai qihou bianhua jiqi qushi de tanzheng[J]. Chinese Science Bulletin, 23(12): 746-750.]
- 吴祥定, 林振耀. 1987. 横断山区近代气候变化的研究[J]. 地理研究, 6(2): 48-56. [Wu X D, Lin Z Y. 1987. A preliminary study of the modern climatic change in Hengduan Mountains[J]. Geographical Research, 6(2): 48-56.]
- 吴祥定, 邵雪梅. 1994. 中国秦岭地区树木年轮密度对气候响应的初步分析[J]. 应用气象学报, 5(2): 253-256. [Wu X D, Shao X M. 1994. A preliminary analysis on response of tree-ring density to climate in the Qinling Mountains of China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 5(2): 253-256.]

- 徐宁, 王晓春, 张远东, 等. 2013. 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应[J]. 生态学报, 33(12): 3742-3751. [Xu N, Wang X C, Zhang Y D, et al. 2013. Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyalu, western Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(12): 3742-3751.]
- 徐袁, 钱维宏. 2003. 东亚季风边缘活动带研究综述[J]. 地理学报, 58(S1): 138-146. [Xu Y, Qian W H. 2003. Research on East Asian summer monsoon: A review[J]. Acta Geographica Sinica, 58(S1): 138-146.]
- 杨银科, 黄强, 刘禹, 等. 2013. 以树木年轮密度资料重建鄂尔多斯中部地区6至10月降水量的变化[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 41(8): 96-109. [Yang Y K, Huang Q, Liu Y, et al. 2013. Tree-ring density based precipitation reconstruction from June to October in central Ordos[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 41(8): 96-109.]
- 姚启超, 王晓春. 2013. 小兴安岭不同海拔臭冷杉年轮—气候关系及大尺度气候影响[J]. 北京林业大学学报, 35(2): 30-38. [Yao Q C, Wang X C. 2013. Climate-growth relationships of *Abies nephrolepis* and its connection with large-scale climate change in Xiaoxing'an Mountains, Northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 35(2): 30-38.]
- 喻树龙, 袁玉江, 金海龙, 等. 2005. 用树木年轮重建天山北坡中西部7-8月379a的降水量[J]. 冰川冻土, 27(3): 404-410. [Yu S L, Yuan Y J, Jin H L, et al. 2005. A 379-year July-August precipitation series reconstructed from tree-ring on the midwestern part of the northern slopes of Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 27(3): 404-410.]
- 袁玉江, 韩淑媞. 1991. 北疆500年干湿变化特征[J]. 冰川冻土, 13(4): 315-322. [Yuan Y J, Han S T. 1991. Features of dry and wet changes for 500 years in the Northern of Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 13(4): 315-322.]
- 袁玉江, 李江风, 胡汝骥, 等. 2001. 用树木年轮重建天山中部近350a来的降水量[J]. 冰川冻土, 23(1): 34-40. [Yuan Y J, Li J F, Hu R J, et al. 2001. Reconstruction of precipitation in the recent 350a from tree-rings in the middle Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 23(1): 34-40.]
- 袁玉江, 叶玮, 董光荣. 2000. 天山西部伊犁地区314 a降水的重建与分析[J]. 冰川冻土, 22(2): 121-127. [Yuan Y J, Ye W, Dong G R. 2000. Reconstruction and discussion of 314 a precipitation in Yili Prefecture, western Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 22(2): 121-127.]
- 张录, 袁玉江, 魏文寿, 等. 2010. 1671-2006年伊犁尼勒克地区7-8月降水序列的重建与分析[J]. 冰川冻土, 32(5): 914-920. [Zhang L, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2010. Reconstruction and analysis of the 336-a July and August precipitation series in Nilka County, Xinjing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 32(5): 914-920.]
- 张朋磊, 刘滨辉. 2015. 气候变化对不同纬度兴安落叶松径向生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 43(3): 10-13, 22. [Zhang P L, Liu B H. 2015. Effect of climate change on *Larix gmelinii* growth in different latitudes[J]. Journal of Northeast Forestry University, 43(3): 10-13, 22.]
- 张瑞波, 尚华明, 袁玉江, 等. 2015. 基于树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的阿尔泰山南坡夏季降水变化分析[J]. 中国沙漠, 35(1): 106-112. [Zhang R B, Shang H M, Yuan Y J, et al. 2015. Summer precipitation variation in the southern slope of the Altay Mountains recorded by tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ [J]. Journal of Desert Research, 35(1): 106-112.]
- 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 等. 2009. 1396-2005年天山南坡阿克苏河流域降水序列重建与分析[J]. 冰川冻土, 31(1): 27-33. [Zhang R B, Wei W S, Yuan Y J, et al. 2009. A precipitation series of A.D. 1396-2005 in Aksu River Basin on the southern slopes of Tianshan Mountains: Reconstruction and analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 31(1): 27-33.]
- 张瑞波, 喻树龙, 袁玉江, 等. 2009. 新疆伊犁乌孙山北坡树轮灰度年表的建立及气候意义[J]. 沙漠与绿洲气象, 3(1): 14-19. [Zhang R B, Yu S L, Yuan Y J, et al. 2009. Development of the tree-ring grey chronology and climate significance in northern slope of Wusun Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 3(1): 14-19.]
- 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 2013. 树轮记录的吉尔吉斯斯坦东部过去百年干湿变化[J]. 干旱区地理, 36(4): 691-699. [Zhang R B, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2013. Changes of wet and dry in the past hundred years in eastern Kyrgyzstan by tree-ring[J]. Arid Land Geography, 36(4): 691-699.]
- 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 2008. 树木年轮重建阿勒泰西部1481-2004年6-9月降水量序列[J]. 冰川冻土, 30(4): 659-667. [Zhang T W, Yuan Y J, Yu S L, et al. 2008. June to September precipitation series of 1481-2004 reconstructed from tree-ring in the western region of Altay Prefecture, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 30(4): 659-667.]
- 张艳华, 刘禹, 宋慧明, 等. 2013. 河南神农山过去162年树轮季节降水重建[J]. 地球环境学报, 4(5): 1450-1460. [Zhang Y H, Liu Y, Song H M, et al. 2013. Tree-ring-based seasonal precipitation reconstruction in Mt. Shennong for the last 162 years[J]. Journal of Earth Environment, 4(5): 1450-1460.]
- 赵兴云, 王建, 钱君龙, 等. 2005. 天目山地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的300多年的秋季气候变化[J]. 山地学报, 23(5): 540-549.

- [Zhao X Y, Wang J, Qian J L, et al. 2005. The climate change in autumn recorded in the $\delta^{13}\text{C}$ of tree rings in the past 300 years at Tianmu Mountain[J]. *Journal of Mountain Science*, 23(5): 540-549.]
- 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 2010. 中国气候区划新方案[J]. *地理学报*, 65(1): 3-12. [Zheng J Y, Yin Y H, Li B Y. 2010. A new scheme for climate regionalization in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 65(1): 3-12.]
- 郑永宏, 张永, 邵雪梅, 等. 2012. 大别山地区黄山松和油松树轮宽度的气候意义[J]. *地理科学进展*, 31(1): 72-77. [Zheng Y H, Zhang Y, Shao X M, et al. 2012. Climate significance of tree ring width of Huangshan pine and Chinese pine in the Dabie Mountains[J]. *Progress in Geography*, 31(1): 72-77.]
- 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 等. 2004. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 59(6): 863-870. [Zhu H F, Wang L L, Shao X M, et al. 2004. Tree ring-width response of *Picea schrenkiana* to climate change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 59(6): 863-870.]
- An W L, Liu X H, Leavitt S W, et al. 2014. Relative humidity history on the Batang- Litang Plateau of western China since 1755 reconstructed from tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ and δD [J]. *Climate Dynamics*, 42(9-10): 2639-2654.
- Chen F, Yuan Y J. 2014. May-June maximum temperature reconstruction from mean earlywood density in north central China and its linkages to the summer monsoon activities [J]. *PLoS One*, 9(9): doi: 10.1371/journal.pone.0107501.
- Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2012a. Temperature reconstruction from tree-ring maximum latewood density of Qinghai spruce in middle Hexi Corridor, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3-4): 633-643.
- Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2012b. Tree ring-based winter temperature reconstruction for Changting, Fujian, subtropical region of Southeast China, since 1850: Linkages to the Pacific Ocean[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 109(1-2): 141-151.
- Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2015. Tree-ring response of subtropical tree species in southeast China on regional climate and sea-surface temperature variations[J]. *Trees*, 29 (1): 17-24.
- Chen F, Zhang R B, Wang H Q, et al. 2016. Updated precipitation reconstruction (AD 1482-2012) for Huashan, north-central China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 123 (3-4): 723-732.
- Chen J, Wang L L, Zhu H F, et al. 2009. Reconstructing mean maximum temperature of growing season from the maximum density of the Schrenk spruce in Yili, Xinjiang, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(13): 2300-2308.
- Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, et al. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium[J]. *Science*, 328: 486-489.
- Dawadi B, Liang E Y, Tian L D, et al. 2013. Pre-monsoon precipitation signal in tree rings of timberline *Betula utilis* in the central Himalayas[J]. *Quaternary International*, 283: 72-77.
- Duan J P, Zhang Q B, Lv L X, et al. 2012. Regional-scale winter-spring temperature variability and chilling damage dynamics over the past two centuries in southeastern China [J]. *Climate Dynamics*, 39(3-4): 919-928.
- Fang K Y, Gou X H, Chen F H, et al. 2010. Reconstructed droughts for the southeastern Tibetan Plateau over the past 568 years and its linkages to the Pacific and Atlantic Ocean climate variability[J]. *Climate Dynamics*, 35(4): 577-585.
- Fang K Y, Gou X H, Chen F H, et al. 2012. Precipitation variability during the past 400 years in the Xiaolong Mountain (Central China) inferred from tree rings[J]. *Climate Dynamics*, 39(7-8): 1697-1707.
- Fritts H C. 1976. *Tree rings and climate*[M]. London, UK: Academic Press.
- Gao S Y, Lu R J, Qiang M R, et al. 2005. Reconstruction of precipitation in the last 140 years from tree ring at south margin of the Tengger Desert, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(21): 2487-2492.
- Gou X H, Deng Y, Gao L L, et al. 2015. Millennium tree-ring reconstruction of drought variability in the eastern Qilian Mountains, Northwest China[J]. *Climate Dynamics*, 45(7-8): 1761-1770.
- Gou X H, Yang T, Gao L L, et al. 2013. A 457-year reconstruction of precipitation in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau, China using tree-ring records[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(10): 1107-1114.
- Huang J G, Zhang Q B. 2007. Tree rings and climate for the last 680 years in Wulan area of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Climatic Change*, 80(3-4): 369-377.
- Hughes M K, Schweingruber F H, Cartwright D, et al. 1984. July-August temperature at Edinburgh between 1721 and 1975 from tree-ring density and width data[J]. *Nature*, 308: 341-344.
- LaMarche Jr V C. 1974. Paleoclimatic inferences from long tree-ring records: Intersite comparison shows climatic anomalies that may be linked to features of the general circulation[J]. *Science*, 183: 1043-1048.
- Liang E Y, Shao X M, Liu X H. 2009. Annual precipitation variation inferred from tree rings since A.D. 1770 for the western Qilian Mts., northern Tibetan Plateau[J]. *Tree-Ring Research*, 65(2): 95-103.
- Liang E Y, Shao X M, Liu H Y, et al. 2007. Tree-ring based

- PDSI reconstruction since AD 1842 in the Ortindag Sand Land, east Inner Mongolia[J]. Chinese Science Bulletin, 52 (19): 2715-2721.
- Liu N, Liu Y, Bao G, et al. 2015. A tree-ring based reconstruction of summer relative humidity variability in eastern Mongolian Plateau and its associations with the Pacific and Indian Oceans[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 438: 113-123.
- Liu X H, Qin D H, Shao X M, et al. 2005. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium[J]. Science in China: Earth Sciences, 48(4): 521-529.
- Liu X H, Zhao L J, Chen T, et al. 2011. Combined tree-ring width and $\delta^{13}\text{C}$ to reconstruct snowpack depth: A pilot study in the Gongga Mountain, west China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 103(1-2): 133-144.
- Liu Y, An Z S, Ma H Z, et al. 2006. Precipitation variation in the northeastern Tibetan Plateau recorded by the tree rings since 850 AD and its relevance to the Northern Hemisphere temperature[J]. Science in China: Earth Sciences, 49 (4): 408-420.
- Liu Y, Bao G, Song H M, et al. 2009. Precipitation reconstruction from Hailar pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) tree rings in the Hailar region, Inner Mongolia, China back to 1865 AD[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 282(1-4): 81-87.
- Liu Y, Cai Q F, Liu W G, et al. 2008. Monsoon precipitation variation recorded by tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ in arid Northwest China since AD 1878[J]. Chemical Geology, 252(1-2): 56-61.
- Liu Y, Cai Q F, Park W K, et al. 2003. Tree-ring precipitation records from Baiyinaobao, Inner Mongolia since A.D. 1838 [J]. Chinese Science Bulletin, 48(11): 1140-1145.
- Liu Y, Lei Y, Sun B, et al. 2013. Annual precipitation in Li-ancheng, China, since 1777 AD derived from tree rings of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.)[J]. International Journal of Biometeorology, 57(6): 927-934.
- Liu Y, Shi J F, Shishov V, et al. 2004. Reconstruction of May-July precipitation in the north Helan Mountain, Inner Mongolia since A.D. 1726 from tree-ring late-wood widths[J]. Chinese Science Bulletin, 49(4): 405-409.
- Liu Y, Tian H, Song H M, et al. 2010. Tree ring precipitation reconstruction in the Chifeng-Weichang region, China, and East Asian summer monsoon variation since A.D. 1777[J]. Journal of Geophysical Research, 115(D6): D06103.
- Liu Y, Wang C Y, Hao W J, et al. 2011. Tree-ring-based annual precipitation reconstruction in Kalaqin, Inner Mongolia for the last 238 years[J]. Chinese Science Bulletin, 56(28-29): 2995-3002.
- Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, et al. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data[J]. Nature, 433: 613-617.
- Qian J L, Lv J, Tu Q P, et al. 2002. Reconstruction of the climate in the Tianmu Mountain area, Zhejiang Province, in the last 160 years by $\sigma^{13}\text{C}$ sequence of tree ring α -cellulose [J]. Science in China: Earth Sciences, 45(5): 409-419.
- Shao X M, Huang L, Liu H B, et al. 2005. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai[J]. Science in China: Earth Sciences, 48(7): 939-949.
- Shao X M, Xu Y, Yin Z Y, et al. 2010. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 29(17-18): 2111-2122.
- Sheppard P R, Tarasov P E, Graumlich L J, et al. 2004. Annual precipitation since 515 BC reconstructed from living and fossil juniper growth of northeastern Qinghai Province, China[J]. Climate Dynamics, 23(7-8): 869-881.
- Shi J F, Cook E R, Lu H Y, et al. 2010. Tree-ring based winter temperature reconstruction for the lower reaches of the Yangtze River in southeast China[J]. Climate Research, 41: 169-175.
- Sun J Y, Liu Y, Sun B, et al. 2012. Tree-ring based PDSI reconstruction since 1853 AD in the source of the Fenhe River Basin, Shanxi Province, China[J]. Science China: Earth Sciences, 55(11): 1847-1854.
- Tian Q H, Zhou X J, Gou X H, et al. 2012. Analysis of reconstructed annual precipitation from tree-rings for the past 500 years in the middle Qilian Mountain[J]. Science China: Earth Sciences, 55(5): 770-778.
- Wang W Z, Liu X H, Xu G B, et al. 2013. Moisture variations over the past millennium characterized by Qaidam Basin tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ [J]. Chinese Science Bulletin, 58(32): 3956-3961.
- Wang Y J, Lu R J, Ma Y Z, et al. 2013. Annual variation in PDSI since 1897 AD in the Tengger Desert, Inner Mongolia, China, as recorded by tree-ring data[J]. Journal of Arid Environments, 98: 20-26.
- Xu G B, Liu X H, Qin D H, et al. 2014a. Drought history inferred from tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the central Tianshan Mountains of China and linkage with the North Atlantic Oscillation[J]. Theoretical and Applied Climatology, 116(3-4): 385-401.
- Xu G B, Liu X H, Qin D H, et al. 2014b. Relative humidity reconstruction for Northwestern China's Altay Mountains using tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ [J]. Chinese Science Bulletin, 59(2): 190-200.
- Yang B, Qin C, Wang J L, et al. 2014. A 3500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sci-

- ences of the United States of America, 111(8): 2903-2908.
- Yang Y H, Chen Y N, Li W H, et al. 2012. Climatic change of inland river basin in an arid area: A case study in northern Xinjiang, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 107(1-2): 143-154.
- Yin Z Y, Li M Q, Zhang Y, et al. 2016. Growth-climate relationships along an elevation gradient on a southeast-facing mountain slope in the semi-arid eastern Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. Trees, 30(4): 1095-1109.
- Yin Z Y, Shao X M, Qin N S, et al. 2008. 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[J]. International Journal of Climatology, 28(1): 37-53.
- Yin Z Y, Zhu H F, Huang L, et al. 2016. Reconstruction of biological drought conditions during the past 2847 years in an alpine environment of the northeastern Tibetan Plateau, China, and possible linkages to solar forcing[J]. Global and Planetary Change, 143: 214-227.
- Yu D P, Wang G G, Dai L M, et al. 2007. Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 240(1-3): 105-113.
- Yu S L, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2013. A 352-year record of summer temperature reconstruction in the western Tianshan Mountains, China, as deduced from tree-ring density [J]. Quaternary Research, 80(2): 158-166.
- Zhang H, Shao X M, Zhang Y. 2015. Which climatic factors limit radial growth of Qilian juniper at the upper treeline on the northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 25(10): 1173-1182.
- Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D, et al. 2003. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 30(14): 1739.
- Zhang Q B, Evans M N, Lyu L X. 2015. Moisture dipole over the Tibetan Plateau during the past five and a half centuries [J]. Nature Communications, 6: 8062.
- Zhang Y, Shao X M, Yin Z Y, et al. 2013. A dendroclimatic analysis of regional moisture variation in the northeastern Tibetan Plateau during the past 150 years[J]. Trees, 27(2): 455-463.
- Zhang Y, Tian Q H, Gou X H, et al. 2011. Annual precipitation reconstruction since AD 775 based on tree rings from the Qilian Mountains, Northwestern China[J]. International Journal of Climatology, 31(3): 371-381.

Research progress of dry-wet climate reconstruction by tree ring in China

WANG Yajun, LI Mingqi*

(Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: With accurate dating, high resolution, and high continuity, tree-ring data become one of the important sources for reconstructing the climate change. The sampling sites distribute widely, many tree species were selected, and the chronologies are very long for studying the relationship of the tree ring and dry-wet changes in China. Significant progress has been made in analyzing the response of tree radial growth to dry-wet changes and reconstructing historical dry-wet climate change based on various research proxies, such as tree-ring width, density, and stable isotopes. In general, moisture condition, especially in the spring and autumn and annual humidity are the important influencing factors of tree-radial growth in low altitudes of arid and semi-arid areas. For trees in the upper limit of forest vegetation, relatively cold-wet areas, and the subtropical climate zone in China, the correlation between tree growth and precipitation was weak. Dry-wet climate reconstruction based on tree-ring data in China is plentiful. Up to now, many precipitation series of more than 1000a or even over 2000a were reconstructed in a large number of regions. The longest tree-ring chronology is 4500a, and the longest precipitation reconstruction sequence is 3500a. The brief summary of selected tree-ring results in this article will provide references and help for tree-ring sampling and dry-wet climate reconstruction.

Key words: tree ring; indicator; response; dry-wet change; paleoclimatic reconstruction; research progress; China