

夏干萨特树轮年表中降水信息的探讨与 326 年降水重建

袁玉江¹, 邵雪梅², 李江风¹, 李新建¹, 唐凤兰¹

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:夏干萨特位于新疆天山中段乌鲁木齐河山区, 在此干旱、半干旱地区的森林下限所采集的天山云杉 (*Picea schrenkinna* var. *tianschanica*) 树轮样本建立的树轮宽度年表具有最大的平均敏感度和最大的标准差, 说明该年表可能含有最多的降水信息。利用相关分析的方法计算了年轮宽度指数和气候要素间的相关关系, 发现 5 月份的降水与年表的相关最好。进一步计算了旬降水量与年表的相关关系, 发现 5 月下旬的降水与年表的单相关系数最高, 5 月下旬的降水是森林下限云杉生长的主要限制因子。这一结果具有明确的树木生理学意义。云杉直径生长主要在 5~8 月份, 其中 5~6 月份形成大约一半的年轮。5 月下旬位于年轮形成关键时段的中部, 为轮宽形成的最活跃期。同时 5 月下旬降水的大变率与夏干萨特年表的高敏感度相一致, 从另一角度说明了 5 月下旬降水作为森林下限天山云杉生长关键限制因子的适当性。重建了大西沟气象站 5 月下旬 326a 的降水并分析了其长期变化特征, 发现 320 多年来的 5 月下旬降水分为 8 个完整的干湿变化阶段, 其中最干期出现在 1701~1722 年, 最湿期出现在 1961~1981 年。降水序列具有显著的 64, 32, 22, 14, 5 和 11a 变化周期, 其中的 22a 及 11a 周期与太阳黑子的活动周期相一致。利用方差分析方法进行了未来干湿变化趋势的预测, 发现 2001~2007 年以降水偏少为主, 而 2008~2015 年以偏多为主, 这对于北疆重要粮食作物冬小麦的长期产量预报及种植规划具有重要意义。

关键词: 乌鲁木齐河山区; 森林下限; 天山云杉; 树轮年表; 5 月下旬降水

Discussion of Precipitation Information in Xiagansate Tree-ring Chronology and 326 Year Precipitation Reconstruction

YUAN Yu-Jiang¹, SHAO Xue-Mei², LI Jiang-Feng¹, LI Xin-Jian¹, TANG Feng-Lan² (1. Urumqi Institute of Desert and Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Resources, CAS, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2048~2053.

Abstract: Xiagansate is located in the lower tree-line of the mountainous area of the Urumqi River in the middle of Tianshan Mountain. Tree ring samples of spruce (*Picea schrenkinna* var. *tianschanica*) was collected from the lower forest zone. The ring-width chronology of Xiagansate shows high mean sensitivity and high standard deviation which implied that it may contain much information of precipitation in such a semiarid region.

The relationship between tree-ring chronology and climatic factors was studied by correlation analysis. The ring-width chronology shows the best relationship with the precipitation of May. Further study shows that the precipitation of the last ten-day of May has the best relationship with the chronology. The result has distinct physiological significance. The radial growth of spruce was mainly occurred from May to August, and half of the ring width may be formed from May to June. The last ten-day of May is

基金项目: 中国科学院创新工程资助项目(kzcx2-314); 国家自然科学基金资助项目(40265002); 国家重大基础研究资助项目(1999043502); 新疆科委课题资助项目(980103002)

收稿日期: 2001-06-24; 修订日期: 2002-08-18

作者简介: 袁玉江(1955-), 男, 山东省菏泽县人, 研究员。主要从事树轮气候、树轮水文及气候与环境研究工作。Email: yuanyuj5502@sina.com

the key period of radial growth and also the most active period. The precipitation of the last ten-day of May has high deviation also correspond with the high mean sensitivity of the ring-width chronology, which indicates the propriety of the relationship.

The 326 years' precipitation of the last ten-day of May was reconstructed from the ring-width chronology and the low-frequency variations of the reconstructed series was analyzed. There were 8 fully dry-wet periods in the past 326 years, the driest period occurred from 1701 to 1722 and the wettest period occurred from 1961 to 1981. The frequency study shows that the reconstructed series has 64a, 32a, 22a, 14a, 5a and 11a cycles, some of which have relations with the solar activity such as the 11a sunspot cycle and the 22a Hale cycle.

The method of variation analysis was used to predict the dry-wet conditions of future years. The prediction will be very helpful for the yield predict and the planning of cropping system of winter wheat in North Xinjiang.

Key words: mountainous area of Urumqi river; lower tree-line; Tianshan mountain spruce; tree-ring chronology; precipitation for the last ten-day of May

文章编号:1000-0933(2002)12-2048-06 中图分类号:S718.45,Q945.17,P467 文献标识码:A

生长在干旱、半干旱地区森林下限的树木,其轮宽生长主要受降水多少的制约^[1],但在不同的地区及采点,限制树木生长的降水时段往往不同,利用树木年轮重建若干个月的降水总量,作者和其他年轮气候工作者曾做过大量工作^[2~4]。而利用树木年轮重建单旬的降水量,目前在国内外还无人涉及,仅见到美国年轮气候学家 Stockton 利用树木年轮重建过某一旬的湖水位^[5]。采自中天山北坡乌鲁木齐河山区海拔最低的森林下限夏干萨特沟树轮年表与山区 5 月下旬的降水相关最为密切,是否可据此重建 5 月下旬的降水量,作了较为细致的探讨。新疆小麦孕穗-灌浆期多出现在 4~6 月份,正是南、北疆多数河流流量较小的时期,这个时期的降水对小麦产量影响较大^[6]。北疆冬小麦气象产量指数对所有月降水因子中的 5 月降水具有最好的正响应^[7],而在 5 月份的 3 个旬中,又以下旬的降水更为重要(北疆冬小麦的气象产量指数与天山 大西沟气象站 5 月下旬降水的单相关系数为 0.394($N=39$),接近 99% 的信度水平,与上旬及中旬的降水无关),故重建天山 大西沟气象站 5 月下旬的降水长序列,进行周期外推预报,对于北疆的重要粮食作物冬小麦的长期产量预报及其种植规划具有重要意义。为此,在充分探讨 5 月下旬降水影响森林下限夏干萨特沟树轮生长的树木生理学意义之后,作为从树木年轮中提取更为细致的降水信息的尝试,重建了乌鲁木齐河山区 5 月下旬的降水量,分析其历史变化特征,并预测了其未来变化趋势。

1 资料

树木年轮资料使用采自天山中段乌鲁木齐河山区的 9 个采点上的天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*)树轮宽度年表^[8]。在 9 个树轮年表中,海拔最低的夏干萨特标准化树轮年表具有最大的平均敏感度 0.394,最大的标准差 0.455。这说明,在乌鲁木齐河山区的 9 个树轮年表中,该年表中可能含有最多的降水信息。这完全符合采自干旱、半干旱地区森林下限的树木,较其它部位树木含有更多的降水信息的年轮气候学基本原理。

气候资料采用位于乌鲁木齐河山区的大西沟气象站(海拔 3539m),1959~1993 年的月平均气温、月降水量及旬降水量。

2 夏干萨特树轮年表轮宽指数与气候要素的相关性

取 1959~1993 年天山云杉生长期 4~9 月份大西沟气象站的月平均温度及月降水总量,对夏干萨特标准化树轮年表进行响应函数分析,复相关系数为 0.744,解释方差为 55.3%,信度水平达 99.9%。从图 1 中带 * 号的月份(达到 95% 信度水平)可见:当 5 月份降水偏多,5 月份温度偏低时,有利于森林下限的夏干萨特年表形成较宽的年轮。同时前期生长对当年年轮生长也具有较大的影响。相关函数计算表明,在 4~9 月份的生长期气候中,只有 5 月份的降水与该年表的相关系数(0.49)达到 99% 的信度水平,这

证实了响应函数的结果是可信的,并进一步说明,5 月份降水相对于 5 月份温度是更为重要的年轮生长限制因子。

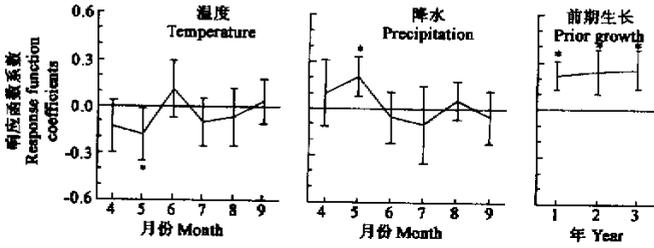


图 1 夏干萨特树轮年表对大西沟气象站月温度及月降水的响应函数

Fig. 1 The response function for Xiagansate tree-ring chronology and monthly temperature and precipitation data for Daxigou meteorological station

此外,对于新疆的植物生长,4~6 月份的春旱是关键的影响时段,特别是 5 月份,天山东部地区^[9]及天山西伊犁地区的树木年轮对气候的响应函数^[10]均表明,该月降水是影响树木年轮生长的关键因子,乌鲁木齐河流域位于两地之间的天山中段,从地域及气候大范围变化的相似性看,其下限年表与 5 月份降水关系密切就是很自然的了。

计算 1960~1993 上年 1 月上旬-当年 9 月下旬大西沟各旬降水量与夏干萨特年表的单相关系数,发现以当年 5 月下旬降水与该年表的单相关系数为最高($r=0.72$),远远超过了 99.9% 的信度水平(图 2),明显高于 5 月降水量与该年表的相关系数(0.49)。这说明,在对森林下限夏干萨特树轮年表年轮生长起主要限制作用的 5 月份降水总量中,又以 5 月下旬的降水更为重要。

乌鲁木齐河山区大西沟气象站 5 月下旬降水在有记录的 35a 中,最少的 1974 年,降水量为 0,最多的 1966 年高达 52mm,具有很大的变差。从相邻年份看,1977 年 5 月下旬降水为 9.4mm,1978 年为 51.4mm,增多近 4 倍,1980 年为 3.4mm,1981 年为 25.8mm,增多 7 倍。这与夏干萨特树轮年表在全部 9 个采点中具有的最大标准差(0.455)、最大的平均敏感度(0.394)及其多数的年轮的序列中多次出现缺轮的这些与树木采点状况有关的鲜明年轮生长特征完全相吻合。这表明 5 月下旬降水作为夏干萨特树轮年表主导气候限制因子是可信的。

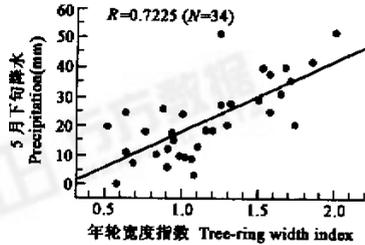


图 2 5 月下旬降水与夏干萨特年表的线性相关图

Fig. 2 The figure of linear correlation between Xiagansate tree-ring chronology and precipitation for the last ten-day of May

5 月下旬降水量的大变差是由大气环流决定的,主要与 5 月份副热带西风急流北进快慢及欧洲脊 5 月下旬控制原苏联欧洲地区的天数多少有一定关系。一般而言,副热带西风急流的位置 4 月份在青藏高原以南,5 月份在青藏高原,6 月份在南疆,7 月份在天山,8 月份又返回南疆,9 月份在青藏高原北部。在位于新疆西部的 75°E 剖面上,5 月份的副热带西风急流中心的北移是急骤的。在 6 月初完成北跳的过程,并稳定控制新疆。因而随着副热带西风急流的向北推进,新疆的降水由南到北,自西向东,从 5 月中下旬迅速增加。此外,从 5 月 11 日到 6 月 15 日位置的这一时期,南支西风急流已经北上青藏高原,部分时间可达新疆,欧洲高压脊曾有两次季节性的东移,第一阶段是 5 月 11 日到 5 月 25 日,高压脊从 30°E 的北欧地区逐步东移到 50°E 的东欧地区。第二阶段是在 5 月 26~31 日,高空脊突然西跳到 20°E,然后逐步东移到 35°E 或 55°E。且这两次东移,前一阶段快,后一阶段慢。由于当脊在前苏联欧洲地区发生、发展和维持时,新疆

西部国境或偏西的中亚为槽的发生发展地和维持地区,槽接近新疆,偏南的里咸海脊的活动对新疆天气影响很大,表现为天气强,突发性强。5月11日到6月15日,欧洲脊的两次从西向东移入前苏联欧洲地区,加之5月末的一次突然西跳,在副热带西风急流的配合下,就更加增强了新疆5月中下旬降水天气变化的突发性与多变性。这可能就是5月下旬天山中部山区降水年际变率大的原因所在。一般而言,在副热带西风急流5月北进快,而5月下旬欧洲脊稳定在原苏联欧洲地区天数多的年份,天山山区中部5月下旬乌鲁木齐河流域降水偏多,反之降水偏少^[11]。

森林下限位于草原向森林的过渡地带,降水量小,且所采集的年轮标本树木,一般又位于坡陡、土薄之处,同时云杉又属于喜荫湿的树种,这些决定了在干旱年份,本就不多的降水,因坡度大而大量流失,土壤中保持的少量水分,因水分不足而紧附在土粒上,浅根的特性,加之土层又薄,使得云杉所能吸收的水分就更少,这对喜荫湿的云杉的生长非常不利,致使树木因缺水而发生萎蔫,直接影响根系的形成和活动,进而影响树木的径向生长,从而形成很窄的年轮或缺轮。位于森林下限夏干萨特年表中的不少树木,在大旱的1943及1945年形成缺轮,就充分说明了该处水分对天山云杉的年轮生长的强烈限制作用。此外,天山云杉的生长期,一般位于4月中下旬~9月上中旬,而且直径生长主要在5~8月份。根据国外的研究,“云杉的特点是年轮生长较快,在5~6月份形成大约一半的年轮,7月份以后就不很活跃”^[12]。如前所述,以月为基本时段的相关计算表明,以5月降水与夏干萨特年表相关最好($r=0.49$),说明5月降水对云杉年轮生长的重要性,而以旬为基本时段的降水量与夏干萨特年表,以5月下旬的相关系数最佳($r=0.7225$)。从5~6月份为形成云杉年轮的关键时段看,5月下旬基本位于这一关键时段的中部,也即轮宽形成的最活跃期,其生理意义是明确的。5月下旬降水的大变率与夏干萨特年表的高敏感度相一致,则从另一角度表明了5月下旬降水作为影响天山云杉森林下限夏干萨特年表关键因子的适当性。

3 重建5月下旬降水的长期变化

为得到较稳定的校准方程,有必要剔除校准期内的异常年份,这一工作以前曾经进行过^[13]。采用逐年剔除法建立夏干萨特年表当年(t)年轮指数序列与大西沟气象站5月下旬降水的校准方程。计算结果表明,1978年为一异常年份,该年5月下旬降水达到51.4mm,比校准期均值偏多148%,为校准期(即建立年轮降水校准方程的时期:1960~1993年)中的位于第一位的最大降水年份,这使得在1978年降水对夏干萨特年表树轮生长的制约作用大为减弱。将1978年剔除后,复相关系数为0.770,比不剔除该年时(0.72)明显提高,可多获得7.1%的5月下旬降水信息(解释方差),这对重建5月下旬降水是有益的。剔除1978年后所得的校准方程为:

$$P_t = -6.633 - 1.086 + 23.843I_t$$

其中, P 为乌鲁木齐河大西沟气象站5月下旬的降水量, I 为夏干萨特树轮年表的年轮指数, t 表示年份。该方程的相关系数为0.770, F 检验值为 $F_{1,31}=45.159$,远远超过了99.9%的信度水平。由该方程可重建出1667~1993年乌鲁木齐河大西沟5月下旬的降水量。利用逐一剔除法对此校准方程进行交叉检验^[14]表明:其交叉检验得到的误差缩减值(RE)达0.527,相关系数(r)为0.727,一阶差相关系数(Rd)为0.401,这都指示此校准方程是稳定的,可以用于5月下旬的降水重建,但 Rd 小于 r ,表明相对于5月下旬的实际降水量而言,重建值在高频变化方差上可能会具有一定的损失,这与树木年轮生长对输入的气候信号多具有一定的低通滤波作用及5月下旬以后的生长季降水尽管不是主要限制因子,但对因5月下旬降水不足所造成的年轮宽度生长量不足具有一定的补偿作用有关。

从重建的5月下旬降水序列中滤除小于8a高频波动得到长期变化(见图3),根据图3中的距平可将近320a来的5月下旬降水大致划分为以下8个完整的干湿变化阶段(见表1)。近326年来,最干的干期出现在1701~1722年,其最大降水距平百分率为-90.4%,最长的干期位于1908~1960年,共53a,最湿的阶段在1961~1981,其最大降水距平百分率为96.2%,最长的湿期位于1723~1763,持续了41a。

最大熵谱分析计算表明1667~1992年的5月下旬降水重建序列,按重要程度排列具有显著的64a、32a、22a、14a、11a的变化周期。其中的22a及11a的周期与太阳黑子的活动周期相一致,64与32a、22与11a周期可能存在包含关系。

为发现 5 月下旬降水中的百年尺度的长期变干或变湿趋势,依次向后滑 1a,取最小时段为 100a,时段增量为 1a,计算所有可能的年代与 5 月下旬降水的单相关系数,发现存在最长达 241a(1719~1959 年)的缓慢变干趋势(见图 3),变干率为 3mm/100a,其单相关系数达 -0.209,信度水平为 99.9%。这一变干趋势与乌鲁木齐河流域 1 号冰川前小冰期形成的三道终碛垄规模不断减小所揭示的环境变干的大背景^[15]相吻合。

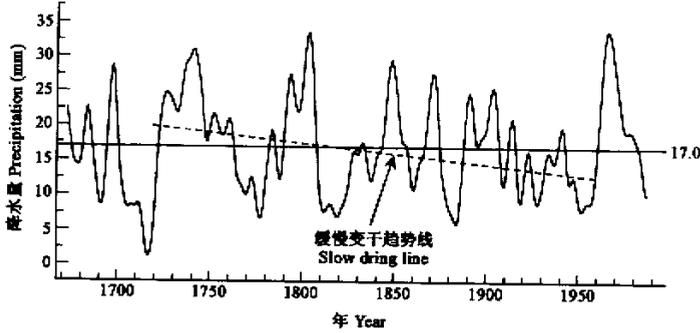


图 3 大西沟气象站 5 月下旬降水重建值低通滤波曲线

Fig. 3 The low-pass filtering curve of precipitation reconstructed for the last ten-day of May for Daxigou meteorological station

利用 1667~1959 大西沟 5 月下旬降水重建值、1960~1998 年的实测值共 332a 资料,由方差分析方法进行未来变化趋势的预测,并预留 10a 资料(1989~1998)用于独立预报检验,结果表明,当取与最大频谱所揭示的 14a 周期相近的 15a 周期时,在独立时段上的检验效果最佳,相关系数为 0.709,信度水平达 98%,误差缩减值为 0.342,说明预报效果优于持续性预报。为展示长期趋势,对预测值进行低通滤波后发现:未来 2001~2007 年偏少为主,2008~2015 年偏多为主。由前可知,前段不利于北疆冬小麦的丰产,后段相反。

表 1 乌鲁木齐河 5 月下旬重建降水的干湿阶段

Table 1 The wet-dry periods of precipitation reconstructed for the last ten-day of May for Urumqi river basin

	偏干期 Partial dry period	年数(a) Number of year	最大距平百分率(%) Maximum anomaly percentage	偏湿期 Partial wet period	年数(a) Number of year	最大距平百分率(%) Maximum anomaly percentage
1	1676~1681	6	-16.4	1682~1686	5	25.3
2	1687~1694	8	-50.0	1695~1700	6	66.1
3	1701~1722	22	-90.4	1723~1763	41	79.6
4	1764~1790	27	-60.9	1791~1808	18	94.2
5	1809~1843	35	-59.5	1844~1856	13	71.4
6	1857~1866	10	-37.3	1867~1875	9	60.0
7	1876~1888	13	-65.4	1889~1907	19	48.3
8	1908~1960	53	-53.4	1961~1981	21	96.2

4 结语

(1) 天山中部北坡乌鲁木齐河大西沟 5 月下旬的降水是影响森林下限夏干萨特云杉年表年轮生长的主要限制因子,它具有明确的树木生理学意义。

(2) 乌鲁木齐河流域 5 月下旬降水,近 320a 来,经历了 8 个干湿阶段,最干的干期出现在 1701~1722 年,最大降水距年百分率为 -90.4%,最长的干期位于 1908~1960 年,共 53a,最湿的阶段在 1961~1981,其最大降水距年百分率为 96.2%,最长的湿期位于 1723~1763,持续了 41a。5 月下旬降水重建序列,按重

要程度排列具有显著的 64、32、22、14、5 及 11a 的变化周期。存在最长达 241a(1719~1959 年)的缓慢变干趋势,变干率为 3mm/100a,其单相关系数达 -0.209,信度水平为 99.9%。这一变干趋势与乌鲁木齐河流域 1 号冰川前小冰期形成的三道终碛垄规模不断减小所揭示的环境变干的大背景相吻合。未来 2001~2007 年 5 月下旬降水以偏少为主,2008~2015 年以偏多为主。

参考文献

- [1] Fritts H C. *Tree rings and climate*. London: Academic Press, 1979.
- [2] Lisa J G. Precipitation variation in the Pacific northwest (1676~1975) as reconstructed from tree rings. *Annals of the Association of American Geographers*, 1987, **77**(1): 19~29.
- [3] Shao X M(邵雪梅), Wu X D(吴祥定). Tree-ring chronologies for *Pinus armandi franch* from Huashan, China. *Acta Geographica Sinica*(in Chinese)(*地理学报*), 1994, **49**(2):174~178.
- [4] Yuan Y J, Li J F, Zhang J B. 348-year precipitation reconstruction from tree-rings for the north slope of the middle Tianshan mountains. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, **15**(1): 95~104.
- [5] Stockton C W, Fritts H C. Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabasca by analysis of tree rings. *Water Resources Bulletin*, 1973, 9.
- [6] Xu D Y(徐德源), et al. *Agroclimatic resource and demarcation in Xinjiang* (in Chinese). Beijing: China meteorological press, 1989. 119~122.
- [7] Pan S Zh(潘淑贞), Yuan Y J(袁玉江). *The response function and yield forecast for winter wheat of norther Xinjiang*. In: *the crops of agrometeorology in Xinjiang* (in Chinese). Beijing: China meteorological press. 1988;103~109.
- [8] Li J F(李江风), Yuan Y J(袁玉江), You X Y(由希尧). 360 year's runoff reconstruction in the Urumqi river basin using tree rings. *Quaternary Sciences*(in Chinese)(*第四纪研究*), 1997, (2): 131~137.
- [9] Yuan Y J(袁玉江), Li J F(李江风). The response functions of tree ring chronologies in eastern Tianshan Mountain. *Arid Land Research* (in Chinese)(*干旱区研究*), 1994. **11**(4):45~51.
- [10] Yuan Y J(袁玉江), Li J F(李江风). The response functions of tree ring chronologies in western Tianshan Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*(in Chinese)(*冰川冻土*), 1995, **17**(2): 170~177.
- [11] Zhang J B(张家宝), et al. *The instructional handbook of short-term weather forecast in Xinjiang* (in Chinese). Urumqi: Xinjiang people's press, 1986. 11~50.
- [12] Wu X D(吴祥定), et al. *Tree-ring and climate change* (in Chinese). Beijing: China meteorological press, 1990. 14~19.
- [13] Li J F(李江风), Yuan Y J(袁玉江). The effect of snow in tree-ring growth. *Xinjiang University Journal*(in Chinese)(*新疆大学学报*), 1984, **1**(2): 85~92.
- [14] Li J F(李江风), Yuan Y J(袁玉江), You X Y(由希尧), et al. *Dendrohydrology research and application* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000. 156~158.
- [15] Shi Y F(施雅夫). Glacier recession and lake shrinkage indicating the climatic warming and drying trend in central Asia. *Acta Geographica Sinica*(in Chinese)(*地理学报*), 1990, **45**(1): 1~13.