

黑河流域树木液流秋末冬初的峰值现象

陈仁升, 康尔泗, 张智慧, 赵文智, 金博文, 宋克超

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区流域水文及应用生态实验室, 兰州 730000)

摘要:应用 3 套综合环境观测系统, 分别布设在黑河上游祁连山区、中游绿洲边缘和下游荒漠河岸林系统, 对青海云杉、樟子松、二白杨、白榆、沙枣和胡杨液流量进行了长期观测, 最长观测时间为 2002 年夏季到 2005 年初。观测结果表明, 不管是常绿树种还是落叶树种, 树木液流量均会在秋末冬初出现一个峰值, 而此时中下游地区的峰值大于夏季。出现这个峰值的时间, 正是当地落叶树种的落叶期, 也是生长季节向非生长季节过渡的特殊时期, 在这个特殊的生长阶段, 北半球中高纬度四季分明地区现有的不同树种的观测结果均表明, 有这样一个峰值的存在, 但在峰值相对大小上有差异。不同地区的观测结果表明, 同一地点不同树种液流量大的周期波动具有一致性, 而不同地点同一树种大的周期波动互异, 这种大的周期波动与当地气候环境条件有关, 我国西北干旱区出现秋末冬初液流量大于生长季节的现象, 正是由于当地恶劣的气候环境条件所造成的。秋末冬初出现的液流量峰值现象, 类似动物冬眠前的准备, 是树木为应对严寒的冬季和漫长的早春而采取的生理措施。

关键词:黑河; 液流量; 峰值; 气候条件

文章编号:1000-0933(2005)05-1221-08 **中图分类号:**Q142.8, Q948, S718 **文献标识码:**A

Peak phenomenon of sapflow in late autumn to early winter in Heihe River Basin, Northwest China

CHEN Ren-Sheng, KANG Er-Si, ZHANG Zhi-Hui, ZHAO Wen-Zhi, JIN Bo-wen, SONG Ke-Chao

(Laboratory of Watershed Hydrology and Ecology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1221~1228.

Abstract: Sapflow has been measured at three sites in the Heihe river basin, which is one of the largest inland rivers in the arid region of northwest China. In this area water resources are limited, so knowledge of vegetation water use, both the timing and amount, is needed to better estimate the regional water balance. One site was located in each of the upper, middle and lower reaches. At the upper reach site, Xishui (38°32.2'N, 100°17'E, 2731m, annual precipitation is about 435.5mm) four Tsinghai Spruce trees (*Picea crassifolia*) were measured. At the middle reach site, an oasis shelter forest at Linze (39°21'N, 100°7.8'E, 1382m, annual precipitation is of 115mm) the three dominate tree species Mongol Scotch Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin), White elm (*Ulmus pumila*) and Gansu Poplar (*Populus gansuensis* C. Wang et H. L. Yang) were measured. The lower reach site is located in the lowland desert at Ejinaqi (42°01'N, 101°14'E, 920m, annual precipitation is of 39mm) where Euphrates Poplar (*Populus euphratica* Oliv.) and the Russia olive (*Elaeagnus angustifolia* Linn.) were measured. At the three sites ENVIS System (IMKO) were installed to measure microclimate variables, soil moisture and sapflow every half an hour. Sapflow was measured at 1.3m above ground level for each selected tree, and the measuring principle was the heat dissipation method. The measurements at all sites were made daily, from summer 2002 to Winter 2004.

The results at the three sites showed that, peak sapflow occurred in late autumn to early winter. At both the Linze and

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40401012, 40301010); 中国科学院方向性资助项目(KZCX3-SW-329); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新资助项目(KZCX2004112, KZCX2003113)

收稿日期:2004-05-22; **修订日期:**2005-03-02

作者简介:陈仁升(1974~), 男, 山东沂水人, 博士, 副研究员, 主要从事寒区水文过程研究. E-mail: crs2008@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40401012, 40301010), Department item of CAS (No. KZCX3-SW-329), Knowledge item of CAREERI (No. KZCX2004112, KZCX2003113);

Received date: 2004-05-22; **Accepted date:** 2005-03-02

Biography: CHEN Ren-Sheng, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in hydrological model in cold and arid regions. E-mail: crs2008@ns.lzb.ac.cn

Ejinaqi sites, this peak was larger than the sapflow measured in the growing season, no matter if the tree was deciduous or not. For deciduous trees peak sapflow occurred during the transition between the growth period and non-growth season. The results of different tree species from mid to high latitudes in north hemisphere, where the four seasons are experienced clearly show that, there peak sapflow occurred in this special period. However, the ratio of sapflow in this special period to the sapflow in growth season was different in different places. The large volume of water trees absorb in this special period was of course not used for transpiration. It is likely used to meet requirements during the cold winter and in the following early spring, and this phenomenon liked the preparations of animals for winter sleep.

All the research results showed that the fluctuations of sapflow of different tree species were similar, to some extent, at the same site. While results were dissimilar for same tree species at the different sites. The fluctuations of sapflow were mainly affected by the local climate or/and the soil water, that was, the environmental factors. The phenomenon that the sapflow in late autumn to early winter was larger than the sapflow in the growing season in the Arid Regions of Northwest China, were possibly caused by the local harsh environment, especially the lack of soil water content in summer.

Key words: sapflow; peak value; climate

树木蒸腾是森林系统能水消耗的主要途径^[1],利用树木液流来估算单株树木或林分的蒸腾量是一种新兴和迅速发展的技术^[2,3]。多数研究表明,理论上生长季节单株树木日液流量与日蒸腾量相等^[1]。刘奉觉等^[4]在大量野外观测的基础上,指出液流法与整容器法最为接近,液流法估算树木蒸腾量具有极高的精度。当前测定树木液流量的方法主要有3种,即热脉冲法^[5]、热扩散法^[6]和热平衡法^[7]。相对而言,热扩散法具有能够连续放热,实现连续或任意时间间隔液流速率的自动化测定的优势^[8],因而国际上长期自动测量树木液流主要应用热扩散和热平衡法^[9~12]。热脉冲法和热平衡法近年来在国内得到了较为广泛的应用^[3,4,13~15],而热扩散法则应用较少^[7]。

鉴于树木蒸腾主要发生在生长季节,尤其是落叶树种,因而目前国内外对树木液流的观测主要集中于树木生长季节。而受野外观测工作的实际困难和仪器性能的限制,国内对树木液流的观测很少有超过一个生长季节的,往往是在一个生长季节内不同阶段连续观测1~2d^[7],或者是在一个生长季节内连续观测一段较短的时间^[8,14~17],而且主要是探讨树木液流在日内小时尺度的变化,缺乏液流量长期连续的观测。国外树木液流的观测也主要以短期为主,根据研究目的的不同观测一个生长季节或一个月甚至是几天,观测树种主要为欧山毛榉^[18]、果树^[9]、赤桉^[10,11]、麻黄^[11]、橡树^[19]、挪威云杉、瑞士五针松、欧洲七叶松^[20]、黑杨、柳树^[21]、枫树^[22]等。长期连续观测主要在热带和亚热带地区针对橡树类树木^[23]、桉树类树木^[24]展开,在北半球中高纬度地区则主要以松树和云杉类常绿针叶树种为主^[1,25],而对落叶阔叶树种树木液流的长期测量较少^[26]。

我国西北干旱区水资源极度短缺并且往往是限制植被生长的一个控制因子^[27,28]。鉴于CO₂扩散和植被蒸腾之间的对比关系,水量短缺将会限制CO₂吸收和植被光合作用过程^[29,30]。由于低植被覆盖率、高土壤蒸发以及灌溉方式和灌溉制度落后,西北干旱区水资源利用效率极低^[31]。为合理利用西北地区有限的水资源,有必要探讨该区特殊的水文循环过程,而其中重要的一环就是荒漠绿洲系统树木蒸腾过程^[32]。西北干旱内陆河流域的主要水量来源为山区径流,中下游荒漠绿洲系统则为水资源的主要耗散区^[33],探讨荒漠绿洲系统树木蒸腾过程及耗水规律,不仅能够为我国西北干旱区水资源合理规划服务,而且可以为国际学术界提交我国西北干旱区某些特有树种耗水特征的基础资料和研究成果。

我国西北内陆河流域中游地区存在大量的防护林网,树种主要为二白杨、樟子松和榆树等,在下游荒漠河岸林系统则主要存在胡杨、沙枣、红柳等天然荒漠树种。利用液流量法估算荒漠树种蒸腾量的研究在国内开展较少,最近以内陆河的典型代表黑河的荒漠树种为研究对象,常学向等^[34,35]利用热脉冲法探讨了黑河中游临泽绿洲边缘二白杨和沙枣生长季节的日液流量变化,张小由等^[36,37]、司建华等^[38]分别利用热脉冲法分析了黑河下游额济纳旗绿洲边缘胡杨和怪柳生长季节日液流量的变化过程。利用热扩散法对黑河中下游几种荒漠树种液流量进行了连续观测,主要探讨了荒漠绿洲系统生长季节树木蒸腾^[39]和气孔导度^[40]对周围环境因子的响应,分析了树木液流量的季节变化^[40]。在这些研究中,发现在落叶树种的落叶期内,不管是落叶树种还是常绿树种,树木液流量都会出现一个相对较大的峰值,尤其是落叶树种^[40]。经过对原始数据、仪器原理及仪器运行情况进行检查,并没有发现意外原因^[40]。鉴于当时仅有一个年度的观测资料,无法说明这种现象是一个特殊年份的偶然现象,还是温带树木特有的耗水特征。为此,本文补充了最新的观测资料,并在黑河祁连山浅山区对青海云杉液流量进行了观测,专文提出秋末冬初树木液流量的峰值现象,以引起树木生理学、林学和水文与水资源领域专家的重视与探讨。

1 试验点和研究方法

1.1 试验点概况

本次研究的3个试验点分别位于黑河上游甘肃祁连山水源涵养林研究院西水定位研究站(38°32.2'N,100°17'E,2731m)、

中游绿洲边缘的中国科学院临泽综合观测试验研究站(39°21'N, 100°7.8'E, 1382m)和下游荒漠地区的额济纳旗(42°01'N, 101°14'E, 920.5m)。

西水试验点主要树种为青海云杉(*Picea crassifolia*), 多年平均气温 0.8℃, 年均降水量 435.5mm, 年蒸发量 1051.7mm (ϕ_{20}), 平均相对湿度 60%。

临泽试验点林分为人工混交林, 樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin)、白榆(*Ulmus pumila*)和二白杨(*Populus gansuensis* C. Wang et H. L. Yang)是本区的主要优势种。土壤为沙壤土。该区多年(1967~1996年)平均降水量 115mm, 6~8月份和 5~9月份降水分别占全年降水量的 61%和 82%。多年平均气温 7.8℃, 年总日照时数 3052.9h, 平均年蒸发量(ϕ_{20}) 2124mm, 无霜期 128~203d, 平均 152d。水量来源主要为河水和地下水。

额济纳旗试验点位于额济纳旗国家级胡杨林保护区内, 胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)和沙枣(*Elaeagnus angustifolia* Linn.)为本区主要乔木树种, 土壤为风沙土。据额济纳旗气象站资料, 该区多年(1957~1998年)平均降水量 39mm, 蒸发量(ϕ_{20}) 3534mm, 多年平均气温 8.2℃, 年总日照时数 3595.2h。水量来源主要为中上游下泄河水补给。

受观测仪器限制, 在临泽和额济纳旗试验点, 对每个树种仅选择一株树进行观测, 在西水定位站共测量了 4 株青海云杉的液流量, 同时测量每株树的胸径(1.3m 处)、树冠投影面积及叶面积指数(LAI, LAI2050, LI-COR INC.)^[39,40]。

1.2 研究方法

在每个观测点布设一套综合环境观测系统 EERIL3(IMKO)。该系统能够测量气温、降水、两层风速、总辐射、反射辐射、净辐射、相对湿度、CO₂ 通量、气压等微气象要素, 7 层土壤水分、7 层地温、7 层张力以及地热通量等, 并能够根据需要增减探头^[39,40]。

树木液流量测量探头为 GmbH 公司生产, 分别安装在各选择树种的 1.3m 高度处。每一个树木液流传感器由两个探针、铜镍合金热电偶和一条专用加热线组成。测量原理为热扩散法^[6]。系统数采仪每 0.5h 读取 1 次数据。本研究以日为时间步长。

2 结果与讨论

2.1 液流量秋末冬初的峰值现象

西水试验点青海云杉 I 液流量观测时间为 2003 年 7 月 10 日~2004 年 8 月 30 日, 青海云杉 II~青海云杉 IV 液流量观测时间为 2004 年 9 月 23 日~2004 年 12 月 1 日。观测期间数据连续(图 1)。

由图 1 知, 西水观测点青海云杉 I 在 2003 年 10 月中旬到 11 月初, 也就是在该区落叶乔木和灌木的落叶期, 日液流量出现了一个峰值, 这个峰值大于青海云杉生长旺期(2003 年和 2004 年夏季)的液流量, 与该区落叶树种发芽期(2004 年 4 月份)的液流量相当。

青海云杉 II 在 2004 年 10 月中下旬出现峰值现象, 青海云杉 III 和青海云杉 IV 在观测期间, 日液流量变化规律基本相同, 在 11 月初也出现峰值现象。3 株青海云杉共同在 2004 年 11 月 9 日前后又出现一个相对较小的峰值。总体看, 3 株观测树木日液流量变化规律具有一致性(图 1)。

临泽点树木液流观测自 2002 年 5 月 27 日起, 到 2004 年 12 月 20 日止。由于野外工作的实际困难和受意外因素影响, 观测数据出现断续(图 2), 白榆有效观测为 909d, 樟子松为 607d, 二白杨为 837d。

临泽试验点各树种液流量在秋末冬初均出现相对较大的峰值, 尤其是落叶树种白榆和二白杨。白榆和二白杨一般在 10 月初开始落叶, 从落叶开始到叶子全部落完大约 1 个月时间。从图 2 知, 白榆和二白杨有接近 3a 的观测资料, 两落叶树种自落叶开始液流量开始变大, 特别是 11 月中下旬, 液流量比生长旺季的 7~8 月份还大。也就是说, 两落叶树种在叶子全部落完以后, 体内树液的流动量很大, 而此时已经没有光合作用。常绿树种樟子松在 10 月份到 12 月份之间, 也具有较大的液流量, 但其比生长季节增大较小。3 树种液流量的年内和年际大波动具有相似性, 而一些小波动则存在一定的差异, 这种差异是树种不同造成的, 而大周期波动具有相似性的原因, 可能是这 3 种树种同时受同一环境因子的胁迫作用, 这应该是当地的气候条件。

额济纳旗点沙枣树木液流观测期为 2002 年 6 月 12 日~2005 年 1 月 13 日, 观测也存在中断现象(图 3), 有效观测为 761d。胡杨观测序列相对较短, 观测数据仅到 2003 年 8 月 10 日, 有效观测为 308d, 因而只有一个秋末冬初的液流量数据(图 3), 无法验证 2002 年秋末冬初所出现的峰值现象。沙枣有 3a 的秋末冬初液流量数据, 2002 年秋末冬初液流量的峰值大于 2003 年和 2004 年同期的液流量, 但其年内波动规律, 即年内相对大小基本一致。沙枣和胡杨间一般在 10 月上旬开始落叶。由图 3 知, 沙枣和胡杨液流量一般在 10 月中旬出现峰值现象, 这个峰值大于夏季的液流量。沙枣和胡杨液流量在 2002 年的大周期波动也存在相似性。胡杨和沙枣在 2003 年夏季液流量均比 2002 年同期偏小。

2.2 液流量秋末冬初峰值现象的初步分析及相关证据

上述结果是在对仪器记录的原始数据进行严格检查与校正的基础上获得的, 同时对仪器原理及仪器运行过程等进行分析, 没有发现异常问题。因而可以认为液流量在秋末冬初的峰值现象是存在的。

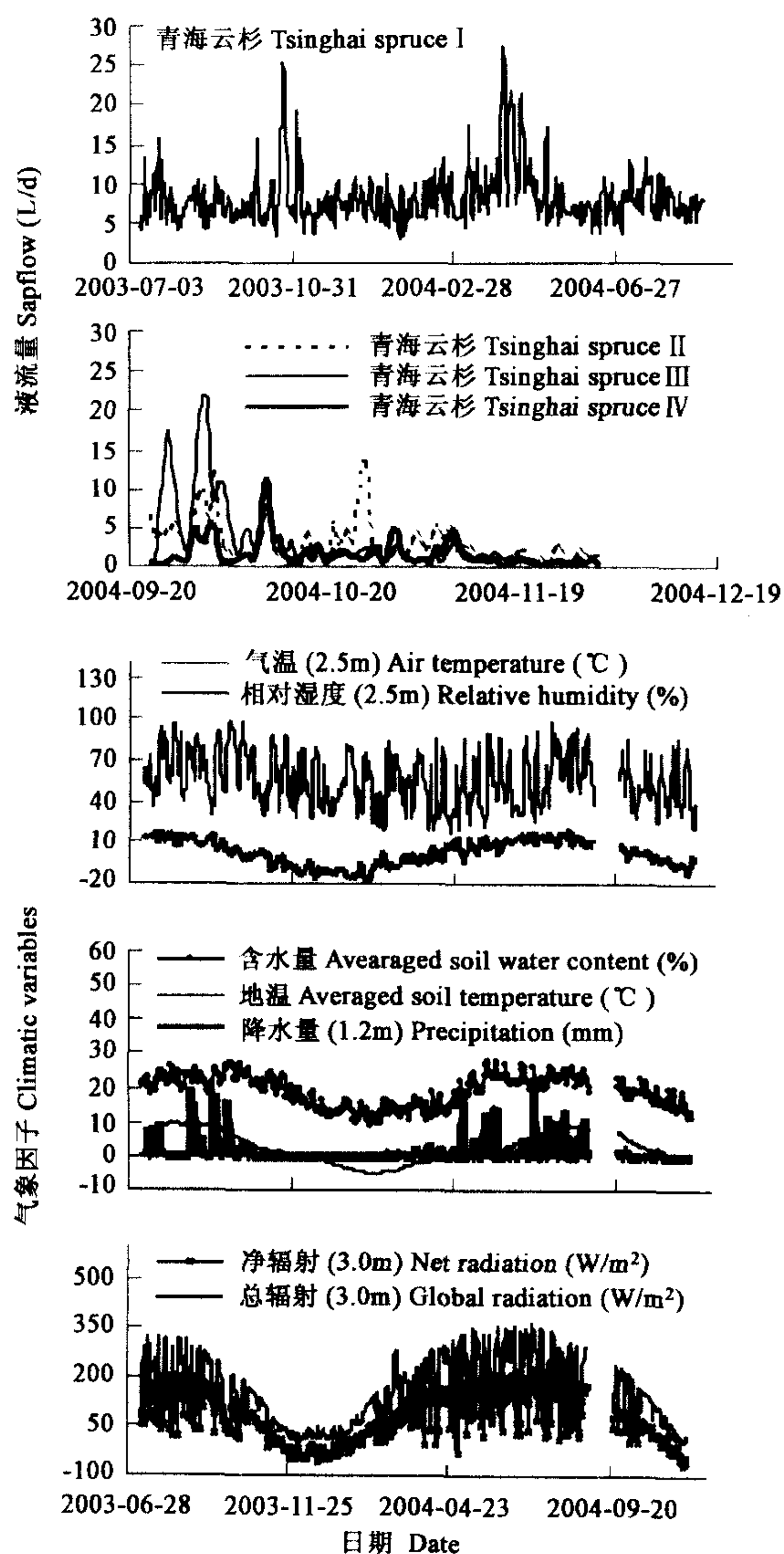


图1 西水试验点日液流量及微气象因子变化

Fig. 1 Fluctuation of daily sapflow and meteorological variables at the Xishui site

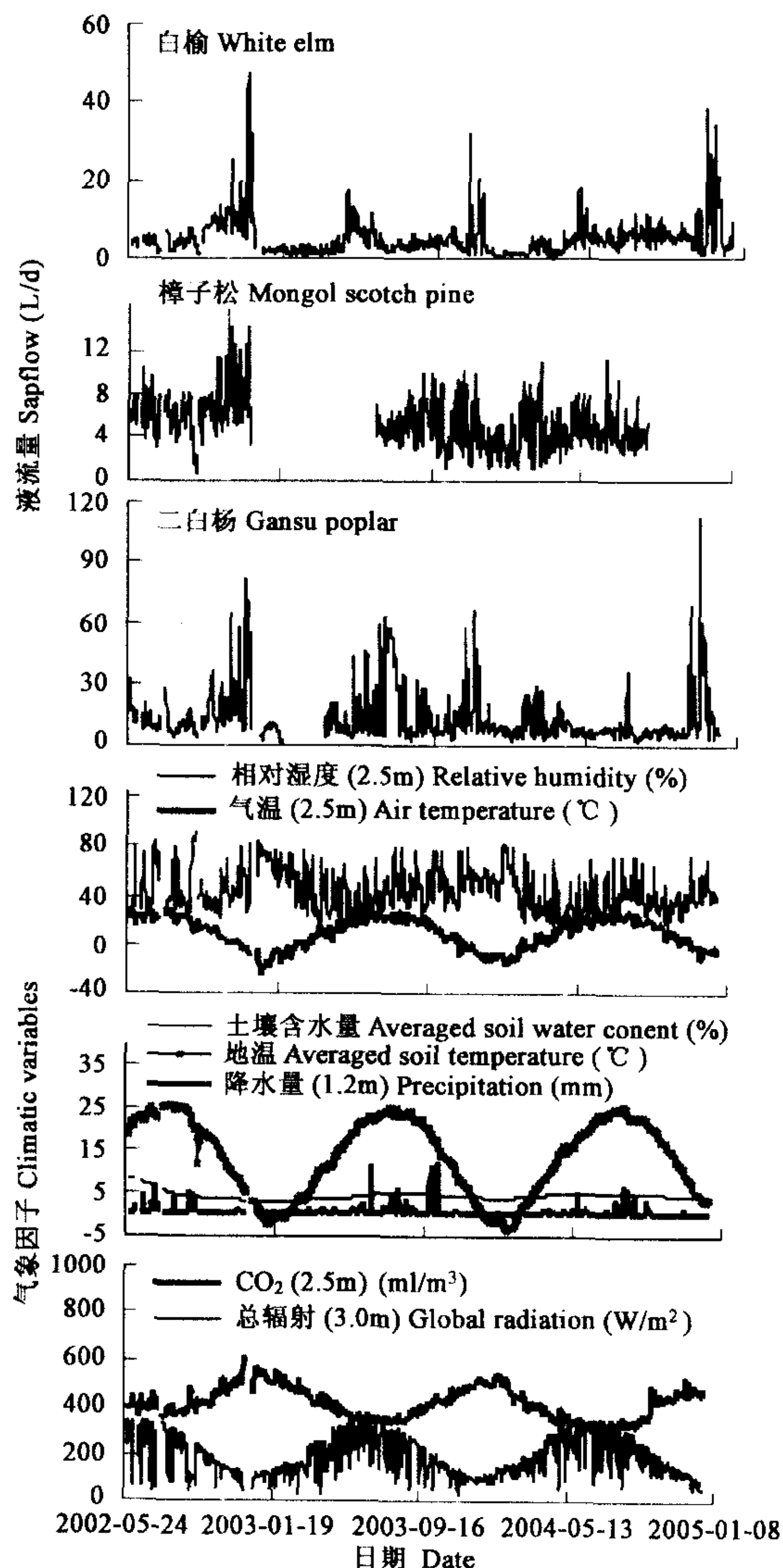


图2 临泽试验点日液流量及气象因子变化

Fig. 2 Fluctuation of daily sapflow and climatic variables at the Linze site

在3个试验点所观测的树木中,沙枣、白榆和二白杨具有接近3a的观测资料,各树种液流量波动规律具有明显的1a周期,这符合北温带植被的生长规律。尽管各试验树木的观测时间及观测日期有差别,但在同一个试验点,液流量的大周期波动基本一致。

临泽试验点落叶树种(白榆和二白杨)液流量自开始落叶时出现峰值现象,但常绿树种樟子松也在同时出现相似的峰值现象,这说明不是由于落叶而造成的树叶底部与树枝之间在落叶后产生的树枝孔隙所造成的。

西水观测点青海云杉Ⅱ~青海云杉Ⅳ液流量的年内大周期波动基本一致,年内波动的微小差异是树木个体不同造成的。但3株树木与青海云杉Ⅰ液流量的年内波动不一致,这可能是由于观测时间不同因而气象条件不同所造成。

鉴于目前国内尚未见到有关荒漠树种液流量非生长季节连续观测的报告,而国外近10a来所见到的文献中,也很少有针对温带落叶树种液流量长期监测的成果,长期观测主要在热带和亚热带等四季不分明地区展开,没有见到有关二白杨、白榆、胡杨和沙枣等树种液流量连续变化的报道。Fredrik等^[1]于1999年在瑞典中部地区(60°5'N, 17°29'E, 45m)对常绿树种樟子松和挪威云杉(*Picea abies* L. Karst)液流量进行了长达一年的观测,其观测结果表明,樟子松和挪威云杉液流量在10月中旬均出现一个峰值(图4)。挪威云杉在8月份出现一个较大的峰值,而10月中旬出现的峰值相对较小,这与黑河流域西水观测点青海云杉Ⅱ~青海云杉Ⅳ的波动规律基本一致,不同的是西水是在9月份出现一个较大的峰值,在10月底与11月初出现一个较小的峰值,这与两地的气候条件差异有关。瑞典中部10月中旬的气温条件与西水10月末~11月初的气温条件基本一致。也就是

说,去除气候差异影响,两试验点(瑞典和西水)出现这个液流量峰值的生长阶段是一致的。瑞典中部樟子松在 10 月份出现的峰值相对大小与临泽试验点樟子松 11 月上旬出现的峰值相对大小不一致,但在生长阶段上也是一致的。

王华田等^[41]于 2001 年 10~11 月在北京西山(39°54'N, 116°28'E)对油松和侧柏液流量进行了测量,探讨了两树种液流量的日内和日变化过程,其研究结果表明,在 10 月 29 日~11 月 2 日期间,液流量出现峰值现象,且两树种液流量变化规律基本一致(图 5)。

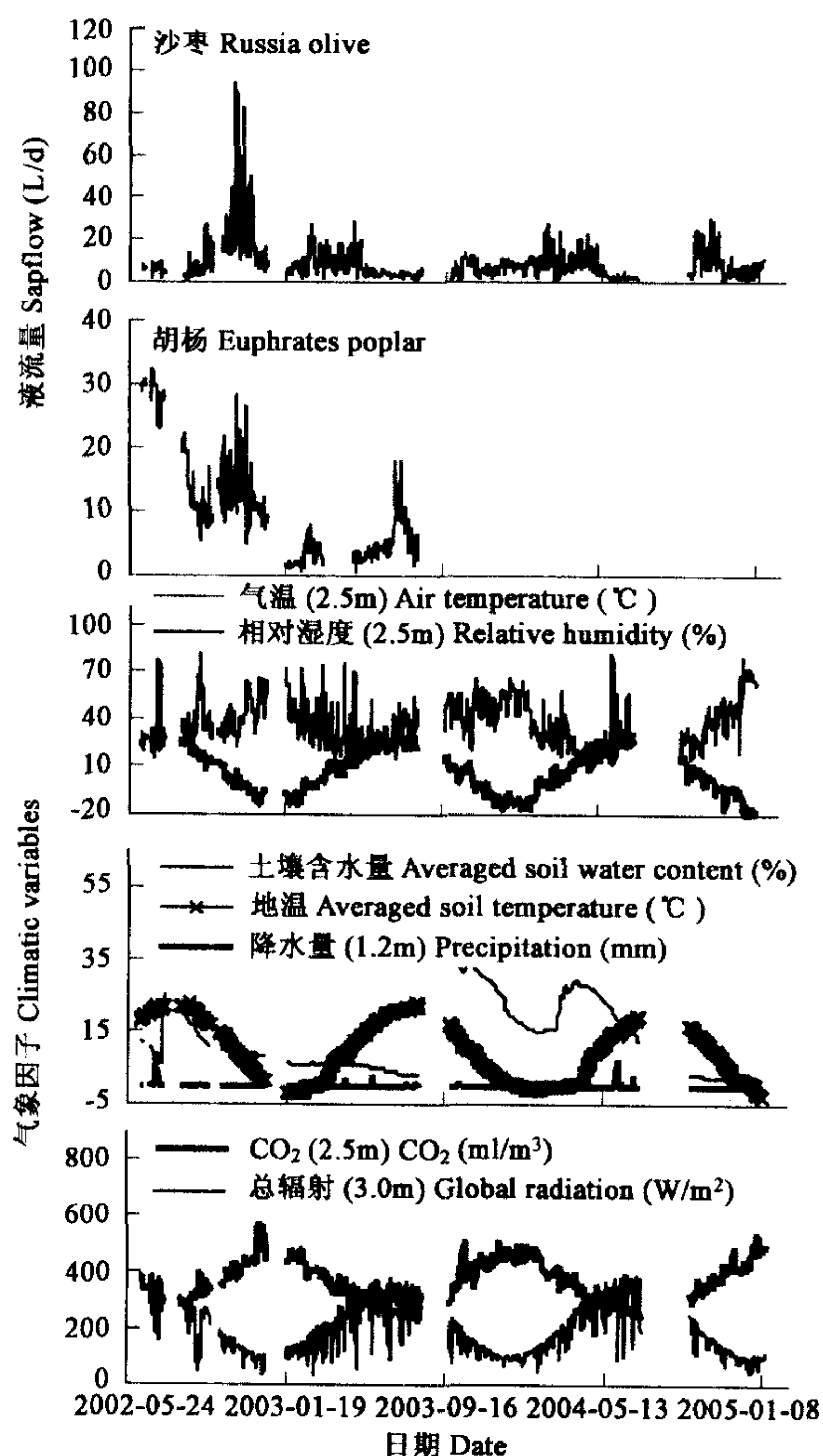


图 3 额济纳旗试验点日液流量及气象因子变化

Fig. 3 Fluctuation of daily sapflow and climatic variables at the Ejinaqi site

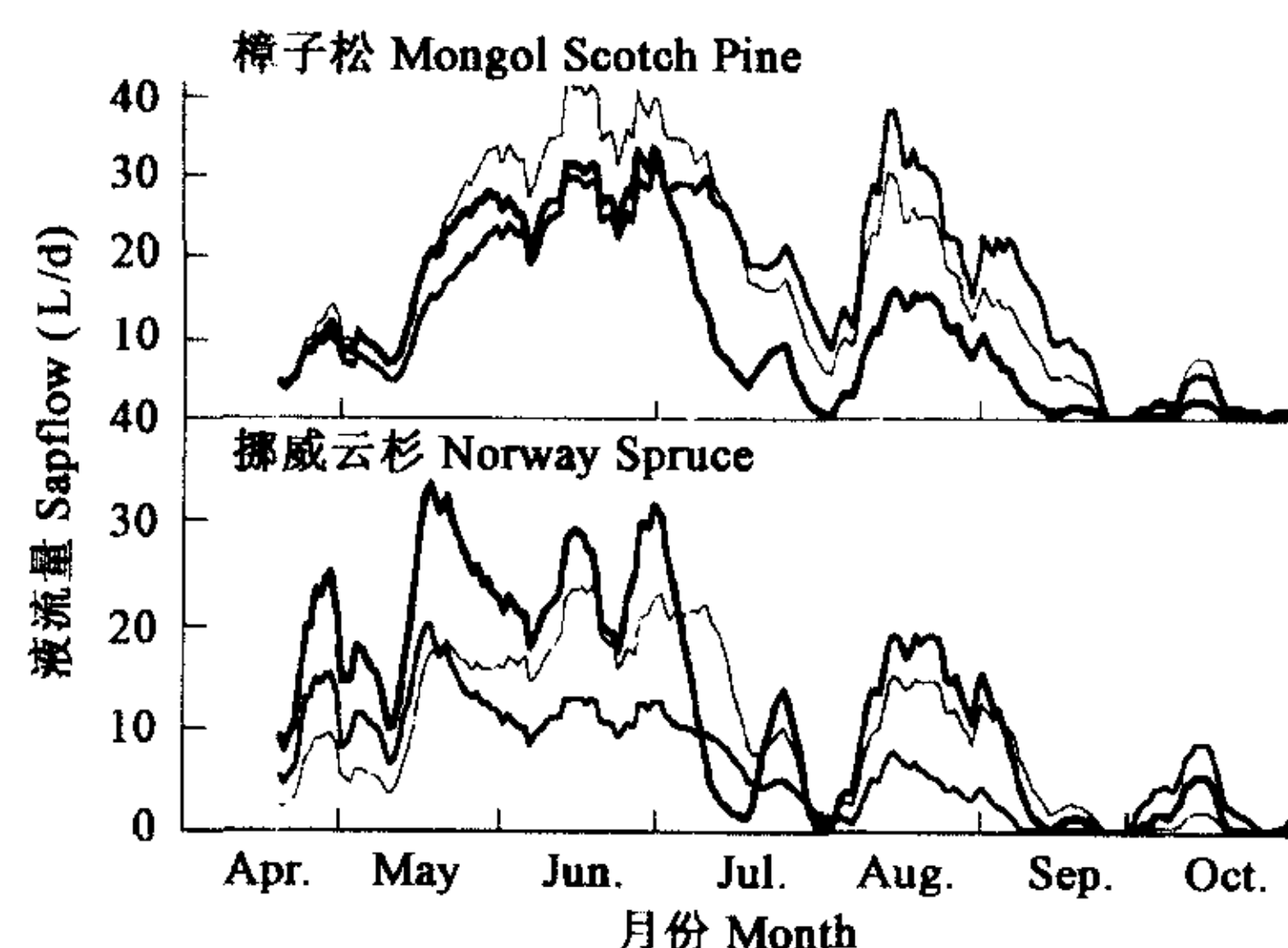


图 4 瑞典中部樟子松和挪威云杉 1999 年液流量变化(7d 滑动平均)^[1]

Fig. 4 The 7-day averaged sapflow of Mongol Scotch Pine and Norway Spruce in the middle of Sweden^[1]

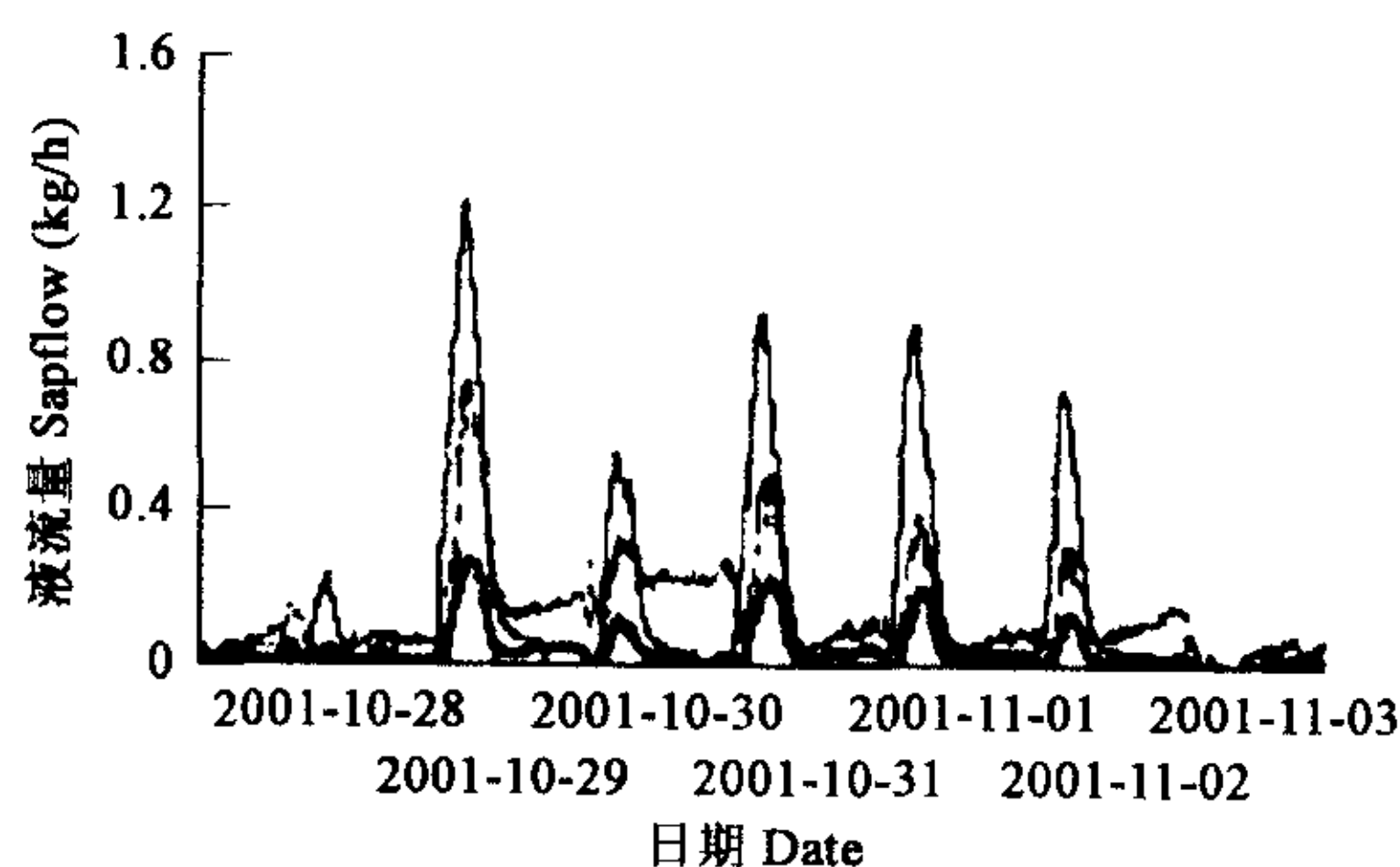


图 5 北京西山 2001 年侧柏和油松液流量变化^[41]

Fig. 5 Diurnal fluctuation of sapflow of *P. tabulaeformis* and *P. orientalis*, 2001^[41]

Peter 等^[19]在美国亚利桑那州东南部(31°22'N, 103°23'W)对常绿树种橡树(*Quercus emoryi*)液流量进行了长达 2a 的测量,其结果表明,在 11 月中下旬橡树液流量会出现一个峰值(图 6)。

Granier 等^[26]于 1996 年 6 月到 1997 年 12 月在法国黑赛(48°40'N, 7°05'E, 300m)对落叶阔叶树种欧山毛榉液流量进行了观测(图 7)。由图 7 知,欧山毛榉液流量在 1996 年 10 月中旬出现一个峰值,在 1997 年 11 月初出现一个较大的峰值。

上述结果表明,在北半球四季分明的中高纬度地区,不管是常绿树种还是落叶树种,树木液流在秋末冬初会出现一个峰值。

在北半球四季分明的中高纬度地区,出现液流量峰值的秋末冬初,正是当地生长季节向非生长季节过渡的特殊时期,此时,树木大量吸收的水分毫无疑问不是用于蒸腾作用,而是为应对严寒的冬季和漫长的早春而采取的一种生存手段。在气温很低的冬季,树木生理活动微弱,液流量降到最低值。这种现象类似动物冬眠前的准备。

尽管北温带不同树种在由生长季节向非生长季节变化的时间段内会出现一个液流量峰值,但在不同的地区这个峰值的相对大小互异,这个峰值相对大小不是由于树种不同引起的(如图 2~图 4 中同一地区不同树种该峰值相对大小基本一致,而图 2 和图 4 中的樟子松液流量相对大小不一致),而应该是由不同地区气候条件的差异所造成。

当前还没有发现秋末冬初的液流量大于生长旺季夏季的研究报告,但在我国西北干旱区黑河中下游却出现了这一现象,这

同本区特殊的气候环境有关。在临泽试验点,2002 年夏季(6~8 月份)20~160cm 土壤平均含水量为 6%,2003 年为 4.6%,2004 年夏季为 5%,空气干燥,气候炎热,夏季日平均饱和差在 1500Pa 左右,最大可达 2700Pa,夏季蒸发力达 860mm,树木为减少体内水分损失,而关闭气孔,从而抑制了蒸腾作用。生长季节气孔导度与饱和差或气温呈负指数关系^[40],当气温或饱和差增加时,气孔导度减小,当气温或饱和差增加到一定数值时,气孔导度趋于接近于 0 的数值而不再变更。而在秋末冬初时,气温和饱和差减小,而土壤含水量变化很小,因而造成了该段时间液流量大于夏季的现象。也就是说,在其他地区所谓的生长旺季,在土壤水分条件极为苛刻的干旱区,植被生长却受到极大的限制。

在额济纳旗试验点,多年平均降水量 39mm,2002 年夏季日平均气温 25.9℃,平均日饱和差 2276.1Pa,但由于 20~160cm 土壤平均含水量为 13.7%,有充足的水分供应,因而两树种 2002 年夏季液流量相对较大。2002 年 10 月底到 11 底,日平均气温 0.2℃,平均日饱和差 428.2Pa,0~160cm 土壤平均含水量为 9.8%,各方面均有利于土壤水分的吸收,因而具有较大的液流量,而且沙枣此段时间的液流量明显大于夏季的液流量。胡杨 2002 年秋末冬初液流量小于 6、7 月份的原因是夏季土壤水分尤其是胡杨根系最为密集的 40cm 深处的水分含量较高,因而胡杨生长没有受到限制。2003 年夏季额济纳旗两试验树木液流量偏小的原因是由于黑河上游河水尚未到达,夏季平均 20~160cm 土壤含水量仅有 4.1%,表层土壤含水量仅有 2.4%,而沙枣和胡杨的根系主要以表层水平分布为主,从而造成无水可用。2003~2004 年沙枣液流量均较 2002 年同期为小,其原因尚需进一步探讨,但当年秋末冬初液流量大于夏季。

3 结论

在我国西北干旱区黑河流域所进行的树木液流量观测结果表明,不管是常绿树种樟子松和青海云杉,还是落叶树种二白杨、白榆、胡杨和沙枣,液流量在秋末冬初均出现一个峰值,在干旱的中下游地区,这个峰值大于夏季的液流量。出现这个峰值的时间,正是当地落叶树种的落叶期,也是生长季节向非生长季节过渡的特殊时期,在这个特殊的生长阶段,北半球中高纬度四季分明地区现有的观测结果表明,所观测树种液流量也会出现一个峰值。这种现象类似动物冬眠前的准备,应该是树木为应对严寒的冬季和漫长的早春所进行的生理准备。

北半球中高纬度四季分明地区和黑河的观测结果表明,树木液流量的大周期波动在同一地点不同树种之间具有一致性,同一地点不同树种之间的差异仅仅能够造成液流量微小波动的差异,而不同地点同一树种液流量相对大小及波动规律不一致。这说明液流量大周期波动不是由于树木的性质所造成,而是由当地的气候条件和环境因子影响所致。

我国西北干旱区秋末冬初液流量大于夏季的现象,是由于当地特殊的气候环境造成的。

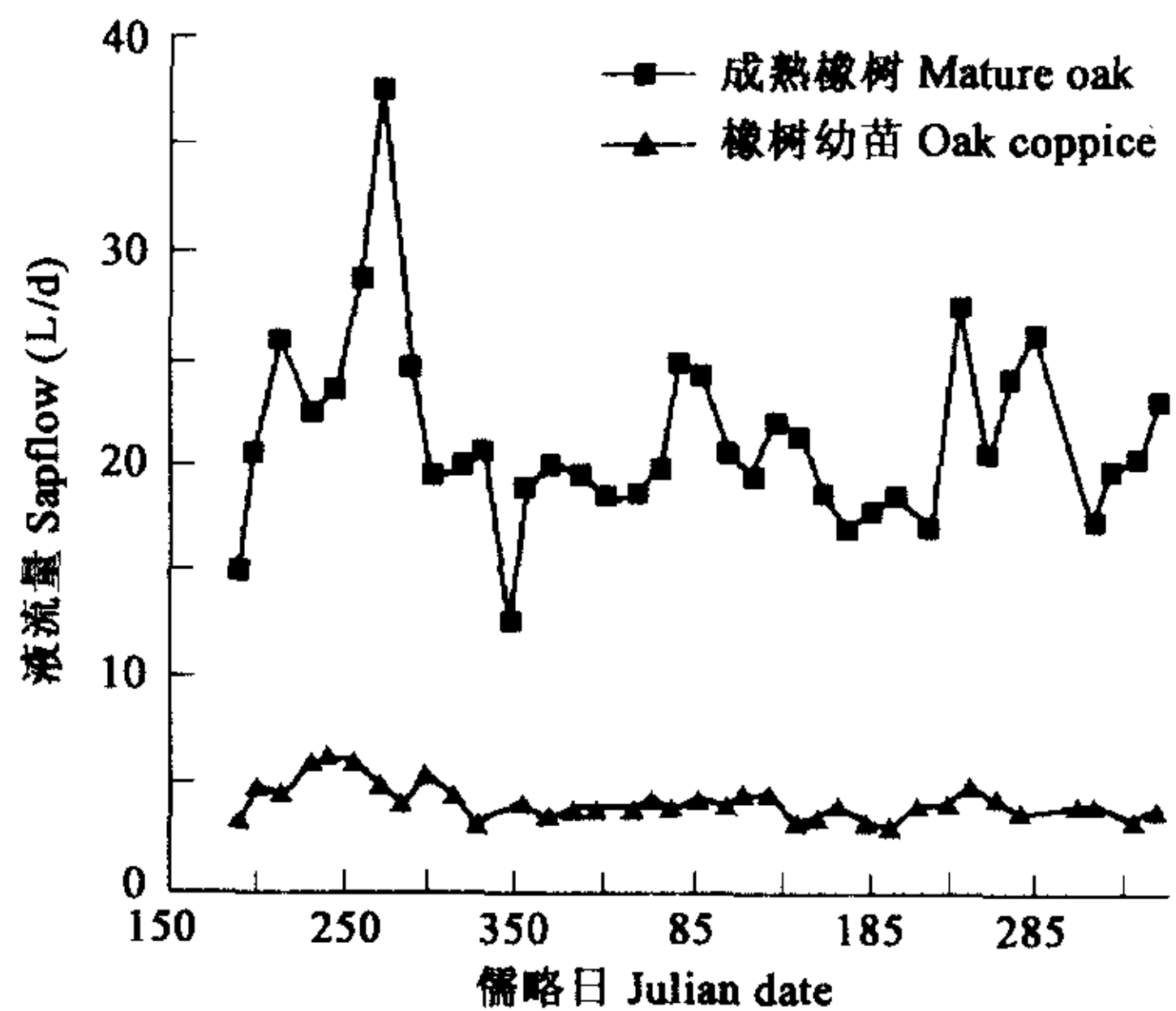


图 6 美国西南部橡树液流量变化^[19]

Fig. 6 Fluctuation of sapflow of *Quercus emoryi* in Arizona, America^[19]

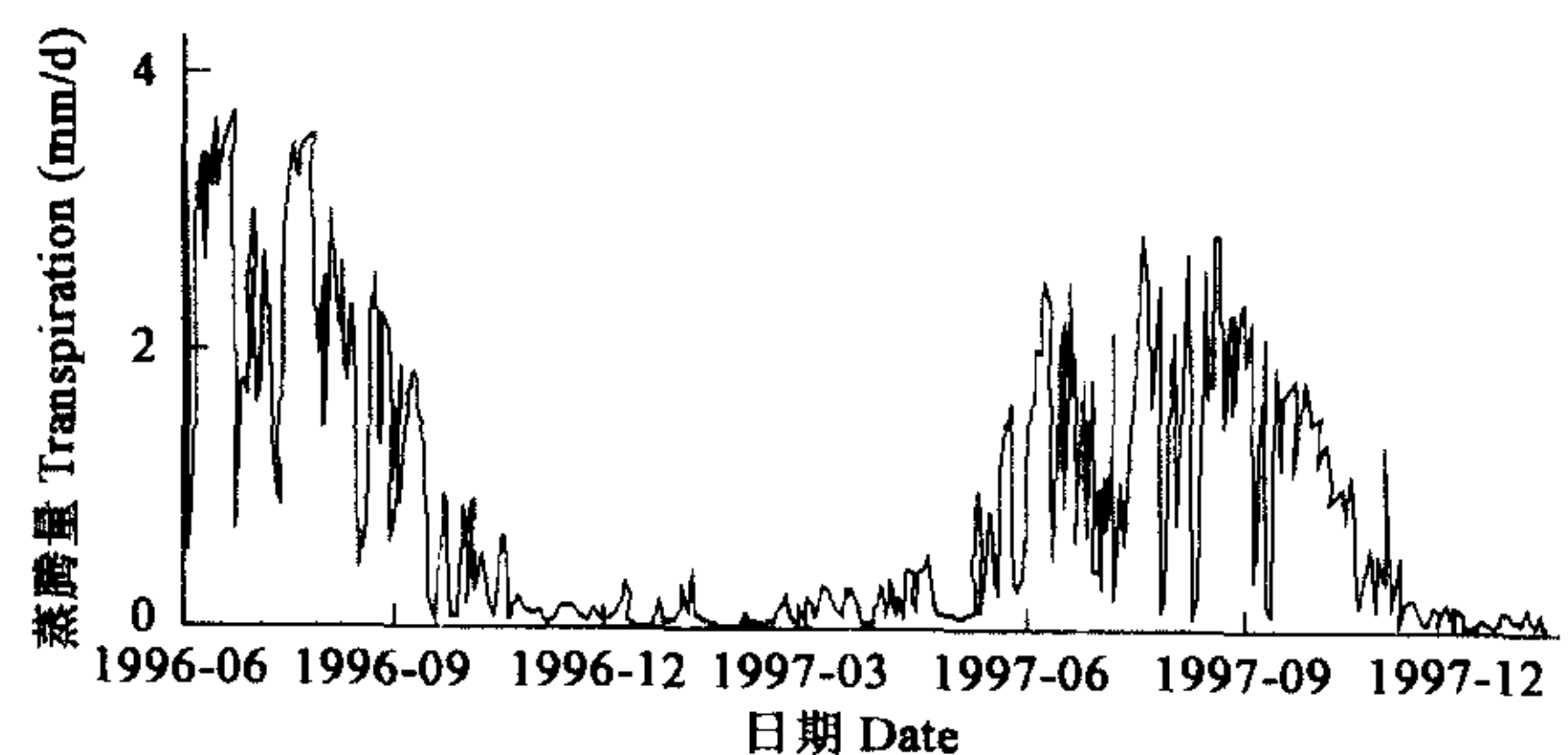


图 7 法国黑赛 1996~1997 年欧山毛榉蒸腾量变化^[26]

Fig. 7 Transpiration of beech in Hesse, France, 1996~1997^[26]

References:

- [1] Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **112**: 67~85.
- [2] Wang H T. Review of tree species water consumption. *World Forest Research*, 2002, **16**(2): 23~27.
- [3] Li H T, Chen L Z. A introduction to the heat-pulse technique and its application to measuring the stem-flow in trees. *Chinese Bulletin of Botany*, 1997, **14**(2): 24~29.
- [4] Liu F J, Zheng S K, Ju G S, et al. A study on comparison of measuring water consumption for transpiration in poplar. *Forest Sciences*, 1997, **33**(2): 117~126.

- [5] Swanson R H, Whitfield D W A. A numerical and experimental analysis of implanted-probe heat pulse theory. *J. ExpBot.*, 1981, **32**: 221~239.
- [6] Granier A, Biron P, Breda N, *et al.* Transpiration of trees and forest stands: Short and long-term monitoring using sapflow methods. *Global Change Biol.*, 1996, **2**: 265~274.
- [7] Sun H Z, Zhou X F, Zhao H X. A research on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(9): 1387~1391.
- [8] Ma L Y, Wang H T. Spatial and chronic fluctuations of sapwood flow and its relevant variables of *Pinus tabulaeformis*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **23**(4): 23~37.
- [9] Mohamed H S, Mohamed S S. Estimating transpiration in an intercropping system: measuring sap flow inside the oasis. *Agriculture Water Management*, 2003, **59**: 191~204.
- [10] Richard S, Alexander H, Tom H, *et al.* Energy balance of a natural jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest in western Australia: measurements during the spring and summer. *Agri. and Forest Mete.*, 2001, **109**: 79~104.
- [11] Viki A C, Peter J T, Grant W F. Transpiration and groundwater uptake from farm forest plots of *Casuarina glauca* and *Eucalyptus camaldulensis* in saline areas of southeast Queensland, Australia. *Agri. Water Mana.*, 1999, **39**: 187~204.
- [12] Kjelgaard J F, Stockle C O, Black R A, *et al.* Measuring sapflow with the heat balance approach using constant and variable heat inputs. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1997, **85**: 239~250.
- [13] Liu F J, Edwards W R N. Study on the spatial and temporal variations of polar sap flow. *Forest Research*, 1993, **6**(4): 368~372.
- [14] Sun P S, Ma L Y. Temporal and spatial variation of sap flow of Chinese pine. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, **22**(5): 1~6.
- [15] Gong D Z, Wang J B, Kang S Z, *et al.* Variations of stem and root sap flow of peach trees under different water status. *Transactions of the CSAE*, 2001, **17**(4): 34~38.
- [16] Li H T, Chen L Z. A study on the volume and velocity of stem sapflow of *Betula dahurica* and *Acer mono* forests by the heat pulse technique. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, **20**(1): 1~6.
- [17] Lu X Z. Study on sapflow of *Pinus massoniana* and *Quercus variables* in grown season. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2001, **28**(40): 401~404.
- [18] Vincent Marc, Mark Robinson. Application of the deuterium tracing method for the estimation of tree sap flow and stand transpiration of a beech forest (*Fagus silvatica* L.) in a mountainous Mediterranean region. *Jou. of Hyd.*, 2004, **285**: 248~259.
- [19] Peter F F, Gerald J G, Yehezkel C, *et al.* Transpiration by dryland oaks: studies in the south-western United States and Northern Israel. *Journal of Arid Environments*, 2003, **55**: 595~605.
- [20] Wieser G, Matyssek R, Kostner B, *et al.* Quantifying ozone uptake at the canopy level of spruce, pine and larch trees at the alpine timberline: an approach based on sapflow measurement. *Environmental Pollution*, 2003, **126**: 5~8.
- [21] Pamela L N, Edward P G, Thompson T L. Comparison of transpiration rates among saltcedar, cottonwood and willow trees by sap flow and canopy temperature methods. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2003, **116**: 73~89.
- [22] Stan D W, Kell B, Paul J H. Environmental control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **104**: 157~168.
- [23] Stan D W, Hanson P J, Todd D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecology and Management*, 2001, **143**: 205~213.
- [24] Whitea D A, Duninb F X, Turnerb N C, *et al.* Water use by contour-planted belts of trees comprised of four *Eucalyptus* species. *Agricultural Water Management*, 2002, **53**: 133~152.
- [25] Kurpius M R, Panek J A, N T, *et al.* Partitioning of water flux in a Sierra Nevada ponderosa pine plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **117**: 173~192.
- [26] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **100**: 291~308.
- [27] Feng Q, Cheng G D, Masao M K. Trends of water resource development and utilization in arid north-west China. *Environmental Geology*, 2000, **39**(8): 831~838.
- [28] Wang G X, Cheng G D. Fluoride Distribution in water and the Governing Factors of Environment in Arid Northwest China. *Journal of Arid Environment*, 2001, **49**(3): 601~614.
- [29] Salisbury F B, Ross C W. *Plant Physiology, Wadsworth Biology Series*. CA: Belmont, 1985. 5~25.
- [30] Soegaard H, Boegh E. Estimation of evapotranspiration from a millet crop in the Sahel combining sap flow, leaf area index and eddy

- correlation technique. *Journal of Hydrology*, 1995, **166**: 263~282.
- [31] Wang G X, Cheng G D. The characteristics of water resources and the changes of the hydrological process and environment in the arid zone of northwest China. *Environmental Geology*, 2000, **39**(7): 783~790.
- [32] Zhao W Z, Cheng G D. Review of Several Problems on the Study of Eco-hydrological Processes in Arid Zones. *Bulletin of Chinese Science*, 2001, **47**(5): 353~360.
- [33] Kang E S, Cheng G D, Lan Y C, *et al.* A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of northwest China to climatic changes. *Science in China (Series D)*, 1999, **29**(Supp. 1): 52~63.
- [34] Chang X X, Zhao W Z. Sap flow of Gansu poplar in farmland shelter forest during the growing season in desert oasis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(7): 1436~1441.
- [35] Chang X X, Zhao W Z. Sapflow of *Elaeagnus angustifolia* and its relation with growth regime in middles reaches of Heihe River Basin. *Journal of Desert Research*, 2004, **24**(4): 473~478.
- [36] Zhang X Y, Gong J D, Zhou M X, *et al.* Spatial and temporal characteristics of stem sap flow of *Populus euphratica*. *Journal of Desert Research*, 2004, **24**(4): 489~492.
- [37] Zhang X Y, Gong J D, Zhou M X, *et al.* A study on the stem sap flow of *Populus euphratica* and *Tamaris* spp. by heat pulse technique. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(5): 585~590.
- [38] Si J H, Feng Q, Zhang X Y. Application of heat-pulse technique to determine the stem sap flow of *Populus euphratica*. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(4): 503~508.
- [39] Chen R S, Kang E S, Zhang Z H, *et al.* Trees transpiration responds to meteorological variables in arid regions of Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(3): 477~485.
- [40] Chen R S, Kang E S, Zhang Z H, *et al.* Estimation of Trees Transpiration and Tree Conductance Response to Meteorological Variables in Desert-Oasis System of Northwest China. *Sciences in China (Series D)*, 2004, **47**(Supp. 1): 9~20.
- [41] Wang H T, Ma L Y, Sun P S. Sap flow fluctuations of *Pinus tabulaeformis* and *Patycladus orientalis* in late autumn. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(5): 32~37.

参考文献:

- [2] 王华田. 林木耗水性研究评述. 世界林业研究, 2002, **16**(2): 23~27.
- [3] 李海涛, 陈灵芝. 用于测定树干木质部蒸腾液流的热脉冲技术研究概况. 植物学通报, 1997, **14**(2): 24~29.
- [4] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升, 等. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究. 林业科学, 1997, **33**(2): 117~126.
- [7] 孙慧珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究. 生态学报, 2002, **22**(9): 1387~1391.
- [8] 马履一, 王华田. 油松边材液流时空变化及其影响因子的研究. 北京林业大学学报, 2002, **23**(4): 23~37.
- [13] 刘奉觉, Edwards WRN. 杨树树干液流时空动态研究. 林业科学研究, 1993, **6**(4): 368~372.
- [14] 孙鹏森, 马履一. 油松树干液流的时空变异性研究. 北京林业大学学报, 2000, **22**(5): 1~6.
- [15] 龚道枝, 王金平, 康绍忠, 等. 不同水分状况下桃树根茎液流变化规律研究. 农业工程学报, 2001, **17**(4): 34~38.
- [16] 李海涛, 陈灵芝. 应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究. 北京林业大学学报, 1998, **20**(1): 1~6.
- [17] 鲁小珍. 马尾松、栓皮栎生长盛期树干液流的研究. 安徽农业大学学报, 2001, **28**(40): 401~404.
- [34] 常学向, 赵文智. 荒漠绿洲农田防护树种二白杨生长季节树干液流的变化. 生态学报, 2004, **27**(7): 1436~1441.
- [35] 常学向, 赵文智. 黑河中游沙枣树干液流的动态变化及其与林木个体生长的关系. 中国沙漠, 2004, **24**(4): 473~478.
- [36] 张小由, 龚家栋, 周茅先, 等. 胡杨树干液流的时空变异性研究. 中国沙漠, 2004, **24**(4): 489~492.
- [37] 张小由, 龚家栋, 周茅先, 等. 应用热脉冲技术对胡杨和怪柳树干液流的研究. 冰川冻土, **25**(5): 585~590.
- [38] 司建华, 冯起, 张小由. 热脉冲技术在确定胡杨幼树干液流中的应用. 冰川冻土, **26**(4): 503~508.
- [39] 陈仁升, 康尔泗, 赵文智, 等. 中国西北干旱区树木蒸腾对气象因子的响应. 生态学报, 2004, **24**(3): 477~485.
- [41] 王华田, 马履一, 孙鹏森. 油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究. 林业科学, 2002, **38**(5): 31~37.