doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.047

活立木茎干蓄水能力与液流相关性研究

赵燕东[1,2]　刘小锋[1]　聂立杨[3]　李继龙[3]　朱　琳[3]

(1.北京林业大学工学院, 北京 100083; 2.北京林业大学城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;
3.北京金都园林绿化有限责任公司, 北京 100140)

摘要: 茎干水分与液流动态关系对于理解植物水分运输机制和蒸腾调控过程具有重要意义。然而,传统植物水分监测方法由于空间和时间分辨率的限制,难以捕捉植物水分变化的细微过程。本文构建了一种基于 i.MX6ULL 芯片的智能监测系统,通过结合先进的传感器技术、数据采集和分析方法,实现了对茎干水分、液流速率、蒸腾量、土壤含水率以及空气温湿度等关键参数的实时监测。在银杏树上的长期实地监测验证了系统稳定性和可靠性。统计结果表明,银杏树在不同生长阶段的液流和茎干水分变化趋势显著,液流速率为 0.82 ~ 20.52 cm/h,而生长季中茎干水分导数与液流数据呈显著负相关(Pearson 相关系数不低于 -0.7)。生长季期间,液流增加伴随着茎干水分减少,且茎干水分变化速率能够在一定程度上反映液流变化趋势。此外,空气温度每上升 1℃,液流速率平均增加 8.6%,而空气相对湿度每上升 10 个百分点,则导致液流速率下降 27.3%。研究结果为活立木水分运输关系提供了实验证据,并为植物生理学研究和生态环境管理提供了科学依据。

关键词: 活立木茎干蓄水能力; 智能监测系统; 液流; 传感器技术; 实时监测

中图分类号: S715.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)05-0492-09　　**OSID**:

Study on the Correlation Between Stem Water Storage Capacity and Sap Flow in Standing Trees

ZHAO Yandong[1,2]　LIU Xiaofeng[1]　NIE Liyang[3]　LI Jilong[3]　ZHU Lin[3]

(1. *School of Technology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Beijing Jindu Garden Landscaping Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100140, *China*)

Abstract: The dynamic relationship between stem water content and sap flow is of great significance for understanding the mechanisms of plant water transport and transpiration regulation. However, traditional plant water monitoring methods are limited by spatial and temporal resolution, making it difficult to capture subtle changes in plant water dynamics. An intelligent monitoring system based on the i.MX6ULL chip was developed. By integrating advanced sensor technology, data acquisition, and analysis methods, real-time monitoring of key parameters such as stem water content, sap flow rate, transpiration, soil moisture, and air temperature and humidity was achieved. Long-term field monitoring of *Ginkgo biloba* trees verified the system's stability and reliability. Statistical analysis results showed that the sap flow and stem water content of *Ginkgo biloba* exhibited significant trends at different growth stages, with sap flow rates ranging from 0.82 cm/h to 20.52 cm/h. During the growing season, the stem water content derivative showed a significant negative correlation with sap flow data (Pearson correlation coefficient was greater than -0.7). As sap flow was increased during the growing season, stem water content was decreased, and the rate of stem water change could reflect the trend of sap flow to a certain extent. Additionally, for every 1℃ increase in air temperature, sap flow rate was increased by an average of 8.6%, while for every 10 percentage points increase in air relative humidity, the sap flow rate was decreased by 27.3%. The research result can provide experimental evidence for the relationship between water transport in standing trees and offer scientific support for plant physiology research and ecological management.

Key words: stem water storage capacity; intelligent monitoring system; sap flow; sensor technology; real-time monitoring

收稿日期: 2024-10-10　修回日期: 2024-11-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000500)

作者简介: 赵燕东(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

0　引言

水是植物新陈代谢的基本要素，是植物细胞原生质的重要组成部分。植物必须在水分充足的情况下才能进行正常的生命活动[1]。植物水分运输过程在生态系统的功能维持和水资源管理中起着关键作用。特别是活立木茎干蓄水能力和液流之间的关系，是理解植物水分平衡和蒸腾调控的重要方面。传统的植物水分监测方法由于空间和时间分辨率的限制，难以捕捉到精细的植物水分变化过程[2-6]。近年来，随着传感器技术和数据采集系统的发展，实时监测植物水分状态成为可能，为深入研究植物水分动态提供了新的途径。

茎干蓄水能力是指植物通过茎干组织储存水分，并在需要时将其用于维持生命活动的能力。这种能力在植物水分运输和调控过程中发挥着重要作用，特别是在干旱或其他逆境条件下，茎干水分含量[7]直接反映了植物体内水分的蓄存状况，而液流[8]则代表了植物水分的运输速率。植物通过茎干储存水分，调节液流以适应环境变化，这对于维持植物的水分平衡和蒸腾调控至关重要。二者的动态关系对于解释植物在不同生长条件下的水分利用策略至关重要。然而，目前关于茎干蓄水能力与液流之间相关性的研究仍然有限，尤其是在不同生长阶段的动态分析方面。通过研究银杏树等典型树种在生长季节中茎干水分与液流的关系，可以为植物水分运输的生理机制提供新的见解。

本文基于 i. MX6ULL 芯片的智能监测系统，结合传感器技术和数据采集方法，实时获取银杏树茎干水分、液流、蒸腾量、土壤含水率[9-10]、空气温湿度[11]等关键参数。在长时间的野外监测实验中，将对不同生长阶段的数据进行详细分析[12]，探讨茎干水分与液流之间的相关性，以及环境因素对二者关系的影响。

1　智能监测系统设计

1.1　整体设计

基于 i. MX6ULL 芯片搭建硬件与软件系统，结合传感技术，通过布置在土壤-植物-大气连续体 3 个介质中的多个传感器实时采集数据，实现对植物水分状态的全面监测和分析。并结合数据处理算法对水分状况进行分析，最后通过用户界面进行展示和管理。

1.2　系统硬件设计

1.2.1　数据采集设备硬件架构

数据采集设备作为整个监测系统中至关重要的组成部分，其主要任务是实时采集活立木和环境参数，并将数据存储和传输到后续的数据处理单元。本数据采集系统硬件包括微处理器、感知设备（传感器）、数据通信模块、数据存储模块、电源模块、时钟模块和复位电路。硬件整体架构如图 1 所示。

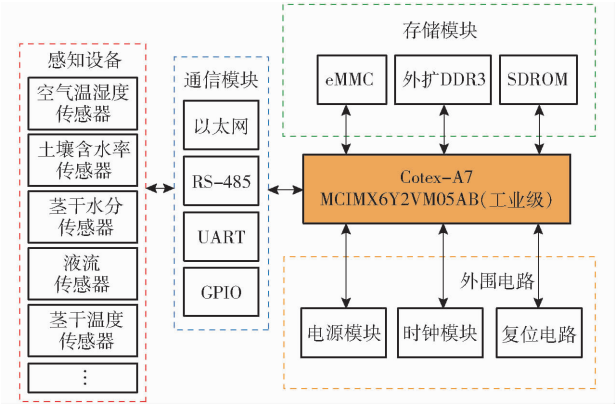

图 1　数据采集系统整体架构图

Fig. 1　Overall architecture diagram of data acquisition system

数据采集设备包括：微处理器采用恩智浦（NXP）公司推出的 Cortex - A7 系列 i. MX6ULL 芯片[13-15]，其性能和低功耗特性使其成为监测系统的理想选择，该芯片可用于控制数据采集、处理和通信模块，实现系统稳定运行和高效工作。存储模块包括 SD 卡、DDR3 和 eMMC[16]。通信模块包括 RS - 232 接口和 RS - 485 接口，主要用于实现对感知设备的本地通信。通过 DTU 连接到 GPRS 网络，将打包好的数据传输到远程阿里云数据服务器。在阿里云物联网平台上，通过 TCP 协议与 DTU 模块建立连接，接收数据包并存储于 MySQL 数据库中。同时，将数据包发送至监测平台，并通过 TCP 协议连接到服务器，以接收数据服务器中储存的各传感器数据包。对这些数据包进行解析和处理，可以展示并绘制监测期间各传感器数据的动态变化情况，从而实现对茎干水分和各环境参数的实时查看与数据下载。感知设备包括茎干水分、液流、茎干温度、空气温湿度、土壤含水率等感知传感器。外围电路包括电源电路、时钟电路和复位电路。

1.2.2　数据采集

为实现对活立木水分动态的数据监测，本系统采用多种传感器，包括植物茎干水分传感器、液流传感器、茎干温度传感器、土壤含水率传感器、空气温湿度传感器等，以全面感知活立木及其生长环境的水分情况。

（1）茎干水分传感器：采用团队自主设计的 BD -IV 型植物茎体水分传感器[17]实现植物茎体水分无损实时在线监测。基于驻波率法（下文统称 SWR 法）的植物茎体水分传感器检测原理如图 2 所

示,测量装置由 100 MHz 高频晶振、50 Ω 同轴传输线、峰值检波电路、差分放大器、304 不锈钢平行探测环和保护外壳组成。

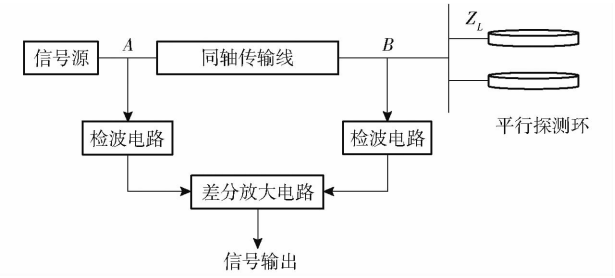

图 2 茎干水分测量原理图

Fig. 2 Measuring principle of stem water content

在信号源频率及探针材料和几何参数(长度、半径、间距等)确定的情况下,探针阻抗只与检测介质的表观介电常数有关

$$U_{AB} = 2A_L \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \tag{1}$$

式中 U_{AB}——同轴传输线两端电压差,V

A_L——信号幅值,V

Z_L——探测环阻抗,Ω

Z_C——同轴传输线特征阻抗,Ω

WULLSCHLEGER 等[18]采用时域反射法对 4 种落叶阔叶树种进行研究,得出茎干含水率和表观介电常数之间关系的经验公式为

$$\theta = -0.251 + 4.66 \times 10^{-2}\varepsilon - 4.93 \times 10^{-4}\varepsilon^2 \tag{2}$$

式中 θ——茎干体积含水率,cm^3/cm^3

ε——茎干表观介电常数

传输线两端电压、茎干体积含水率与茎干介电常数有函数关系,赵燕东等[17]基于 SWR 法设计了 BD-Ⅳ型植物茎体水分传感器,结合标定方程可以准确实时捕捉茎干水分的微小变化。

(2)液流传感器:采用 TDP 热扩散式探针液流传感器,利用 GRANIER[19]提出的热扩散法原理,把 2 根热电偶探针直接插入边材,上面探针包含 1 个电加热器,下面探针作为参照,测量加热探针和参照探针之间的温差 dT。液流速率计算式为

$$V_{S_{TDP}} = 42.84 \left(\frac{dT_{max} - dT}{dT} \right)^{1.231} \tag{3}$$

式中 V_{STDP}——TDP 法计算的液流速率,cm/h

dT_{max}——零液流条件下温差,℃

(3)茎干温度传感器采用铂电阻温度传感器[20]。

(4)空气温湿度传感器:采用山东仁科测控技术有限公司生产的 BYH 型气象百叶箱,集温湿度传感器于一体,用于采集空气温度(±0.5℃)和相对湿度(±3%)。

(5)土壤含水率传感器:监测系统采用的土壤含水率传感器是团队自主研发的基于电容法的非接触式土壤含水率传感器[21-23],是一种小巧便捷、易于安装的设备,可用于长期监测土壤体积含水率。利用电容法测量土壤含水率实际反映土壤环境中环形探头电容的变化。其测量原理与工作环境如图 3 所示。

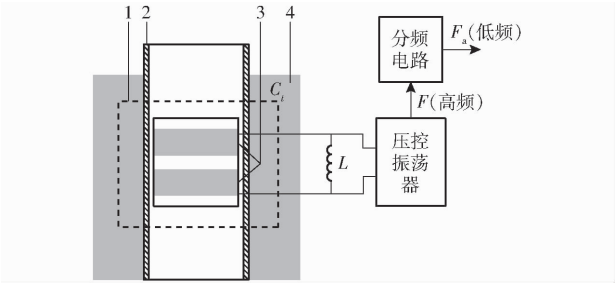

图 3 土壤含水率传感器测量原理

Fig. 3 Measuring principle of moisture sensor

1. 探头测量区域 2. PVC 管 3. 黄铜电极 4. 测量土体

通过检测并联谐振频率 f 变化来表征传感器环形探头电容的变化,即

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_t}} \tag{4}$$

其中

$$C_t = C_s + \frac{C_P C}{C_P + C} \tag{5}$$

式中 f_o——传感器输出频率

L——并联谐振电感

C_t——环形探头电容

C_s——环形探头所分布的杂散电容

C——测量土壤表征电容

C_P——PVC 管所表征电容

输出频率 ω 变化主要受土壤区域感应电容 C 的影响,通过数模转换将水分检测电路的频率输出转换为 0 ~ 2 500 mV 的电压输出。

1.3 系统软件设计

系统软件架构包括嵌入式 Linux 系统、底层设备驱动程序,以及应用层主控程序 3 部分(图 4)。为使硬件系统正常运行,对每个部分进行了相应的设计。

1.3.1 嵌入式 Linux 系统搭建

系统采用轻量化的 Linux 内核,裁剪了内核中的文件系统支持[24-25]、设备驱动程序和调试等不必要的功能模块,并通过 Buildroot[26]工具生成了自定义的根文件系统,确保系统高效和稳定运行。

1.3.2 底层设备驱动程序设计

根据系统需求开发了多个传感器的驱动程序模块,以实现植物茎干水分、土壤含水率、液流、温度等关键参数的采集[27]。每个模块经过广泛测试,保证

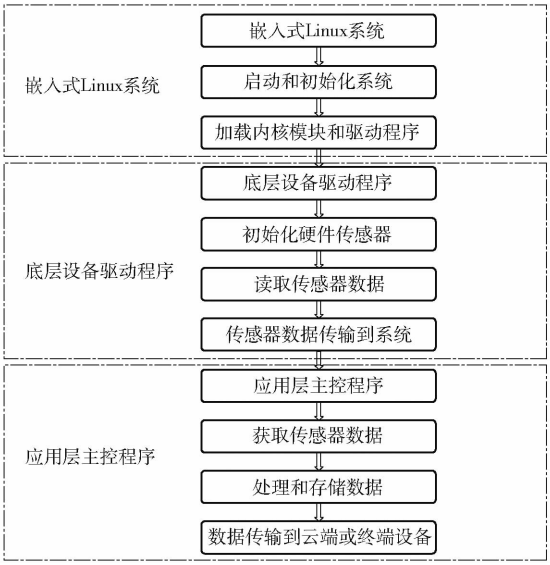

图 4　嵌入式软件系统流程图

Fig. 4　Embedded software system flowchart

数据采集准确性和系统稳定性。

1.3.3　应用层主控程序设计

应用层程序负责数据采集、用户界面、数据存储与管理，以及远程通信功能。通过用户友好的界面（图 5），数据可视化和管理得到了很好的支持。



图 5　用户界面

Fig. 5　User interface diagram

2　活立木茎干蓄水能力与液流相关性实验

2.1　系统部署与现场设置

为了对银杏树进行长期监测，在雨养的银杏人工林中选取 3 棵长势相近的银杏树（编号分别为 A、B、C）（胸径 7 ~ 8 cm，树高 5 ~ 6 m）作为实验对象（小汤山苗圃，116°24′27.77″E，40°09′42.04″N）。嵌入式监测系统被布置在林间，覆盖了茎干水分、液流、茎干温度、土壤含水率和空气温湿度等参数。图 6、7 展示了硬件在现场的部署情况，在茎干距离地面 1.3 m 和 2.5 m 处安装 BD－IV 型植物茎体水分传感器监测茎干水分，在下方的茎干水分传感器上方 10 cm 处安装液流传感器，探针长度 20 mm，在茎干水分传感器下方 10 cm 处安装铂电阻温度传感器，在树干地面下 10 cm 处埋装 HYSWR－ARC 型针式土壤含水率传感器，空气温湿度传感器架设在林中树干上，数据采集模块位于中央控制箱中。

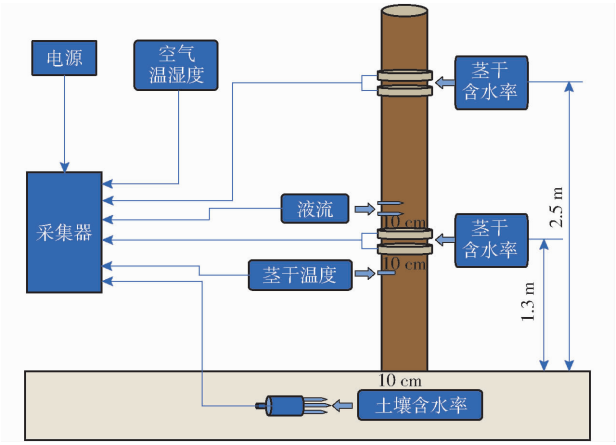

图 6　传感器安装示意图

Fig. 6　Sensor installation diagram

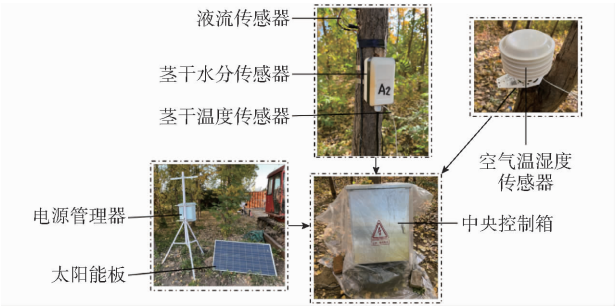

图 7　系统工作场景图

Fig. 7　System working scene diagram

该系统通过太阳能板和蓄电池为设备提供持续的电力支持，确保其在整个监测周期内正常运行。

从 2023 年 10 月 25 日开始实时监测，安装在银杏树上的液流传感器、茎干水分传感器、土壤含水率传感器、茎干温度传感器以及空气温湿度传感器均通过各自的信号采集模块实时获取相应的环境和植株参数。这些数据由主控芯片进行初步预处理和校准，以确保数据准确性和一致性。高频率的实时监测可以提供精细的动态数据，但在长期监测中，较高的功耗可能会影响系统的稳定运行。因此，设置合理的采集频率是关键。通过对不同采集频率下数据准确性与系统能耗的实验对比，确定每10 min 采集一次数据可以完全捕捉银杏树水分变化趋势，同时显著降低功耗。经过预处理的监测数据会通过 GPRS 无线网络传输至远程服务器，系统采用了分布式存储方式，将数据存储在云平台上，以实现对长期监测数据的安全存储与高效管理。

2.2　实验结果分析

2.2.1　数据统计和描述性分析

在监测期间，获得了大量关于银杏树水分生理信息和环境参数的数据，包括空气温度、相对湿度、液流、茎干水分、茎干温度和土壤含水率等变化特征。通过对这些数据进行统计分析，发现各参数在银杏树的生长周期内呈现出显著的变化趋势。

在大的时间尺度上很难看出各参数之间的内在联系,所以以茎干液流作为切入点。茎干液流是土壤-植物-大气连续体水流路径中的重要环节,串联了水分从土壤到植物然后通过蒸腾散失到大气中的整个过程,反映了植物体内的水分传输状况。为了更好地理解银杏树在不同生长阶段的水分生理情况,将数据按照月平均液流水平划分为多个阶段:落叶期、休眠期、萌芽期、展叶期、叶速生期和新梢速生期。

表 1 显示了 3 个实验样本的月平均液流水平。

表 1 月平均液流水平

Tab. 1 Monthly average liquid flow levels cm/h

月份	生长时期	样本 A	样本 B	样本 C	平均液流
11	落叶期	3.63	2.65	3.51	3.26
12		0.91	0.52	0.78	0.74
1	休眠期	0.57	0.32	0.48	0.45
2		1.54	0.87	1.37	1.26
3	萌芽期	5.91	4.29	5.62	5.27
4	展叶期	11.66	9.23	11.35	10.75
5	叶速生期	16.28	15.25	15.90	15.80
6	新梢速生期	20.91	20.31	20.35	20.52

从表 1 可以看出,11 月为落叶期,叶片脱落,蒸腾作用减小,液流水平持续下降;12 月到次年 2 月为休眠期,昼夜温差较大,液流水平很低,接近于零;3 月份为萌芽期,银杏树需水量上升,液流水平显著增加;4 月为展叶期,叶片生长和蒸腾作用使液流水平进一步提高;5 月为叶速生期,叶片快速生长,银杏树的光合作用和蒸腾作用大幅增加,液流水平显著上升,达到较高水平;6 月为新梢速生期,新的枝条迅速生长,对水分的需求增加,液流水平维持在高位,反映出银杏树在这一阶段的旺盛生长状态。

表 2 展示了各参数在不同生长季节的平均水平,可以观察到各参数均存在季节变化特征。

表 2 不同时期各参数平均水平

Tab. 2 Average levels of various parameters in different periods

生长时期	液流/($cm \cdot h^{-1}$)	茎干水分传感器输出/mV	土壤含水率传感器输出/mV	茎干温度/℃	空气温度/℃
落叶期	3.26	251.08	649.96	4.83	4.78
休眠期	0.82	200.41	560.80	-1.41	-1.36
萌芽期	5.27	247.46	638.49	9.69	8.69
展叶期	10.75	285.71	798.84	16.44	16.91
叶速生期	15.80	254.85	840.56	20.59	22.04
新梢速生期	20.52	245.58	864.77	25.04	26.58

液流从休眠期的最低值 0.82 cm/h 到新梢速生期的最高值 20.52 cm/h,液流在生长季节中有显著上升,这表明银杏树在生长季需要更多水分来支持其快速生长。茎干水分在各个生长阶段有所波动,但总体趋势显示在展叶期达到最高值。这可能与叶片生长和蒸腾作用增加有关。土壤含水率从休眠期的最低水平逐渐上升到新梢速生期的最高值。显示出土壤含水率随着季节变化而有所增加,这可能是因为春季和夏季的降雨量增加。茎干温度随着季节变化也呈上升趋势,从休眠期的 -1.41℃到新梢速生期的 25.04℃。这种变化反映了外界环境温度的季节性变化。

2.2.2 各参数相关性分析

对各个参数之间的相关性进行分析,以确定它们之间的相互关系和影响。使用皮尔逊相关系数来量化这些参数之间的相关性。图 8 为各个生长时期各参数之间的皮尔逊相关系数矩阵。

从图 8 可以看出,茎干水分与液流和茎干温度之间在落叶期、休眠期和萌芽期有很强的正相关性,这说明温度增加,液流和茎干水分也随之增加。但是在展叶期和新梢速生期茎干水分与液流和茎干温度呈现很强的负相关性。空气温度每上升 1℃,液流速率平均增加 8.6%。这反映了树木在水分运输过程中,温度增高会出现液流增强现象并伴随着茎干水分增加。在不同生长季节出现的茎干水分和液流不同的相关性可能与植物蒸腾作用的强弱相关。

空气相对湿度与液流的相关性在植物水分运输过程中同样十分重要。空气相对湿度对树木蒸腾速率和液流的影响较为复杂,通常表现为相对湿度上升液流速率会减小。当空气相对湿度每上升 10 个百分点,液流速率下降 27.3%。这是由于高湿度环境下,空气中水汽饱和度增加,蒸腾作用减弱,导致植物水分蒸发减少,从而抑制了液流上升。这种现象在不同的生长阶段中均有表现,特别是在展叶期和新梢速生期,空气相对湿度升高会进一步削弱蒸腾拉力,进而影响液流强度。

土壤含水率与液流负相关。土壤水分是植物获取水分的主要来源,白天由于光合作用和蒸腾作用,植物根系从土壤中吸收大量水分导致土壤水分减少,夜间植物的蒸腾作用减弱,水分吸收减少,液流速率逐渐下降,土壤水分得到地下水的补充得以恢复。不同生长阶段土壤含水率与液流均表现出显著负相关性。

2.2.3 活立木茎干水分与液流相关性分析

图 9 为不同生长时期液流和茎干水分数据的时间序列图。

在落叶期和萌芽期(图 9a、9c),茎干水分从凌

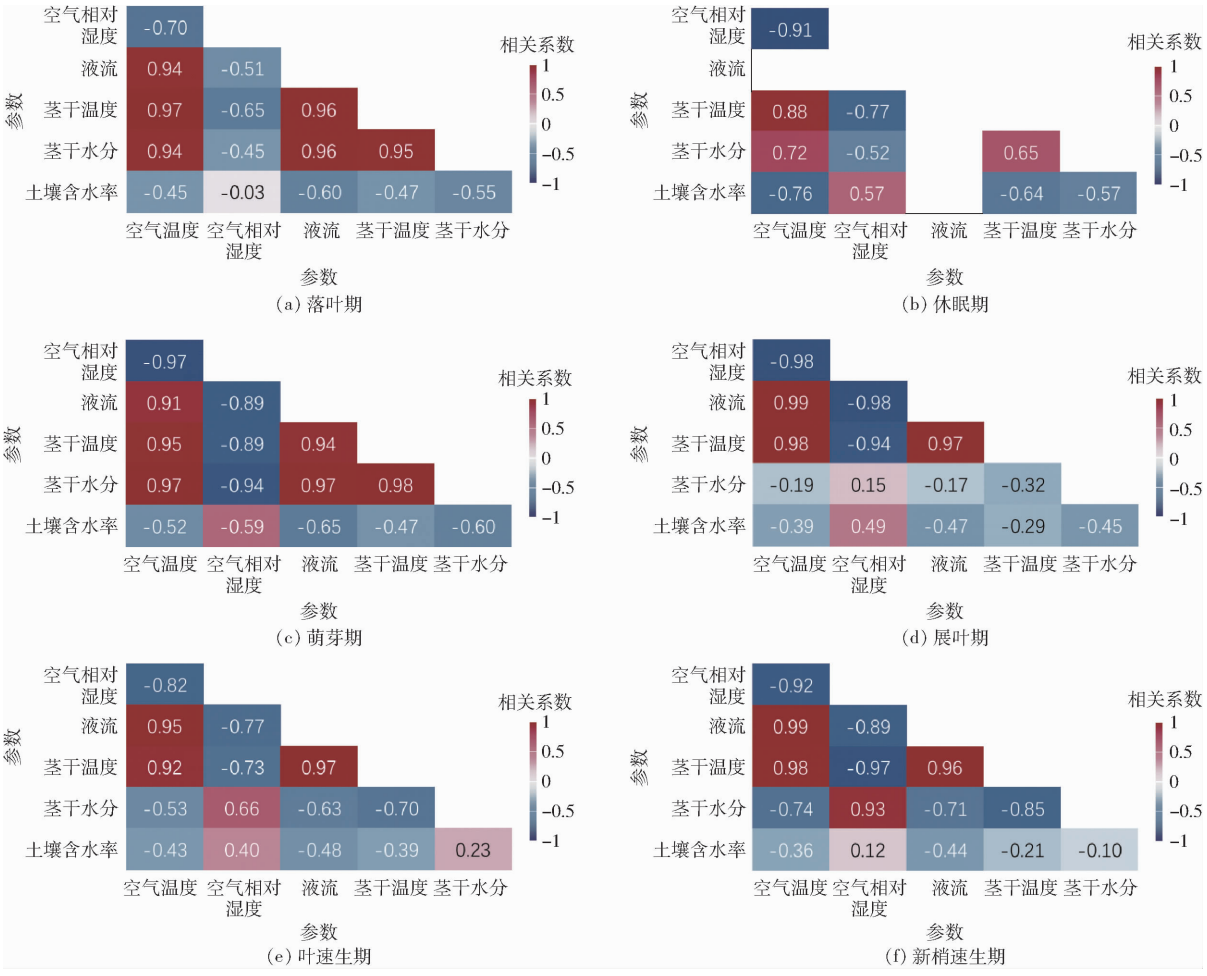

图 8　不同生长时期各参数皮尔逊相关系数矩阵

Fig. 8　Pearson correlation coefficient matrix of each parameter at different growth stages

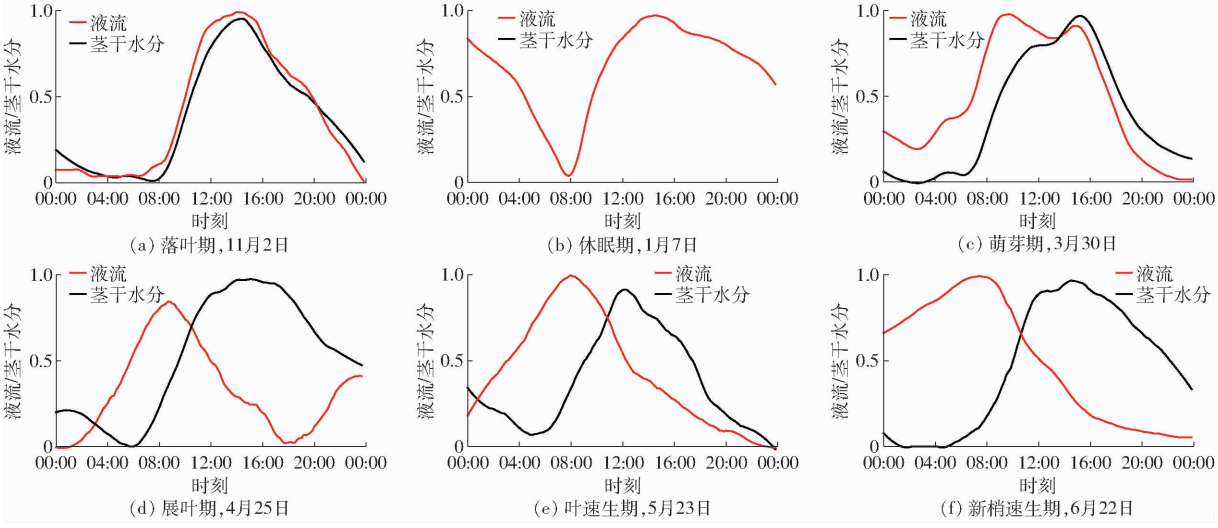

图 9　不同生长时期液流和茎干水分归一化数据时间序列图

Fig. 9　Time series of sap flow and stem water content data at different growth stages

晨开始逐渐上升，基本于 13:00—14:00 达到一天中的极大值，随后至次日凌晨逐渐下降，液流变化规律与之趋同，和空气温度呈正相关关系。呈“昼升夜降”的日变化规律。

在休眠期(图 9b)，实验场地昼夜温差较大，液流停止运动，夜晚温度下降，茎干内液态水凝冻变为固态水，表现为茎干水分下降；08:00 过后温度升高固态水融化为液态水，表现为茎干水分上升，整体呈“昼降夜升”的日变化规律。

在进入展叶期后(图 9d ~ 9f)，茎干水分日变化规律开始逐步变为从凌晨开始逐渐上升，于 06:00—07:00 达到一天中的极大值后快速下降；当

植物体耗水量超过根部吸水量时,茎干组织会将自身储水运输至各需水组织,使得茎干水分达到极值后呈下降趋势,基本于 15:00—17:00 达到极小值;随后植物体各生理活动逐渐减弱,根部吸水量超过其耗水量,茎干水分开始上升,呈“昼降夜升”的日变化规律。这一现象符合以往研究中关于生长季茎干水分变化规律[28]。

总的来说,除休眠期外,其他生长时期茎干水分日变化规律均表现为“几”字形特征,随生长季节的推进,环境因子发生改变,茎干水分与液流相位也不断变化,二者线性关系从显著正相关变为弱相关再到显著负相关。

针对这些季节性差异,进一步讨论液流和茎干水分关系。液流增加,茎干水分也会增加。但是在生长旺盛的季节,由于蒸腾作用较强,树木蒸腾耗散 99.8% 以上都来自液流供应[29-30],对于茎干水分补充不足。因此,观察到茎干水分是“昼降夜升”的现象。对于阔叶树而言,在度过休眠期之后入春进入萌芽期,研究表明,此阶段的植物处于导管栓塞修复、导水率重建及根压逐步增强的状态,没有叶片,光合作用、蒸腾作用等生理活动较弱[31-32],耗水量较少,所以茎干水分出现和液流趋同的“昼升夜降”现象,与空气温度变化表现具有一致性。

在研究茎干水分和液流关系时,探寻茎干水分变化速率可以反映液流情况,因为液流是水分在植物体内的传输速率。茎干水分数据是离散时间序列,采用差分近似法来求导,并将这一方法应用于各个时期的实际数据。为了消除量纲影响,首先对茎干水分和液流数据进行归一化处理。

使用差分近似法对茎干水分离散时间序列数据进行求导,其中包括萌芽期、展叶期、叶速生期和新梢速生期的数据。对于时间序列数据 $\{x_i\}$,其一阶差分定义为

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i \tag{6}$$

为了减少数据中的噪声,对茎干水分进行平滑处理,采用移动平均法进行数据光滑。将导数曲线和实际液流数据进行相关性分析(表 3),结果显示,茎干水分导数近似值曲线与液流序列在不同生长阶段表现出不同程度的负相关性。

在萌芽期液流与茎干水分的变化趋势保持显著的正相关性,在之后逐步表现为显著负相关,这揭示了随生长阶段的变化,液流和茎干水分逐步发生相位偏移,茎干水分波峰逐步领先于液流。而液流与茎干水分导数近似值始终保持较强的负相关性,通过表 3 和图 10 可以直观地观察到,茎干水分导数近似值曲线与液流数据之间负相关。

表 3 不同生长阶段液流和茎干水分相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between sap flow and stem moisture at different growth stages

生长阶段	液流与茎干水分相关系数	液流与茎干水分导数近似值相关系数
萌芽期	0.77	-0.46
展叶期	0.17	-0.73
叶速生期	-0.17	-0.72
新梢速生期	-0.71	-0.70

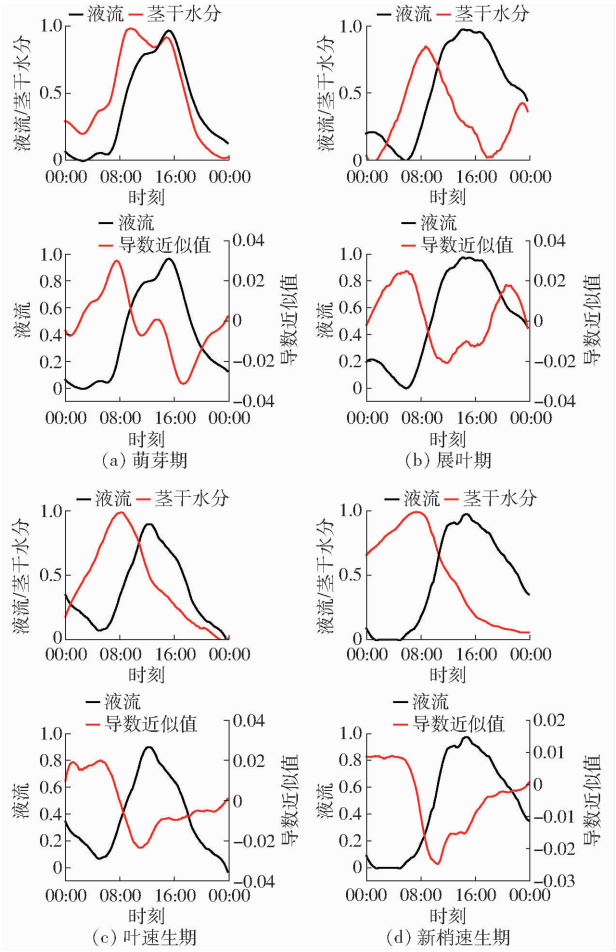

图 10 归一化茎干水分、液流序列与茎干水分导数近似值

Fig. 10 Normalize stem water and sap flow sequences and stem moisture derivative approximation

结果进一步表明,当液流增加时,茎干水分减少。这一现象说明在生长季,植物茎干水分可以在一定程度上替代液流作为植物蒸腾评价的指标。这为植物水分管理提供了新的方法和依据,有助于进一步理解植物水分利用和管理策略。

3 结论

(1)在不同生长阶段,银杏树液流和茎干水分表现出显著变化趋势。通过统计分析得出,茎干水分导数与液流速率之间存在显著的负相关性,尤其在生长季节,液流增加伴随着茎干水分减少。具体表现为茎

干水分变化速率与液流变化呈显著负相关(Pearson 相关系数不低于 -0.7),表明茎干水分变化可作为液流调节的一个重要指示因素。

(2)环境因素对茎干蓄水与液流关系的影响显著,尤其是空气温度每升高 1℃,液流速率平均增加 8.6%,空气相对湿度每上升 10 个百分点,液流速率则下降 27.3%。这表明,环境条件对植物水分运输的调节作用不可忽视。

参 考 文 献

[1] 郑荣良,赵新明,金树德,等. 植物生理需水信息的采集研究[J]. 农业机械学报,1996,27(4):46 - 49.
ZHENG Rongliang, ZHAO Xinming, JIN Shude, et al. Investigation into water needing information collecting system for plant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(4): 46 - 49. (in Chinese)

[2] 王璐,张恒嘉. SPAC 系统水分循环与转化过程探析[J]. 水利规划与设计,2019(8):41 - 44.
WANG Lu, ZHANG Hengjia. Analysis of water circulation and transformation process in SPAC system[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(8): 41 - 44. (in Chinese)

[3] 杨博. 山地苹果园土壤-植物-大气系统(SPAC)水循环模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
YANG Bo. Simulation study on water cycle of soil - plant - atmosphere continuum (SPAC) in mountain apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)

[4] WANG L, SHI L, HU X, et al. Interpretable machine learning of SPAC system via a mechanism-assisted Gaussian process group: representation of the system mechanism by data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108979.

[5] 郑一力,赵燕东,刘卫平,等. 基于北斗卫星通信的林区小气候监测系统研究[J]. 农业机械学报,2018,49(2):217 - 224.
ZHENG Yili, ZHAO Yandong, LIU Weiping, et al. Forest microclimate monitoring system based on Beidou satellite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 217 - 224. (in Chinese)

[6] 张璨. 林区微环境监测与显示系统设计与实现[D]. 北京:北京林业大学,2019.
ZHANG Can. Design and implementation of forest micro-environment monitoring and display system[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. (in Chinese)

[7] 高超. 活立木茎干水分实时无损获取方法及应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2019.
GAO Chao. Study on real-time nondestructive acquisition method of standing tree stem water content and its application[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. (in Chinese)

[8] DU Sheng, WANG Yilong, KUME T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(1): 1 - 10.

[9] 党宏忠,却晓娥,冯金超,等. 土壤水分对黄土区苹果园土壤-植物-大气连续体(SPAC)中水势梯度的影响[J]. 应用生态学报,2020,31(3):829 - 836.
DANG Hongzhong, QUE Xiaoe, FENG Jinchao, et al. Effect of soil moisture on water potential gradients in the soil - plant - atmosphere continuum (SPAC) of apple orchards in the Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 829 - 836. (in Chinese)

[10] 王克栋,王一鸣,冯磊,等. 基于相位检测原理的土壤水分时域反射测量技术[J]. 农业机械学报,2010,41(1):72 - 76.
WANG Kedong, WANG Yiming, FENG Lei, et al. Measurement of soil moisture based on phase detecting principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 72 - 76. (in Chinese)

[11] 路昊霖. 植物生长需水量及其对空间热环境的影响[D]. 湘潭:湘潭大学,2022.
LU Haolin. Plant water requirement for growth and its effects on space thermal environment[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022. (in Chinese)

[12] 黄雅茹,李永华,辛智鸣,等. 不同时间尺度气象因子与柽柳树干液流关系研究[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(11):149 - 154.
HUANG Yaru, LI Yonghua, XIN Zhiming, et al. Relationships between meteorological factors and *Tamarix chinensis's* sap flow at different time scales[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(11): 149 - 154. (in Chinese)

[13] 孙进华. 基于 ARM9 智能环境在线监测数据采集系统的研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
SUN Jinhua. The research of the environmental intelligent monitoring data acquisition system based on ARM9[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)

[14] 李翔,陈征,李宏,等. GNSS 与多传感器集成的尾矿库监测系统设计[J]. 电子技术应用,2024,50(7):97 - 102.
LI Xiang, CHEN Zheng, LI Hong, et al. Design of tailings pond monitoring system integrating GNSS and multi-sensor[J]. Application of Electronic Technique, 2024, 50(7): 97 - 102. (in Chinese)

[15] ZHAO X, WANG J, LI W, et al. Research on the module of color image sonar system based on imx6ull[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2005(5): 012052.

[16] 瞿伟, 余飞鸿. 基于多核处理器的非对称嵌入式系统研究综述[J]. 计算机科学, 2021, 48(增刊 1):538 - 542.
QU Wei, YU Feihong. Survey of research on asymmetric embedded system based on multi-core processor[J]. Computer Science, 2021, 48(Supp. 1): 538 - 542. (in Chinese)

[17] 赵燕东,高超,张新,等. 基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究[J]. 农业机械学报,2016,47(1):310 - 316.
ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on standing

wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):310 - 316. (in Chinese)
[18] WULLSCHLEGER S D, HANSON P J, TODD D E. Measuring stem water content in four deciduous hardwoods with a time-domain reflectometer[J]. Tree Physiology, 1996, 16(10):809 - 815.
[19] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1988, 3(4):309 - 320.
[20] 胡鹏程, 时玮泽, 梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. 光学精密工程, 2014,22(4): 988 - 995.
HU Pengcheng, SHI Weize, MEI Jianting. High precision Pt-resistance temperature measurement system[J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2014,22(4): 988 - 995. (in Chinese)
[21] 高志涛,刘卫平,赵燕东.基于电容法的非接触式土壤水分传感器设计与性能分析[J].农业机械学报,2016,47(11):185 - 191.
GAO Zhitao, LIU Weiping, ZHAO Yandong. Design and performance analysis of soil moisture sensor based on capacitance technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):185 - 191. (in Chinese)
[22] 高志涛,刘卫平,赵燕东,等.多层土壤剖面复合传感器设计与性能分析[J].农业机械学报,2016,47(1):108 - 117.
GAO Zhitao, LIU Weiping, ZHAO Yandong, et al. Design and performance analysis of composite sensor for multilayer soil profile[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):108 - 117. (in Chinese)
[23] 高志涛,田昊,赵燕东.土壤剖面水分线性尺度测量方法[J].农业机械学报,2017,48(4):257 - 264.
GAO Zhitao, TIAN Hao, ZHAO Yandong. Linear scale measurement method for soil profile moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):257 - 264. (in Chinese)
[24] RONG S, CHANG W L, WEI S P. Development of embedded system GUI based on Qt/Einbeded[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 109:586 - 590.
[25] KAUR J, REDDY S R. Implementation of Linux *Optimization Technique* for ARM *Based System on Chip*[J]. Procedia Computer Science, 2020, 171:1780 - 1789.
[26] 谢祥东. 基于 IMX6ULL 的嵌入式根文件系统构建[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(13): 169 - 171.
XIE Xiangdong. Discussion and research on building rootfiles in embedded development based on IMX6ULL[J]. Automobile Applied Technology, 2022, 47(13): 169 - 171. (in Chinese)
[27] RUBINI A, CORBET J. Linux device drivers[M]. O'Reilly Media, Inc. , 2001.
[28] 许泽海, 赵燕东. 生长季五角枫茎干水分含量序列特征及其影响因素解译[J]. 植物生态学报, 2024, 48(6): 794 - 808.
XU Zehai, ZHAO Yandong. Interpretation of sequence characteristics and influencing factors of stem water content for *Acer pictum* subsp. *mono* in its growing season[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(6): 794 - 808. (in Chinese)
[29] GRANIER A,BOBAY V,GASH J H C, etal. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landed forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1990,513(3/4): 309 - 319.
[30] LAPITAN R L,PARTON W J. Seasonal variabilities in the distribution of the microclimatic factors and evapotranspiration in a shortgrass steppe[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1996,79(1/2): 113 - 130.
[31] HAO G, WHEELER JK, HOLBROOK N M, et al. Investigating xylem embolism formation, refilling and water storage in tree trunks using frequency domain reflectometry[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64: 2321 - 2332.
[32] BEEDLOW P A, WASCHMANN R S, LEE E H, et al. Seasonal patterns of bole water content in old growth Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco)[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2017, 242: 109 - 119.