

中亚区域树木年轮气候学研究进展

刘蕊^{1,2,3} 张同文^{1,2} 陈峰^{1,2} 尚华明^{1,2} 喻树龙^{1,2} 张瑞波^{1,2} 王勇辉³

(1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室, 乌鲁木齐 830002; 3 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要: 中亚地处亚欧大陆中部, 距海较远, 是典型的中纬度干旱半干旱区域, 在全球变化研究中占有特殊地位。其山区分布着大量对气候响应敏感的针叶树种原始森林, 是树轮气候研究的理想区域。干旱的气候条件不仅使该地区树木对气候变化响应敏感, 同时也有利于长龄树的生长和古木的保存, 这为研究过去气候和环境变化提供了可靠的代用资料。对国内外在中亚区域开展树木年轮气候研究的现状和进展进行了综述, 探讨了树轮记录的这一地区历史时期温度和湿度变化特征, 总结了气候变化规律, 并为进一步开展中亚树轮气候研究提出建议与展望。

关键词: 中亚, 树木年轮, 气候响应, 气候变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.002

Advance in Dendroclimatology in Central Asia

Liu Rui^{1,2,3}, Zhang Tongwen^{1,2}, Chen Feng^{1,2}, Shang Huaming, Yu Shulong, Zhang Ruibo^{1,2}, Wang Yonghui³

(1 Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002)

2 Key Laboratory of Tree-ring Physical Chemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi 830002

3 School of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054)

Abstract: Central Asia is located in the middle of the Eurasian Continent and far from ocean. It's a typical arid and semi-arid region in the middle latitudes, and is in a special position for the study of global change. There are a large number of conifer primeval forests in the mountainous, which are sensitive to climate response. The arid climate conditions not only make the trees sensitive to climate change in this area, but also have benefits on the growth of old trees and the preservation of ancient trees. These provide reliable alternative data for the study of past climate and environmental changes. This paper summarizes the present situation and progress of the research on tree-ring climate in Central Asia, discusses the change characteristics of temperature and humidity, which are recorded by tree-ring in this region, summarizes the law of historical climate change, and puts forward some suggestions and prospects for further research on dendroclimatology in the Central Asia.

Keywords: Central Asia, tree-ring, the climate response, climate change

0 引言

中亚泛指亚洲中部内陆地区, 有广义和狭义之分。本文研究区域为狭义上的中亚干旱区, 包括哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦等5个国家。该地区不仅深居欧亚大陆腹地, 远离海洋, 还是“丝绸之路经济带”倡议向西走出国门的第一站, 其地理位置十分重要。由于该地区东南缘高山阻隔了印度洋、太平洋暖湿气流, 因此形成了中亚地区干旱少雨的大陆性山地气候特征, 主

要受西风环流和北大西洋涛动的影响。研究区气候波动大, 生态环境脆弱, 在全球变化研究中具有特殊地位。但由于气象站点稀少, 仪器设备陈旧, 数据精准度不高, 观测数据不连续等原因, 严重阻碍了中亚地区长期气候变化研究的顺利开展。因此, 研究人员需要寻找记录着过去气候变化信息的高分辨率替代资料。

树木年轮作为研究过去气候变化的重要代用资料之一, 由于其具有分辨率高、定年准确、空间分布广、时间序列长、环境变化指示意义明确、可定量等特点, 在揭示气候变化规律及机理研究中拥有着独特优势^[1-4]。随着科学技术的发展, 树木年轮研究对象在国际上已从过去仅针对气象观测要素, 发展到了对径流量^[5]、干旱指数^[6]、植被指数^[7]、沙尘天气^[8]等的重建研究; 研究区域已从过去的单个采样点针对较小区域的气候重建, 发展为使用多采样点、大样本量的较大区域气候重建^[9-10]; 在将重建结果放

收稿日期: 2018年8月31日; 修回日期: 2019年1月7日
第一作者: 刘蕊 (1996—), Email: 1049830541@qq.com
通信作者: 张同文 (1982—), Email: zhangtw@idm.cn
资助信息: 国家自然科学基金 (41605047); 上海合作组织科技伙伴计划 (2017E01032); 新疆维吾尔自治区“天山雪松计划——青年拔尖人才后备人选” (2017XS18)

入过去千年全球气候背景下考察的同时，也已开始考虑大气—海洋—陆面耦合作用^[11]、导致短期降温的气候扰动因子——火山爆发^[12]以及过去100年气温的“超常”上升——人类温室气体排放对研究区域气象要素的影响^[13]。目前世界上有少量的树轮年表超过千年，最长的年表序列超过7000 a^[14]。我国建立的最长树轮年表达3585 a^[15-16]，重建的最长气候序列为3500 a^[17]。在中亚山区分布着大量的西伯利亚云杉 (*Picea obovata*)、西伯利亚落叶松 (*Larix sibirica* Ledeb.)、西伯利亚冷杉 (*Abies sibirica*)、雪岭云杉 (*Picea Schrenkiana*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* L.)、土耳其斯坦圆柏 (*Juniperus turkestanica*) 及天山圆柏 (*Juniperus semiglobosa*) 等对气候响应敏感的针叶树种原始森林，这为科研人员开展树木年轮学研究提供了机会。

中亚区域的树木样本系统采集起始于20世纪90年代，相关研究主要在欧美科研人员主导下开展完成^[18-21]。自2012年起，新疆气象局研究人员组织团队共17次赴中亚哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦等国开展学术交流和联合科考工作。研究成果涉及树轮年表的建立^[22]、树木生长的气候响应^[23]、历史时期气候水文重建^[24]等方面。但国内在这一地区的研究起步较晚，现阶段在区域范围、年表长度、成果数量、研究深度以及影响力等方面与欧美还存在差距。本文通过整理目前已发表的文献资料，综述国内外在中亚地区开展树轮气候研究的现状，总结了近500年基于树轮

资料的中亚地区较为一致的气候变化规律，提出了这一地区树轮气候学薄弱环节和未来研究的重点发展方向，以期为进一步开展中亚地区树轮气候研究提供指导意见和建议。

1 中亚树轮采样点分布情况

中亚山区分布有大面积的原始针叶林，这为开展树轮研究提供了巨大的潜力。目前，这一地区树木年轮气候研究内容相对较少，研究区域主要集中在哈萨克斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦这三个国家，而乌兹别克斯坦和土库曼斯坦则较少涉及。各国研究人员在哈萨克斯坦天山山区及阿尔泰山东南部的研究成果有14篇论文，研究树种主要有雪岭云杉、西伯利亚落叶松和樟子松等，其树龄一般均在100~500年。在塔吉克斯坦西北部的帕米尔-阿莱山脉的研究成果有10篇论文。主要研究树种为长龄针叶树种天山圆柏和土耳其斯坦圆柏。目前，所采树木树龄最大超过1400年。在吉尔吉斯斯坦西天山山区的研究成果有14篇论文。主要研究树种为土耳其斯坦圆柏和雪岭云杉，目前在该地区所采集云杉的树龄一般在200~400年；而圆柏树龄则一般在400~500年。图1显示了中亚已发表的树轮气候学研究相关论文所涉及的采样点空间位置。本文统计了在文献中明确给出采样点位置的树轮研究成果。对于文献中只给出采样范围或采点较多，且位置较近的研究，采取采样范围的中心位置来表示这项研究所在的位置。

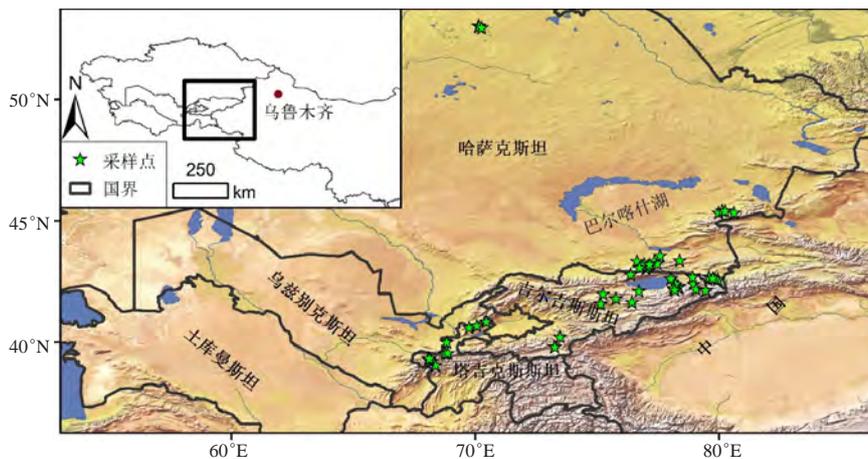


图1 中亚区域树轮气候学研究结果涉及采样点空间位置分布图

Fig. 1 Map of the spatial distribution of sampling points of the dendroclimatological research results in the Central Asia

2 中亚树轮生长对气候的响应研究

在中亚地区，利用树木年轮资料指示或重建的气候要素主要有温度、径流、降水和干旱指数 (PDSI)，其中，PDSI、降水和径流同属于湿度变化的范畴，因此我们将这三者归为同一类进行讨论。

此外，也有少量利用树木年轮资料指示或重建植被指数^[25]、树木生产力和碳封存潜力^[26]等的研究。但这些研究相对较少，并且用于指示或重建植被指数等变化的树轮资料一般为之前已经被用于重建过PDSI、降水或径流等变化的树轮资料。本文则重点讨论了中亚地

区树轮记录的温度和湿度变化研究。以上研究所采用的树轮指标主要为树轮宽度，少量为树轮密度。

相关文献显示，中亚区域树轮年代学和树木千年年轮记录潜力的研究较少，并多集中在塔吉克斯坦。其研究工作一般是将当地同一树种的死树与活树交叉定年，确定每一树轮形成的准确年份。Opała-Owczarek等^[27]的研究是将在两座旧建筑中采集30个死树样本与在帕米尔-阿莱西部采集的活树（圆柏）样本进行交叉定年，最老的木头可以追溯到公元11世纪和12世纪。其研究结果为帕米尔-阿莱地区和亚洲高海拔地区未来气候重建提供了时间序列超过千年的年表，年表序列长达1070a；Opała-Owczarek等^[28]研究发现，塔吉克斯坦帕米尔-阿莱山脉的灌木具有树轮气候学研究的潜力；Opała-Owczarek等^[29]研究表明，塔吉克斯坦帕米尔-阿莱地区具有重建过去一千年气候的应用潜力。此外，中亚地区已发表的树轮气候研究工作还包括NDVI、PDSI、SPEI、降水、径流、温度等重建工作，其中的大部分是利用树轮宽度开展气候响应的研究，且相对集中分布在哈萨克斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦这三国，乌兹别克斯坦仅存有极少数的树木气候学应用潜力的研究^[20]，而土库曼斯坦则仅发现了阿姆河流域胡杨（*Populus euphratica Oliv.*）生产力和碳封存潜力的研究^[26]。

大量研究表明^[22,30-31]，中亚山区树木年轮径向生长对降水的响应要好于气温，尤其是在接近森林下线的区域。树轮宽度对生长季和生长季前期的降水响应均较好，生长季和生长季前期的降水量是树木径向生长的主要限制因子。吉尔吉斯斯坦西天山雪岭云杉树轮宽度对气候的响应表明，位于森林下线的树轮径向生长对6月和7月的气温响应较好，而森林上线树轮径向生长则对4月和5月的气温响应较好，且温度对树木径向生长的影响主要表现为随海拔升高而增强的水分应力；在树轮对降水响应方面，较低树线的年轮宽度与水分的相关性最强，树轮宽度年表与上年7月到当年6月的降水相关最好。以上结果表明，降水可能是吉尔吉斯斯坦西天山北坡森林下线树木径向生长的主要限制性因子，降水对森林下线树轮径向生长起决定性作用。这与张瑞波等发现的天山山区雪岭云杉树轮宽度对降水，尤其是生长季及生长季前期降水响应最为敏感的研究结果一致^[31]。

在哈萨克斯坦天山北坡森林下线的研究发现^[32]，云杉幼龄树树轮宽度与标准化降水-蒸散发指数（SPEI）相关性最强，而老龄树树轮宽度与降水量相关性最强。中上层林带的云杉也可能会根据不同树龄而显示出树木与气候间不同的生长关系。在哈萨克

斯坦东北部布拉拜（Burabai）地区^[33]，樟子松与降水呈正相关，与5月和6月的气温呈显著负相关。夏季降水和温度对树轮宽度影响明显。夏季降水增加，气温下降，年轮宽度增加。反之，夏季降水减少，气温升高，年轮宽度减小。这是由于5月和6月的高温对树木早材生长起主要限制作用，晚材生长则主要取决于当前生长期的降水量。20世纪40年代以后，该地区气温和降水量均呈上升趋势，樟子松树轮宽度对气候因子的敏感性也随之增加。在阿尔泰山南坡的森林上线，树轮宽度对气候的响应表明^[34]，树轮宽度与当年6月温度呈显著正相关；与5—6月的降水呈负相关，而与生长季前期的降水没有较明显的相关关系。这表明，在阿尔泰山南坡西伯利亚落叶松分布的上线，制约树木径向生长最主要的气候因子为生长季初期的温度。由于6月为西伯利亚落叶松生长的关键阶段，且这一时段也是阿尔泰山南坡冰雪融水补给河流的主要时期，河流最大径流量出现在5—6月，同时山区降水相对于平原区域也较为丰沛。在水分条件充足的情况下，较高的温度有利于植物的光合作用，从而延长生长期，形成较宽的年轮；反之低温会降低光合作用效率，强冷空气甚至会冻死刚开始生长的幼枝嫩叶，从而形成窄轮。据此可以推断，树轮宽度指数与5—6月的降水呈负相关是因为降水通常会伴随冷空气入侵、云量增多和太阳辐射减少，导致温度较低。

陈峰等研究发现^[35]，在塔吉克斯坦Kuramenian山脉下线，树轮宽度与当年6—7月PDSI相关性较高，说明了在干旱半干旱地区，圆柏径向生长需水量大，水分有效性是树木生长的主要决定因素。塔吉克斯坦帕米尔-阿莱山区森林上线树轮宽度对气候的响应分析表明^[36]，圆柏树轮宽度指数对上年8月到当年7月PDSI的变化非常敏感，并与当年6—9月最低温度呈正相关；Opała-Owczarek等研究表明^[21]，在塔吉克斯坦帕米尔-阿莱山区森林中上线，圆柏树轮宽度与上年12月到当年2月的降水相关性最高（ $r=0.73$ ， $p<0.01$ ），与3月最高温正响应，与夏季温度正相关，与6—7月最低温度呈显著相关。这表明在塔吉克斯坦西北部山区的森林上线，冬季降水为限制因子，温度起到间接作用，通过融雪和蒸发来调节土壤含水量，而制约树木径向生长最主要的气候要素为生长季初期的温度。

在乌兹别克斯坦高海拔地区^[20]，圆柏树木年轮径向生长与降水之间存在正相关关系，温暖的冬季对树木生长有积极的影响，春季温度的升高则对树木生长有消极影响，但其具体的响应机制尚未在相关文献中出现，有待深入研究。土库曼斯坦树木生长对气候的响应关系尚不清晰，还有待进行大量基础研究工作。

随着科学技术的发展,国际树木年轮研究手段已从过去单一的树轮宽度,发展到目前利用树轮密度^[37-38]、灰度^[39-40]、同位素^[41]等多种手段综合分析研究。但在中亚地区,以往开展的树木年轮气候学研究大多基于树轮宽度参数,较少考虑和运用其他树轮参数。

3 中亚地区树轮气候重建研究

本文采用统计中亚干旱区已发表的树轮气候学相关文献中注明的干湿、冷暖时期的方法来提取该区域的气候变化特征^[42]。干湿、冷暖时期的统计严格按照相关文献中提及的温度变化中的冷暖时段以及湿度变化中的干湿时段来进行统计,由于已发表的中亚五国树轮气候重建文献还未出现乌兹别克斯坦和土库曼斯坦两个地区的研究内容,且树轮记录的不同区域气候要素存在一定差异,为了方便比较区域间的一致性和差异,本文将属于同一国家的树轮数据排列在一起,分别总结了吉尔吉斯斯坦,哈萨克斯坦和塔吉克斯坦这三个国家树轮记录的温度和湿度变化特征,考虑到研究区基于树轮的重建较少,其树轮记录的温度和湿度变化特征在大尺度范围上的准确度并不高。

3.1 温度变化

图2显示,中亚地区树轮记录的公元1600年以来温度冷暖变化时段的统计序列较少,但其树轮记录的冷暖变化较为一致。如,哈萨克斯坦2条树轮记录的温度冷暖变化表现出几个比较一致的冷暖时段:1714—1732年,1780—1794年,1887—1890年,1943—1950年。此外,塔吉克斯坦公元1840—2016年夏季最低温度的重建研究表明^[43],其表现出来最冷的年代有:1850年代,1860年代,1880年代,1890年代,1900年代,1910年代,1950年代,1960年代,1970年代和1980年代;最温暖的年代有:1870年代,1920年代,1930年代,1940年代,2000年代和2010年

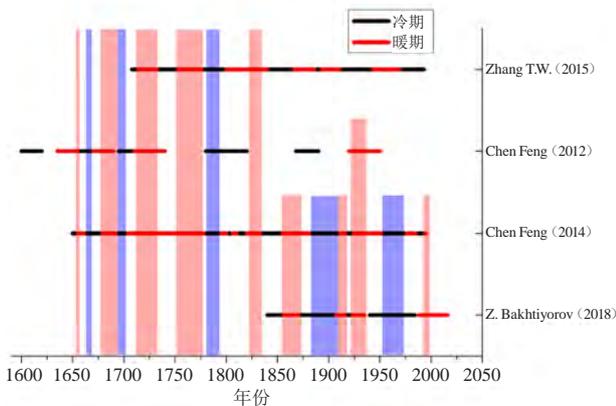


图2 中亚地区树轮记录的温度冷暖变化时期

Fig. 2 Warm and cold periods recorded by tree rings in Central Asia

代。该重建序列具有84.7年 ($p < 0.001$) 的周期变化,同时,发现了2.9年 ($p < 0.001$)、2.6年 ($p < 0.001$)、2.5年 ($p < 0.001$)、2.4年 ($p < 0.001$) 和2.2年 ($p < 0.001$) 的高频变化。这表明,该区域温度变化与印度洋—海洋气候系统之间存在很强的联系。陈峰等^[44]利用最大密度标准化年表重建的吉尔吉斯斯坦天山山区公元1650—1995年7—8月平均温度结果显示,其最长的暖期为1704—1778年,出现了75年的夏季高温;最长的冷期为1882—1910年,显示出29年的夏季低温。吉尔吉斯斯坦天山山区7—8月平均温度在1707年、1777年、1818年、1835年、1856年、1882年、1912年、1923年和1951年,而且突变幅度较大,与干旱半干旱地区气候变化较剧烈的特征相符。利用晚材密度标准化年表重建了哈萨克斯坦东部斋桑湖地区近400年夏季(6—8月)平均最高温度^[45],重建序列揭示了1650—1680年这30年显著偏暖。10个最冷年则均匀分布于近400年。张同文等^[46]利用四种基于树轮宽度重建的较小区域温度序列,将中亚东部阿尔泰山脉南部的平均气温恢复到1698年。结果表明,这种温度重建包含了中亚大部分地区的气候信号。新重建的温度序列与中亚地区的区域温度重建以及哈萨克斯坦东部斋桑湖地区的局部温度重建的一致性表明,此温度重建在低频域捕获了广泛的区域气候变化。

3.2 湿度变化

中亚地区的树轮记录主要以反映湿度变化为主,各国研究人员在此地区基于树轮记录开展了较多的湿度变化研究。图3总结了公元1600年以来塔吉克斯坦、哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦三个国家的气候干湿变化。结果显示,塔吉克斯坦树轮记录的几个比较一致的气候干湿变化时段有^[29,35-36]:1810—1840年代、1880—1910年代、1930—1950年代和1990—2010年

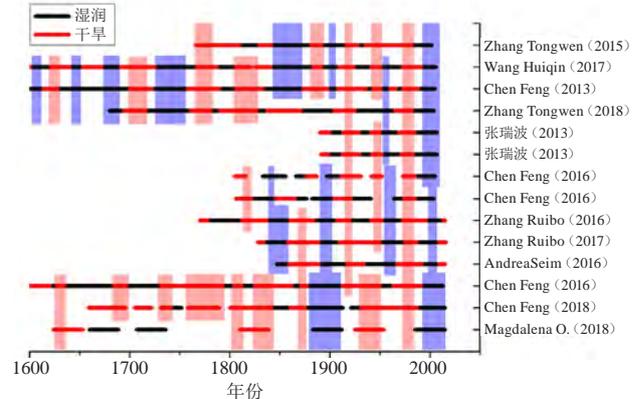


图3 中亚地区树轮记录的湿度变化干湿时期

Fig. 3 Wet and dry periods recorded by tree rings in Central Asia

代；哈萨克斯坦树轮记录的几个比较一致的气候干湿变化时段有^[47-50]：1840年代、1860年代、1890—1900年代、1970—1980年代和1990—2000年代；吉尔吉斯斯坦树轮记录的几个比较一致的气候干湿变化时段有^[23,50-54]：1700—1710年代、1730—1760年代、1810—1830年代、1910—1920年代、1950—1960年代、1970—1980年代以及1990—2000年代。从中亚地区干湿变化的统计结果可以看出，该区域研究的干湿变化时段划分就整体而言较为破碎，使得一些干湿时段很难界定，难以找出较为完整的气候干湿变化一致时段，且对于界定的干湿时段在本研究中也较难确定不同时期的干湿程度。因此，很难将整个中亚区域的干湿变化特征进行比较。尽管如此，我们仍找到了几个较为一致的气候干湿变化时段：1900年代、1920年代、1950年代、1970—1980年代、2000—2010年代。说明了整个中亚地区在某些时段的湿度变化特征较为一致。此外，陈峰等研究发现^[50]，重建的近两百年哈萨克斯坦西天山干湿变化与吉尔吉斯斯坦西天山和中国境内西天山山区降水变化一致；张瑞波等研究表明^[51]，近百年吉尔吉斯斯坦西天山的干湿变化与中国境内天山山区的降水变化也较为一致，也能较好地代表西天山大部分区域干湿变化。张同文等^[55]研究表明，东天山地区与其空间距离较近的中天山地区降水变化最接近，但随着空间距离的增加，其相似性逐渐减弱。这证明，天山区域历史时期降水变化的局地性，不同区域间存在空间差异。

4 展望

中亚区域属于典型的寒旱区。在干旱半干旱地区，水是发展和生存的根本条件。自然降水是地表水、地下水和高山积雪冰川等水体的根本补给源，是水循环过程中的一个重要分量。降水不仅决定着中亚水资源总量，而且其空间分布随时间的变化直接影响着中亚的水分布状况、河川径流形成等，直接关系到中亚地区的生态环境与经济社会发展。此外，中亚作为我国天气的上游关键地区，和我国西北地区区域气候密切联系。研究其过去气候变化特征和未来气候变化趋势，对预测未来气候和减少干旱损失具有重要意义。中亚国家的自然地理环境与我国新疆接近。其境内的矿产资源、光热资源和水资源等均很丰沛，而作为塔里木河源头之一的阿克苏河也发源于吉国西部山区。2013年9月，国家主席习近平在访问中亚四国时提出共建“丝绸之路经济带”的构想。2014年5月，第二次中央新疆工作座谈会在北京举行，更加明确提出了着力打造新疆丝绸之路经济带核心区的总体

要求。因此，中亚对于新疆区域水资源安全具有非常重要的意义。在中亚国家和中国新疆开展气候变化研究将有助于科学认识中亚干旱区的历史气候变化事实和未来气候变化趋势，气候时空演变规律及其区域差异，以及区域气候变化对全球变化的响应等，并为我国制定涉及中亚区域的可持续发展及规划研究提供数据参考和理论依据。开展未来气候变化预估，尤其是降水和温度等关键气候要素的变化，可增进我国在国际气候变化谈判中的话语权和主动权，为维护国家利益、促进我国经济社会可持续发展做出贡献。

在充分发挥各自优势的基础上，我国新疆气象局已与吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和哈萨克斯坦科研单位共签订了4份项目合作意向书，共建了西天山森林生态气象监测站，建立了稳定的合作交流机制，实现了人员定期互访和项目组内相关资料共享。近年来，科研人员多次赴中亚哈吉塔三国进行树芯样本采集和树木年轮研究工作，特别是2017年和2018年，在中亚山区获取了多棵树龄超过千年的树芯样本。在与中亚国家科研人员进行联合野外科考的同时，积极开展学术研究，与中亚合作单位学者联合发表论文9篇、出版专著《中亚气候变化调查研究》和《新疆北部及周边地区过去一万年的气候与水文变化》2部，培养博士2名，硕士2名，引进博士1名，项目组成员获世界气象组织青年科学家研究奖，取得了初步的研究成果。

依托获批的国家自然科学基金、国家国际科技合作计划、亚洲区域合作专项、上海合作组织科技伙伴计划、中国气象局气候变化专项等项目的支持，联合中亚多国研究人员共同开展中亚气候变化研究，并开展基于历史气候序列的未来气候变化趋势预估工作，所撰写的咨询报告也积极响应科研成果业务转化的迫切需求，为国家相关政策的制定和国际谈判提供了数据参考和理论依据。

本文通过总结分析中亚已有的树轮气候研究工作发现，中亚干旱区由于其特殊的地理环境和干旱的气候特征，为树轮长年表的建立提供了良好的场所。目前中亚长年表所采用的树种均为土耳其圆柏和天山圆柏，最长的树轮年表长度达千年，说明了中亚地区具有建立树轮长年表的潜力和开展千年历史气候重建的可行性。且我国新疆气象局树轮学研究团队已获取了多个树龄达千年以上的树芯样本，也证实了在中亚区域开展千年历史气候重建和研究这一区域较长时间尺度气候变化的可行性。过去，该地区树轮年表的建立大多是基于活树样本，而未来树轮长年表建立则可以通过活树和古木交叉定年的方法来延长树轮年表长度，并且可以考虑借鉴欧洲北美等地建立树轮常年表

序列的方法, 结合树轮考古学, 在古湖泊或古建筑等考古样点中寻找能够定年的古木后, 采用交叉定年等方法, 建立浮动年来延长此地区树轮年表的长度。此外, 以往在中亚地区树轮气候研究工作中, 主要以树轮宽度记录为主, 利用其他树轮指标开展的研究工作则很少。而我国新疆气象局树轮学研究团队骨干曾多次完成在我国西北地区进行的树轮密度、灰度、同位素参数获取及其相关分析研究工作, 现已熟练掌握基于X射线分析法的树轮密度测定技术和利用树轮图像分析软件获取树轮灰度数据等研究技术。这使得我国研究人员在中亚区域获取多种树轮参数, 特别是利用多种树轮数据开展研究成为可能。因此, 在中亚地区, 树木年轮作为一种高分辨率的气候代用指标, 需要通过联合中亚多国研究人员在该区域扩大采样范围, 改进数据分析手段, 通过结合森林气象站、树木径向生长监测、树木形成层活动监测、木材解剖、模型模拟等研究方法深入探讨中亚树木年轮对气候要素的响应机理, 更好地区分树轮记录中的温度和降水信号, 提取树轮中包含的共同气候信号, 重建更多可靠的、大范围的降水、温度、湿度等长时间尺度序列, 从而进一步理解中亚乃至全球气候变化和历史气候变化机制。

参考文献

- [1] Shao X M, Huang L, Liu H B, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Deliangha, Qinghai. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48: 939-949.
- [2] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. Chronology development and climate response analysis of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) tree-ring parameters in the Urumqi River basin, China. *Geochronometria*, 2010, 36: 17-22.
- [3] Liu Y, Cai Q F, Song H M, et al. Amplitudes, rates, periodicities and causes of temperature variations in the past 2485 years and future trends over the central-eastern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 2986-2994.
- [4] Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, et al. 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 2011, 331: 578-582.
- [5] 袁玉江, 喻树龙, 穆桂金, 等. 天山北坡玛纳斯河355 a来年径流量的重建与分析. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 411-417.
- [6] Li J B, Gou X H, Cook E R, et al. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in northwest China. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L07715. <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL025803>.
- [7] 高卫东, 袁玉江, 张瑞波. 基于树木年轮的呼图壁河流域草地归一化植被指数重建. *东北林业大学学报*, 2012, 40(4): 26-30.
- [8] 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 等. 树轮记录的历史时期阿克苏河流域沙尘天气变化. *中国沙漠*, 2010, 30(5): 1040-1046.
- [9] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区235 a气候变化及降水趋势预测. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 803-808.
- [10] Fang K Y, Davi N, Gou X H, et al. Spatial drought reconstruction for central High Asia based. *Climate Dynamics*, 2010, 35: 941-951.
- [11] Hurrell J W, Kushnir Y, Visbeck M. The North Atlantic Oscillation. *Science*, 2001, 26: 603-605.
- [12] Gervais B R, MacDonald G M. Tree-ring and summer-temperature response to volcanic aerosol forcing at the northern tree-line, Kola Peninsula, Russia. *The Holocene*, 2001, 11: 499-505.
- [13] Osborn T J, Briffa K R. The spatial extent of 20th-century warmth in the context of the past 1200 years. *Science*, 2006, 311: 841-844.
- [14] Frank D, Esper J, Zorita E, et al. A noodle, hockey stick, and spaghetti plate: a perspective on high-resolution paleoclimatology. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 2010, 1(4):507-516.
- [15] Shao X M, Wang S Z, Zhu H F, et al. A 3585-year ring-width dating chronology of Qilian juniper from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *IAWA Journal*, 2009, 30(4): 379-394.
- [16] Shao X, Xu Y, Yin Z Y, et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17):2111-2122.
- [17] Yang B, Qin C, Wang J, et al. A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2014, 111(8):2903-2908.
- [18] Esper J, Shiyatov S G, Mazepa V S, et al. Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Climate Dynamics*, 2003, 21: 699-706.
- [19] Winter M B, Wolff B, Gottschling H, et al. The impact of climate on radial growth and nut production of Persian walnut (*Juglans regia* L.) in Southern Kyrgyzstan. *European Journal of Forest Research*, 2009, 128(6): 531-542.
- [20] Seim A, Tulyaganov T, Omurova G, et al. Dendroclimatological potential of three juniper species from the Turkestan range, northwestern Pamir-Alay Mountains, Uzbekistan. *Trees*, 2016, 30(3): 733-748.
- [21] Opała M, Niedźwiedz T, Rahmonov O, et al. Towards improving the Central Asian dendrochronological network- New data from Tajikistan, Pamir-Alay. *Dendrochronologia*, 2017, 41: 10-23.
- [22] Zhang T W, Yuan Y J, He Q, et al. Development of tree-ring width chronologies and tree-growth response to climate in the mountains surrounding the Issyk-Kul Lake, Central Asia. *Dendrochronologia*, 2014, 32: 230-236.
- [23] Zhang T W, Zhang R B, Yuan Y J, et al. Reconstructed precipitation on a centennial timescale from tree rings in the western Tien Shan Mountains, Central Asia. *Quaternary International*, 2015, 358: 58-67.
- [24] Chen F, He Q, Bakytbek E, et al. Reconstruction of a long streamflow record using tree rings in the upper Kurshab River (Pamir-Alai Mountains) and its application to water resources management. *International Journal of Water Resources Development*, 2017, 33(6): 976-986.
- [25] Zhang T W, Zhang R B, Lu B, et al. *Picea schrenkiana* tree-ring chronologies development and vegetation index reconstruction for the Alatau Mountains, Central Asia. *Geochronometria*, 2018, 45(1): 107-118.
- [26] Buras A, Thevs N, Zerbe S, et al. Productivity and carbon sequestration of *Populus euphratica* at the Amu River, Turkmenistan. *Forestry*, 2013, 86(4):429-439.
- [27] Opałowczarek M, Owczarek P, Rahmonov O, et al. The first dendrochronological dating of timber from Tajikistan- potential for developing a millennial tree-ring record. *Tree-Ring Research*, 2018, 74(1):50-62.
- [28] Opałowczarek M, Niedźwiedz T, Rahmonov O, et al. The Dendroclimatic potential of shrubs from Western Pamir-Alay (Tajikistan). *Association for Tree-ring Research*, 2014.
- [29] Opałowczarek M, Niedźwiedz T. Last 1100yr of precipitation variability in western central Asia as revealed by tree-ring data from the Pamir-Alay. *Quaternary Research*, 2018. doi:10.1017/qua.2018.21.
- [30] 张瑞波, 尚华明, 魏文寿, 等. 吉尔吉斯斯坦西天山上下线树轮对气候的响应差异. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(4): 1-6.
- [31] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山山区树轮气候研究若干进展. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(4):1-9.
- [32] Bulat Z, Karl-uwe H, Hilmar S. Searching for the best correlation between climate and tree rings in the Trans-Ili Alatau, Kazakhstan. *Dendrobiology*, 2018, 19: 119-130.
- [33] Araiylm K, Kuralay M, Nesibe K. et al. Tree-ring chronologies of *Pinus sylvestris* from Burabai Region (Kazakhstan) and their response to climate change. *Dendrobiology*, 2017, 78: 96-110.
- [34] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应. *生态学报*, 2010, (9): 2246-2253.

(下转23页)

- [58] 李杏朝. 微波遥感监测土壤水分的研究初探. 遥感技术与应用, 1995, 10(4): 1-8.
- [59] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法. 环境遥感, 1991(02): 89-98, 161.
- [60] Zeng X J, Xing Y Q, Shan W, et al. Soil water content retrieval based on Sentinel-1A and Landsat 8 image for Bei'an-Heihe Expressway. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 118-126.
- [61] 李新武, 郭华东, 李震, 等. 重复轨道SIR-C极化干涉SAR数据植被覆盖区土壤水分反演研究. 遥感学报, 2009, 13(3): 430-436.
- [62] Schmugge T J, Gloersen P, Wilheit T, et al. Remote sensing of soil moisture with microwave radio meters. Journal of Geophysical Research, 1974, 79(2): 317-323.
- [63] Jackson T J, Schmugge T J, Wang J R. Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies. Water Resources Research, 1982, 18(4): 1137-1142.
- [64] Camillo P T, Schmugge T S. Estimating soil moisture storage in the root zone from surface measurements. Soil Science, 1983, 135(4): 245-264.
- [65] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 被动微波遥感土壤水分反演研究综述. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 466-470.
- [66] Zhu Y C, Zheng Y C, Fang S B, et al. Analysis of the brightness temperature features of the lunar surface using 37 GHz channel data from the Chang'E-2 microwave radiometer. Advances in Space Research, 2019, 63(1): 750-765.
- [67] 郭英, 沈彦俊, 赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1162-1167.
- [68] 余凡, 赵英时. 基于主被动遥感数据融合的土壤水分信息提取. 农业工程学报, 2011, 27(6): 187-192.
- [69] Chauhan N S. Soil moisture estimation under a vegetation cover: combined active passive microwave remote sensing approach. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(5): 1079-1097.
- [70] Lakshmi V, Bolten J, Njoku E, et al. Monitoring of large scale soil moisture from air borne PALS sensor observations during SGP99. ProcInt Geosci Remote Sens Symp, Honolulu, HI, 2000.
- [71] 杨立娟, 武胜利, 张钟军. 利用主被动微波遥感结合反演土壤水分的理论模型分析. 国土资源遥感, 2011, (2): 53-58.
- [72] 李震, 郭华东, 施建成. 综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化. 遥感学报, 2002(6): 481-484, 539.
- [73] 赵天杰, 张立新, 蒋玲梅, 等. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分. 地球科学进展, 2009, 24(7): 769-775.
- [74] 卫炜. 基于主被动微波遥感联合的土壤水分监测研究. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [75] 孙亚勇. 基于C和L波段主被动微波遥感的土壤水分协同反演研究. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [76] 张祥, 陈报章, 赵慧, 等. 基于时序Sentinel-1A数据的农田土壤水分变化检测分析. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 338-345.
- [77] 何连, 秦其明, 任华忠, 等. 利用多时相Sentinel-1 SAR数据反演农田地表土壤水分. 农业工程学报, 2016, 32(3): 142-148.
- [78] 闫峰, 李茂松, 王艳姣, 等. 遥感技术在农业灾害监测中的应用. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 131-136.
- [79] 苏永荣, 官阿都, 吕潇然, 等. 基于改进温度植被干旱指数的农田土壤水分反演方法. 遥感信息, 2015, (6): 96-101.
- [80] 汪倩倩, 汪权方, 王新生, 等. 地面资料稀缺区域的农田土壤水分微波与光学遥感协同反演方法研究. 中国农学通报, 2018, 34(36): 117-123.
- [81] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. 遥感学报, 1997, 1(1): 24-31.
- [82] Song Y, Fang S B, Liang H Y, et al. Comparison and application of agricultural drought indexes based on MODIS data. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(2): 215-220.
- [83] Fang S B, Yu W G, Qi Y. Spectra and vegetation index variations in moss soil crust in different seasons, and in wet and dry conditions. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38: 261-266.
- (上接16页)
- [35] Chen F, Zhang T, Seim A, et al. A.: Juniper tree-ring data from the Kuramenian Mountains (Republic of Tajikistan), reveals changing summer drought signals in western Central Asia. Clim-Past-Discuss, <https://doi.org/10.5194/cp-2018-44>, in review, 2018.
- [36] Chen F. Comparison of drought signals in tree-ring width records of juniper trees from Central and West Asia during the last four centuries. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(4): 1-10.
- [37] Schweingruber F H. Measurement of densitometric properties of wood. In: Hughes M K, Kelly P M, Pilcher J R, Lamarche J V C (eds). Climate from Tree Rings. Cambridge University Press, New York, 1982: 8-11.
- [38] Schinker M G, Hansen N, Spiecher H. High-frequency densitometry: a new method for the rapid evaluation of wood density variations. International Association of Wood Anatomists, 2003, 24(3): 231-239.
- [39] Sheppard P R, Graumlich L J, Conkey L E. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate. The Holocene, 1996, 6(1): 62-68.
- [40] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应. 生态学报, 2011b, 31(22): 6743-6752.
- [41] 陈拓, 秦大河, 李江凤, 等. 新疆昭苏云杉树轮纤维素 $\delta^{13}C$ 的气候意义. 冰川冻土, 2000, (4): 347-352.
- [42] 高琳琳, 勾晓华, 邓洋, 等. 西北干旱区树轮气候学研究进展. 海洋地质与第四纪地质, 2013, (4): 25-35.
- [43] Bakhtiyorov Z, Yu R, Monoldorova A, et al. Tree-Ring-Based summer temperature minimum reconstruction for Taboshar, Sogd Province, Tajikistan, Since AD 1840: Linkages to the Oceans. Preprints 2018, 2018060312, doi: 10.20944/preprints201806.0312.v1.
- [44] 陈峰, 王慧琴, 袁玉江, 等. 树轮最大密度记录的吉尔吉斯斯坦天山山区公元1650年以来的7—8月温度变化. 沙漠与绿洲气象, 2014, (4): 1-7.
- [45] Chen F, Yuan Y, Wei W, et al. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for Zajsan Lake area, East Kazakhstan. International Journal of Climatology, 2012, 32(7).
- [46] Zhang T W, Yuan Y J, Hu Y C, et al. Early summer temperature changes in the southern Altai Mountains of Central Asia during the past 300 years. Quaternary International, 2015, 358: 68-76.
- [47] Zubairov B, Balanzategui D, Heussner K, et al. Reconstruction of precipitation based on Schrenk Spruce Tree-Ring width in the Terskey Alatau, Kazakhstan. Berliner Geographische Arbeiten 121. 2018: 87-98.
- [48] Zhang R, Zhang T, Kelgenbayev N, et al. A 189-year tree-ring record of drought for the Dzungarian Alatau, arid Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 2017.
- [49] Zhang R, Shang H, Yu S, et al. Tree-ring-based precipitation reconstruction in southern Kazakhstan, reveals drought variability since A.D. 1770. International Journal of Climatology, 2016.
- [50] Chen F, Mambetov B, Maisupova B, et al. Drought variations in Almaty (Kazakhstan) since AD 1785 based on spruce tree rings. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016.
- [51] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的吉尔吉斯斯坦东部过去百年干湿变化. 干旱区地理, 2013, 36(4): 691-699.
- [52] Zhang T W, Diushen M, Bakytbek E, et al. Tree ring record of annual runoff for Issyk Lake, Central Asia. Journal of Water and Climate Change, 2018.
- [53] Chen F, Chen F, Zhang R B, et al. A 426-year drought history for Western Tian Shan, Central Asia, inferred from tree rings and linkages to the North Atlantic and Indo-West Pacific Oceans. Research Paper, 2013, 23 (8): 1095-1104.
- [54] Wang H Q, Chen F, et al. Comparison of drought-sensitive tree-ring records from the Tien Shan of Kyrgyzstan and Xinjiang (China) during the last six centuries. Advances in Climate Change Research, 2017, 8(1): 18-25.
- [55] 张同文, 袁玉江, 陈向军, 等. 利用树轮宽度资料重建东天山木垒地区降水量. 第四纪研究, 2015, 35(5): 1121-1133.