

基于茎干水分包络分析的活立木冻融检测方法

赵燕东^{1,2} 刘宇琦^{1,2} 田昊³ 赵玥^{1,4}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;
3. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048; 4. 智慧林业研究中心, 北京 100083)

摘要: 为解决活立木在越冬期易遭受低温所引发的冻融灾害问题,针对现有评估检测方法存在的检测手段复杂、对活立木破坏性大、设备昂贵和难以实时检测的现状,通过分析活立木在越冬期的茎干水分和环境温度的变化规律,提出一种基于活立木茎干水分序列包络分析的冻融状况检测方法。在采用具有自主知识产权的活立木冻融检测传感器实时获取活立木茎干水分和环境温度的基础上,通过对照试验选取 1 320 min 作为包络分析的信号采样间隔获取数据的极值信息,以便对活立木的冻融状况进行定量表示。进一步利用活立木茎干水分包络上下线的平均值,并结合环境温度的包络下线值建立归一化的冻融状况评价指标的计算模型,为植物冻融状况的实时检测与评估提供一种新思路、新手段。选用 3 种不同地区的阔叶树种(紫薇、海棠和香杨树)进行试验验证,整个越冬期紫薇树的冻融状况轻微,对应的冻融指标最高为 0.004,远小于 1.0;海棠树的冻融状况变化较大,对应的冻融指标在 0.1~0.7 之间波动变化;香杨树的冻融状况相对严重,对应的冻融指标最高时可达 0.9。试验表明本文方法及自主研发的冻融检测传感器准确可靠,可以作为活立木冻融状况检测的有效手段,为植物冻灾预警提供理论及数据支撑。

关键词: 活立木; 茎干冻融; 包络分析; 茎干水分; 冻融指标

中图分类号: S761.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)08-0263-08

OSID:



Freeze-thaw Detection Method of Living Standing Wood Based on Stem Moisture Envelope Analysis

ZHAO Yandong^{1,2} LIU Yuqi^{1,2} TIAN Hao³ ZHAO Yue^{1,4}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China

3. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

4. Research Center for Intelligent Forestry, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of freeze-thaw disasters caused by low temperatures that living standing wood were vulnerable during the overwintering period. A method for freeze-thaw detection was proposed based on the sequence envelope analysis of stem moisture of living standing wood during the overwintering period by analyzing the change of stem moisture and environmental temperature data. Firstly, based on the use of a freeze-thaw detection sensor with independent intellectual property rights, the real-time information on the stem moisture and environmental temperature of living standing wood was obtained, and the changes of stem moisture and environmental temperature data of living standing wood during the overwintering period were clarified through pre-tests by the research team of Beijing Forestry University and the research team. However, ambient temperature was indirectly related to the physiological state of the living standing wood and cannot be used alone as a basis for determining freeze-thaw conditions, and the change of stem moisture of standing trees during the winter due to water-ice interactions in the stem can reflect the freeze-thaw conditions of the living standing wood. Secondly, a method of freeze-thaw condition detection based on the envelope analysis of stem moisture series was proposed. And 1320 min was selected as the signal sampling interval for the envelope analysis to obtain the extreme values of the data for quantitative representation of the freeze-thaw condition of living standing wood. The mean values of the upper and lower lines of the stem moisture envelope and the lower line of

收稿日期: 2021-05-27 修回日期: 2021-07-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000500)和北京市共建项目

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

the envelope in combination with the ambient temperature were used to establish a normalised calculation model of the freeze-thaw condition assessment index. Finally, three broad-leaved tree species (Violet, Begonia and Balsam Poplar) were chosen as representatives to verify the generalisability of the method based on the sequence envelope analysis of stem moisture in standing wood during freeze-thaw. The experimental site of Violet was located at Sanqingyuan Nursery of Beijing Forestry University, Haidian District, Beijing (116°21'14"E, 40°0'54"N), for the period of November 1st, 2018—April 1st, 2019. The experimental site of Begonia was located at the nursery of Hesheng Institute of Ecological Science and Technology, Horing County, Huhhot City District, Inner Mongolia (111°50'28"E, 40°32'33"N), for the period September 1st, 2018—June 1st, 2019. The experimental site of Balsam Poplar was located at the experimental forestry farm under Northeast Forestry University in Maor-Mountain, Harbin City, Heilongjiang Province (127°34'48"E, 45°16'12"N), for the period October 1st, 2018-May 1st, 2019. The freeze-thaw condition of the Violet was slight throughout the wintering period, with a maximum freeze-thaw index of 0.004, much less than 1.0. The freeze-thaw condition of the Begonia tree was more variable, with a fluctuating index between 0.1 and 0.7. The freeze-thaw condition of the Balsam Poplar was relatively severe, with a maximum freeze-thaw index of 0.9. The tests results showed that the proposed principle and the self-developed freeze-thaw detection sensor were accurate and reliable, and can be used as an effective means to detect the freeze-thaw condition of living standing wood, which can provide theoretical and data support for early warning of plant frost damage.

Key words: living standing wood; stem freeze-thaw; envelope analysis; stem moisture; freeze-thaw index

0 引言

温度是植物生长的主要环境因素之一^[1-2],低温所引发的植物冻融灾害是一种全球范围内普遍存在的自然灾害,每年都会导致巨大的经济损失^[3-4]。为此,文献[5-6]提出基于生态、形态、代谢和生化指标的植物冻融状况评估检测方法,但存在测量结果误差较大,且难以实时检测的缺点。随着科技的发展,文献[7-8]将核磁成像技术用于对植物冻融状况的分析,但该检测方法检测设备昂贵、存在辐射风险和破坏植物结构等内在缺陷,所以应用领域受限。此外超声波声发射分析技术^[9-12]也被用于检测植物冻融变化状况,该技术能实现无损检测,应用前景良好,但相关仪器设备昂贵,难以在农林业大规模应用。

可见,现有文献中的活立木冻融状况检测原理适用范围局限性较大,检测性能也有待提高。当前有学者提出利用电磁波在不同介质中的传播速度的差异来构成检测树茎含水率进而获取树茎冻融信息的原理,这类原理可以归为两类:一类是基于时域反射技术 (Time-domain reflectometry, TDR)^[13-15],利用送入传输线脉冲信号的反射能量来反映活立木茎干 (简称树茎) 冻融状况;另一类是基于驻波比技术 (Voltage standing wave ration, SWR)^[16-21],利用传输线上驻波信号的幅值之比来反映树茎冻融状况。SWR 法不存在测量时间差,所以更易实现在线的实时检测。然而现有的基于 SWR 技术并融合潜热效应原理的检测方法^[22]存在数据需要连续获取、对树

木破坏性大和受环境因素干扰大等缺点,不是冻融状况检测的最佳方法。

本文在上述研究基础上,以实现冻融状况的无损、实时检测为研究目标,分析越冬期活立木的冻融状况与树茎水分含量及环境温度的联系,将 SWR 技术与包络分析原理相融合,提出基于包络分析的活立木冻融状况检测方法,以期为植物的防冻保温提供有效预警,并为其抗寒性评估提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用具有独立知识产权的活立木茎干水分及环境温度复合传感器^[22] (统称为活立木冻融检测传感器), 实现对树茎冻融过程中树茎水分含量 (简称水分指标) 及环境温度的同步、实时获取。传感器测量原理与结构如图 1 所示。

其中水分指标信息由环形探头获取,探头使用 304 不锈钢弹片长条制作,弹片长条的中部固定在传感器外壳上,并与内部测量电路相连,安装时只需将环形探头套于树茎上,探头的弹性可确保传感器位置固定;水分指标由基于驻波比法的水分测量电路^[23]确定 (图 1 绿色部分)。传感器输出的电压 (*U*) 与树茎体积含水率线性对应,然而本文研究对象为树茎的冻融状况,无需得到体积含水率的真实数值,因此,直接用传感器输出的电压表征水分指标 (*W*)^[24]。

环境温度信息由柱形探头获取,探头使用金属铂制作,探头一端固定在传感器外壳上,并与内部测

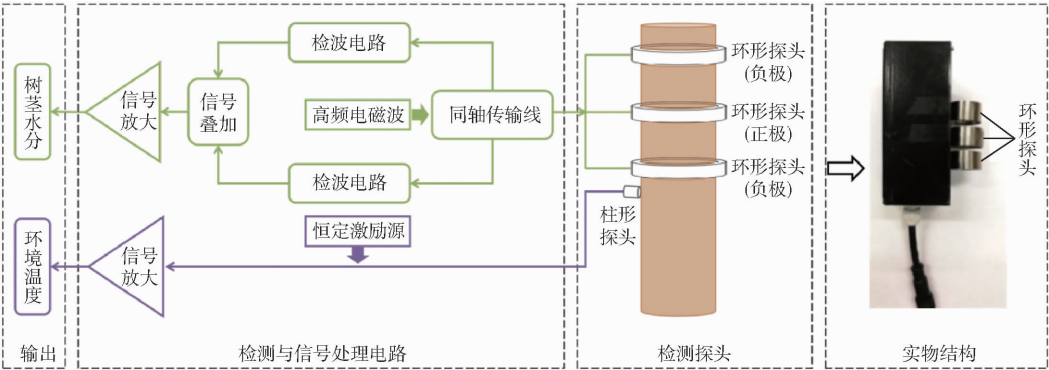


图 1 传感器测量原理与结构图

Fig. 1 Sensor principle and construction

量电路相连,另一端贴近树茎外表皮;环境温度由基于铂电阻法的温度测量电路^[25]确定(图 1 紫色部分),电路输出的电压信号可转换为环境温度(T)。

传感器的整体结构由信号源(高频电磁波、恒定激励源)、水分测量探头、温度测量探头、检测与信号处理电路及保护外壳组成(图 1 实物结构部分)。通过传感器标定试验,水分指标即为水分测量电路输出电压,在环形探头内侧介质从干燥树茎变为潮湿树茎,直至变为纯水时,其输出电压从 0.392 V 增大到 1.966 V;此外,环境温度从 -40°C 变化到 80°C 时,温度测量电路输出电压从 1.969 V 增大至 2.905 V^[22]。通过传感器扰动因素分析试验发现,所得数据可能受树茎直径、环境温湿度和电导率的影响^[16,24]。但试验关注的重点为非盐碱地植物的越冬期,这一时期,树茎直径因植物处于休眠期而变化不大^[19];环境温度较低,传感器输出稳定^[24];环境湿度在雨天或积雪融化时会有所上升,从而使传感器测得的水分指标略高于树茎水分的实际值,然而考虑到此时环境温度必然高于冰点,不会对冻融状况的判断产生影响。综上所述,传感器所得数据准确可靠,满足实际测量要求。

1.2 活立木茎干水分冻融状况

针对不同树种,通过试验发现,对于乔木类植物,当环境温度突降至冰点时,树茎内温度滞后于环境温度 2 h 左右下降至冰点,而结冰过程用时在 6 h 左右^[22]。这说明前 2 h 的环境温度影响着当前时刻的冻融状况。然而环境温度与植物的生理状态间接相关,无法单独成为冻融状况的判断依据^[26]。

树茎水分指标在进入越冬期后会随着平均气温的变化而发生明显的改变,越冬期树木落叶并基本处于休眠状态,蒸腾作用减小,根部吸水能力降低,树木生理作用对水分指标影响微弱,冻融过程中树茎内水与冰的相互转化是水分指标变化的主要原因^[19,22],2017 年 9 月 27 日—2018 年 6 月 27 日期间,在内蒙古自治区呼和浩特市,使用具有独立知识

产权的自制活立木茎干水分传感器实时获取花楸树的水分指标数据,如图 2 所示(数据采集间隔为 10 min,为直观表现所得数据随日期的变化情况,图中横坐标刻度以日期为间隔,下同)。由图 2 可以看出,水分指标与同期的平均气温的变化存在相似的趋势,水分指标在冬季和其他季节有着明显不同的数据特征,冬季水分指标的日极差明显高于其他季节,而且冬季水分指标的平均值明显低于其他季节。这说明水分指标在冬季因树茎内水与冰相互转化而发生改变,其变化情况可反映植物的冻融状况。

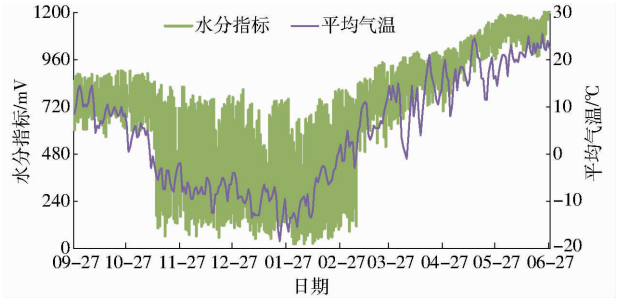


图 2 花楸树水分指标变化曲线

Fig. 2 Water index variation curve of Catalpa

综合上述研究得出,活立木的冻融状况不仅与环境温度相关,还与树木的水分指标关系密切。因此,将水分指标与环境温度相结合,尝试性提出一种基于活立木茎干水分序列包络分析的方法来实时检测其冻融特性,为植物防冻灾提供理论及技术支持。

1.3 基于活立木茎干水分序列包络分析的冻融状况检测原理

包络分析^[27]是时间序列信号处理的常用方法。对于一段时间长度的信号,根据设定的采样间隔求取信号的峰值,将其峰值点连接起来,就可以得到信号数据上方和下方的两条线,将其称为包络线。活立木水分指标和环境温度随时间规律性波动,属于时间序列信号,可以采用包络分析进行处理。

包络分析需要选取合适的信号采样间隔,以图 2 中花楸树的水分指标为例,本研究对比了不同

采样间隔(采样间隔变化范围 360~1 800 min,变化梯度 60 min)下水分指标的包络线,图 3 为其中最具代表性的 3 种采样间隔(1 200、1 320、1 440 min)下的包络分析图像。可以看出,采样间隔选取过小(图 3a 虚线区域),绘制的包络线与水分指标的贴合程度过于紧密,部分水分指标的非极值信息被一并获取;而采样间隔选取过大(图 3c 虚线区域),绘制的包络线与水分指标的贴合程度相对稀疏,部分水分指标的极值信息丢失;采样间隔选取 1 320 min(图 3b),绘制的包络线能较好地反映水分指标极值的变化趋势。因此,本研究将包络分析的采样间隔选取为 1 320 min。

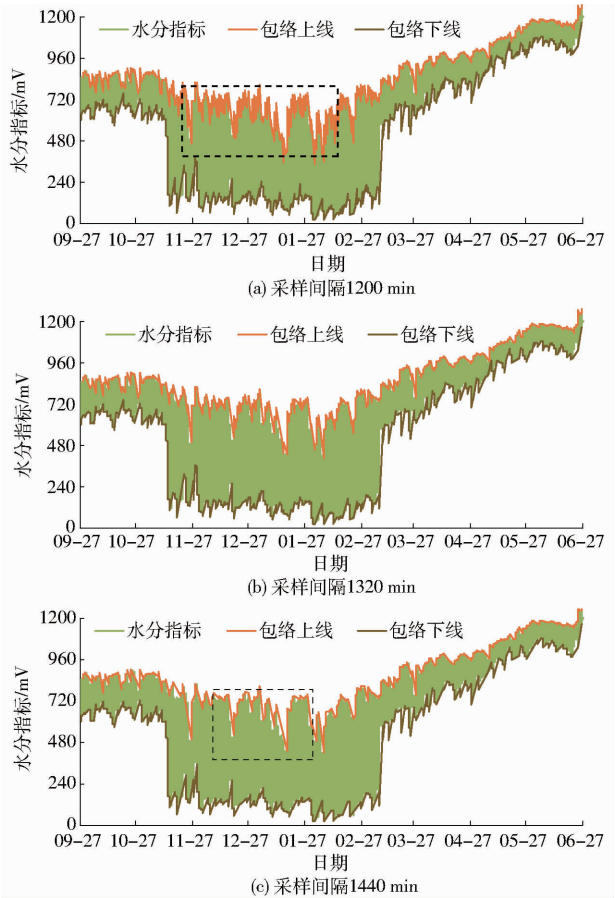


图 3 3 种典型采样间隔下的花楸树水分指标包络线
Fig. 3 Water index envelopes of Catalpa at three typical sampling intervals

分析图 3b 可以发现,花楸树在 10 月中旬进入越冬期后水分指标包络上下线的数值均有所下降,且两者差值明显增大。同样的,可以对环境温度进行包络分析,由 1.2 节可知,环境温度无法准确表征冻融状况,然而当环境温度的最低值低于冰点时,树茎才有可能在一定时间后出现冻融状况,因此环境温度的最低值(即环境温度的包络下线值)可作为冻融判断的辅助指标^[19],对水分指标判断出的冻融状况进行一定程度的校准,环境温度包络分析的采

样间隔同样选取为 1 320 min。
因此,活立木的冻融状况可借助包络分析方法进行定量表示,即通过当前时刻下前 1 320 min 的数据,实时判断当前时刻下后 1 320 min 以内可能出现的最大冻融状况。进一步取水分指标包络上下线的平均值(简称包络均值),并结合环境温度的包络下线值,建立更为直观的活立木茎干冻融状况评价指标(简称冻融指标)计算模型,为活立木冻融状况的评估提供参考。

1.4 冻融指标计算模型

计算冻融指标首先需要判断树茎是否进入冻融状态。由 1.3 节可知,当水分指标包络线均值低于设定的阈值(该阈值因树种和环境的不同而有所差异,在 1 400~1 500 mV 范围内选取,为经验值^[22]),且环境温度包络下线值同时低于设定的阈值(对于非盐碱地区的植物,该阈值一般取 0℃^[19])时,判定树茎进入冻融状态,即树茎进入冻融状态的必要条件为

$$\overline{W}_i^{ab} \leq \overline{W}^e \tag{1}$$

$$T_i^a \leq T^e \tag{2}$$

式中 $\overline{W}_i^{ab}$ ——第 i 时刻由水分指标上下包络线确定的包络线均值, mV
 T_i^a ——第 i 时刻环境温度数据包络下线值,℃
 $\overline{W}^e$ ——水分指标包络线均值对应的阈值, mV
 T^e ——环境温度包络下线值对应的阈值,℃

进而引入符号函数,将冻融状态的判断结果与 -1、0 或 1 直接对应,并通过当前测得的水分指标计算得到未经归一化的冻融指标,即当

$$\sigma_1 = \text{sgn}(\overline{W}_i^{ab} - \overline{W}^e) \neq 1 \tag{3}$$

$$\sigma_2 = \text{sgn}(T_i^a - T^e) \neq 1 \tag{4}$$

则有 $I'_i = \overline{W}^e - \overline{W}_i^{ab} \tag{5}$

其中 $\text{sgn}()$ 为符号函数,其取值为 -1、0 或 1,即 σ_1 、 σ_2 均为 0 时表明树茎开始进入冻融状态(处于临界状态),等于 -1 时表明树茎处于冻融状态中,因此 σ_1 、 σ_2 均不等于 1 时判断树茎进入冻融状态(即此时为本试验的主要研究时期)。 I'_i 为第 i 时刻未经归一化的冻融指标(mV),对其进行归一化处理,可得第 i 时刻的冻融指标(mV)

$$I_i = \frac{I'_i}{\overline{W}^e} \tag{6}$$

I_i 取值范围因归一化处理而被限制在 0~1 之间,将式(1)、(2)、(5)代入式(6),可最终得到冻融指标计算模型,即

$$I_i = \frac{\overline{W^e} - \overline{W_i^{ab}}}{\overline{W^e}} \quad (7)$$

式(7)成立的条件为 σ_1 、 σ_2 均不等于 1。

通过包络分析构建的冻融指标计算模型,将水分指标(W)和环境温度(T)结合起来,并用冻融指标(I)加以表征,通过实时获取冻融指标,可实现对活立木冻融状况的有效评估。

1.5 试验区概况

为验证上述基于活立木茎干水分序列包络分析方法在活立木冻融过程研究中的普适性,在北京市、内蒙古自治区及黑龙江省 3 地,选用阔叶树种(紫薇、海棠及香杨树)为代表进行为期 5~9 个月的试验,其中紫薇树试验地点位于北京市海淀区北京林业大学三顷园苗圃(116°21'14"E,40°0'54"N),属于暖温带半湿润半干旱季风气候;海棠树试验地点位于内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔县和盛生态科技研究院苗圃(111°50'28"E,40°32'33"N),属于中温带大陆性季风气候;香杨树试验地点位于黑龙江省哈尔滨市帽儿山东北林业大学试验林场(127°34'48"E,45°16'12"N),同属于中温带大陆性季风气候。

2 结果分析与讨论

2.1 紫薇树冻融状况检测

紫薇树作为北京市园林绿化的常用树种,其冻融特性日益受到关注。本试验选取 6 株长势良好的紫薇树样本作为试验对象,样本均高 25 cm,传感器安装高度为 10 cm,安装处树茎平均直径 4.5 cm(图 4),监测紫薇树 2018 年 11 月 1 日—2019 年 4 月 1 日的水分指标、环境温度及冻融状况,6 组样本的数据变化趋势相近,随机选取其中 1 组,结果如图 5 所示。

图 5a 为传感器采集到的水分指标和环境温度数据,分析发现,紫薇树越冬期的水分指标与环境温度基本呈同步变化趋势,水分指标在 12 月初期因植物进入休眠状态而小幅度下降,其波动范围也略有



图 4 紫薇树现场监测图
Fig. 4 Site monitoring map of Violet

增加,在离开越冬期的过程中逐渐恢复至原水平。此外,在 12 月初环境温度在较长的时间内下降明显,此时水分指标的下降程度和波动范围同样发生了明显的变化,类似的状况也出现在了 12 月末。整体上看,越冬期内环境温度基本都在冰点上下波动,紫薇树水分指标的变化幅度不大,因此树茎内只有少许水分凝结成冰,且结冰状况随温度的波动而不断处于冻结与融化的交替过程中,冻融状况轻微且变化范围微小。

进一步对上述数据进行包络分析,求取包络线均值,并由此计算出冻融指标,如图 5b 所示。此时冻融指标较小,不易观察,因此适当缩小冻融指标的坐标区间(图 5c),可以发现,冻融主要发生在 11 月末到次年 2 月末,其中冻融指标相对明显的时间段为 12 月初和 12 月末;整个越冬期冻融指标不断波动但均未超过 0.004。因此判断出冻融状况轻微,与图 5a 的分析相吻合。

2.2 海棠树冻融状况检测

海棠树作为极具观赏价值的园林绿化树种,其冻融特性日益受到关注。本试验选取 6 株长势良好的海棠树样本作为试验对象,样本均高 35 cm,传感器安装高度为 13 cm,安装处树茎平均直径 5 cm(图 6),监测海棠树 2018 年 9 月 1 日—2019 年 6 月 1 日的水分指标、环境温度及冻融状况,6 组样本的数据变化趋势相近,随机选取其中 1 组,结果如图 7 所示。

分析图 7a 发现,海棠树越冬期水分指标在 10

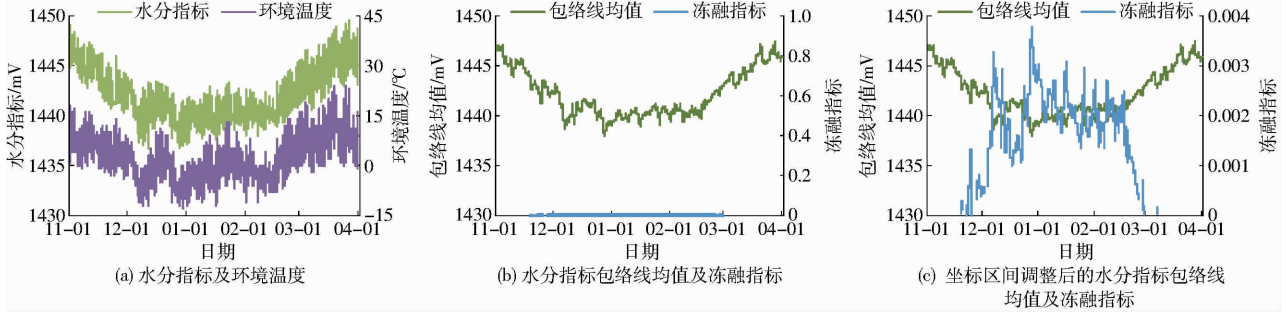


图 5 紫薇树越冬期树茎冻融状况变化曲线

Fig. 5 Overwintering stem freeze-thaw condition of Violet

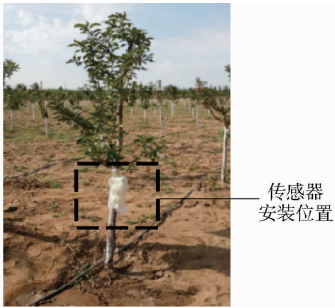


图 6 海棠树现场监测图
Fig. 6 Site monitoring map of Begonia

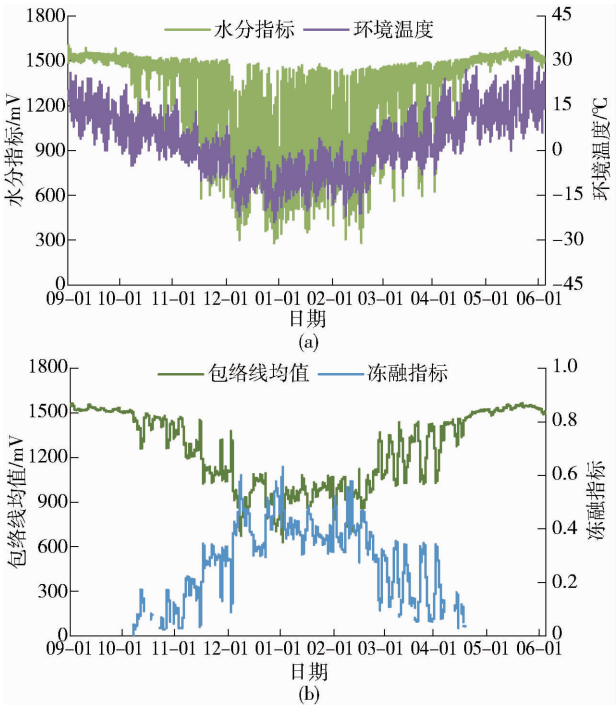


图 7 海棠树越冬期树茎冻融状况变化曲线
Fig. 7 Overwintering stem freeze-thaw condition of Begonia

月中旬因植物进入休眠状态而小幅度下降,其波动范围也略有增加;之后又随着冬季环境温度的降低,在 11 月以后下降程度逐渐增大,波动范围也明显增加;在离开越冬期的过程中逐渐恢复至原水平。此外,在 12 月初和 1 月初环境温度在较长的时间内下降明显,此时水分指标的下降程度和波动范围同样变化明显。整体上看,越冬期内环境温度基本都在冰点上下波动,但处于冰点下方的比例明显增多,海棠树水分指标的波动范围较大,因此树茎内有较多的水分凝结成冰,且结冰状况随温度的波动而不断处于冻结与融化的交替过程中,冻融状况变化范围较大。

进一步分析图 7b 发现,冻融主要发生在 10 月末至次年 4 月初,且冻融指标变化幅度较大,最低时仅有 0.1,最高时可达 0.7。因此判断出冻融状况在整个越冬期变化较大,严重时冻融程度较重,轻微时基本不存在冻融现象,与图 7a 及 2.1 节中紫薇树

冻融状况的分析相吻合。

2.3 香杨树冻融状况检测

香杨树作为集观赏与用材于一身的园林绿化树种,其冻融特性日益受到关注。本试验选取 6 株长势良好的香杨树样本作为试验对象,样本均高 75 cm,传感器安装高度为 30 cm,安装处树茎平均直径 7 cm (图 8),监测香杨树 2018 年 10 月 1 日—2019 年 5 月 1 日的水分指标、环境温度及冻融状况,6 组样本的数据变化趋势相近,随机选取其中 1 组,结果如图 9 所示。



图 8 香杨树现场监测图
Fig. 8 Site monitoring map of Balsam Poplar

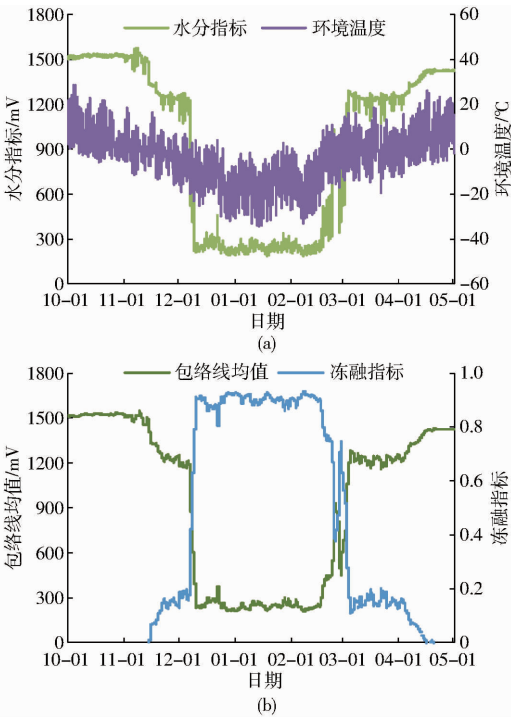


图 9 香杨树越冬期树茎冻融状况变化曲线
Fig. 9 Overwintering stem freeze-thaw condition of Balsam Poplar

分析图 9a 发现,香杨树越冬期水分指标的变化分为多个阶段:第 1 段在 11 月初到 11 月中旬,水分指标下降程度较低,波动范围略有增加;第 2 段在 11 月中旬到 12 月初,水分指标的下降程度变大,波动范围明显增加;第 3 段在 12 月中旬到次年 2 月中旬,水分指标下降到极低的程度,其波动范围略低于

前两个阶段,但明显高于未冻融阶段;第 4 阶段为离开越冬期的阶段,水分指标逐渐在此过程中恢复至原水平。因此,第 1 阶段,环境温度下降到冰点附近,此时树茎内少许水分凝结成冰,且结冰状况随温度的波动而不断处于冻结与融化的交替过程中,冻融状况轻微;第 2 阶段,环境温度处于冰点下方的比例增多,此时树茎内大量水分凝结成冰,且其中一部分冰还会随温度的波动而不断处于冻结与融化的交替过程中,冻融状况较重;第 3 阶段,环境温度处于极低的区间,此时树茎内绝大部分水分凝结成冰,且只有小部分树茎深处的冰会随温度的波动而不断处于冻结与融化的交替过程中,冻融状况严重。

进一步分析图 9b 发现,冻融主要发生在 11 月中旬至次年 4 月中旬,且冻融指标最高可达到 0.9,此时冻融状况相对严重,与上述分析均吻合。此外,对比本团队同期进行的基于潜热效应的冻融检测试验结果^[22]发现,冻融指标存在相近的变化趋势,进一步证明该无损检测新方法的可靠性。

2.4 讨论

综合分析 2.1 ~ 2.3 节可以发现,温带地区的 2 组试验对象(海棠树和香杨树)与暖温带地区的试验对象(紫薇树)在越冬期内冻融过程既存在一定的联系,同时又有明显的差异。联系之处在于 3 组试验的水分指标均因进入越冬期而出现不同程度的下降,而在离开越冬期后逐渐恢复至原水平。差异之处在于 3 组试验地点的所处纬度逐渐升高,越冬期环境最低温度逐渐降低,导致冻融状况出现不同的阶段:紫薇树仅存在由于植物进入(或离开)越冬

期而使水分指标略微变化的阶段,此阶段对应的冻融指标同样较小、变化微弱,冻融状况轻微;海棠树不仅存在上述阶段,还出现了因环境温度进一步降低而使水分指标大幅度变化的新阶段,此阶段的冻融指标同样在 0.3 ~ 0.7 范围内大幅波动变化,冻融状况加重;香杨树在具备海棠树的 2 种冻融阶段的前提下,还出现了随着环境温度完全低于 0℃ 而使水分指标达到极低的新阶段,此阶段的冻融指标在 0.9 附近基本保持稳定,冻融状况相比其他阶段更加严重。试验结果表明,冻融指标可准确地表征出冻融状况的差异,本文方法准确可靠,满足实际使用要求。

3 结论

(1)活立木茎干水分含量与环境温度的变化可以作为活立木冻融状况的表征参数。

(2)利用基于活立木茎干水分序列包络分析的方法,确定最佳信号采样间隔为 1 320 min,构造了冻融状况检测的新方法,建立了冻融指标的计算模型,为冻融状况判断给出了一种参考指标,进而为活立木的冻融状况检测提供了一种技术手段。

(3)试验发现,紫薇树在越冬期的冻融状况轻微,冻融指标最高为 0.004;海棠树的冻融状况变化较大,冻融指标在 0.1 ~ 0.7 之间波动变化;香杨树的冻融状况相对严重,对应的冻融指标最高时可达 0.9。试验表明,所提新方法能准确反映活立木的冻融状况,适用性好,可靠性高,且应用方便,适合在农林业推广使用。

参 考 文 献

[1] NAGAO M, ARAKAWA K, TAKEZAWA D, et al. Long- and short-term freezing induce different types of injury in *Arabidopsis thaliana* leaf cells[J]. *Planta*, 2008, 227(2):477 - 489.

[2] 吴佳佳, 李素英, 周舆, 等. 典型草原地区环境温度对植物温度的影响研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(1):156 - 162.

WU Jiajia, LI Suying, ZHOU Yu, et al. Effects and respond of plant temperature on ambient temperature in typical grassland areas[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(1):156 - 162. (in Chinese)

[3] 巴特儿·巴克, 克热木·伊力, 匡玉疆, 等. 库尔勒香梨历年冬季低温评价及严重冻害成因分析[J]. *新疆农业大学学报*, 2008, 31(6):17 - 20.

BATOR Bake, KARIM Ali, KUANG Yujiang, et al. Evaluation of low temperature in winter over years and analysis on the reasons of Korla Fragrant Pear freezing injury[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2008, 31(6):17 - 20. (in Chinese)

[4] WEISER C. Cold resistance and injury in woody plants:knowledge of hardy plant adaptations to freezing stress may help us to reduce winter damage[J]. *Science*, 1970, 169(3952):1269 - 1278.

[5] 王荣富. 植物抗寒指标的种类及其应用[J]. *植物生理学通讯*, 1987(3):49 - 55.

WANG Rongfu. The kinds of hardiness criteria and their application[J]. *Plant Physiology Communications*, 1987(3):49 - 55. (in Chinese)

[6] SHEREMET Y A, YEMETS A I, BLUME Y B. Inhibitors of tyrosine kinases and phosphatases as a tool for the investigation of microtubule role in plant cold response[J]. *Cytology and Genetics*, 2012, 46(1):1 - 8.

[7] WISNIEWSKI M, NEUNER G, GUSTA L V. The use of high-resolution infrared thermography (HRIT) for the study of ice nucleation and ice propagation in plants[J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2015(99):e52703.

[8] HACKER J, NEUNER G. Ice propagation in plants visualized at the tissue level by infrared differential thermal analysis (IDTA)[J]. *Tree Physiology*, 2007, 27(12):1661 - 1670.

- [9] RASHI A, MUGNOZZA G, SURACE R, et al. The use of ultrasound technique to monitor freezing and thawing of water in plants[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1989, 27(1-4):411-418.
- [10] CHARRIER G, PRAMSOHLER M, CHARRA-VASKOU K, et al. Ultrasonic emissions during ice nucleation and propagation in plant xylem[J]. New Phytologist, 2015, 207(3):570-578.
- [11] CHARRIER G, NOLF M, LEITINGER G, et al. Monitoring of freezing dynamics in trees: a simple phase shift causes complexity[J]. Plant Physiology, 2017, 173(4):2196-2207.
- [12] JUN K, GUILLAUME C, MATSUO U, et al. Characteristics of ultrasonic acoustic emissions from walnut branches during freeze-thaw-induced embolism formation[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(7):1965-1975.
- [13] SPARKS J P, CAMPBELL G S, BLACK A R. Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in winter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study[J]. Oecologia, 2001, 127(4):468-475.
- [14] 王玉婷. 环境温度对活立木树干内含水率和含冰率的影响规律研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2017.
WANG Yuting. Research on effects of environmental temperature on the trunk moisture content and ice content of standing trees [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [15] SUN Y, ZHOU H, SHAN G, et al. Diurnal and seasonal transitions of water and ice content in apple stems: field tracking the radial location of the freezing- and thawing-fronts using a noninvasive smart sensor[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 274(1):75-84.
- [16] 白陈祥. 基于驻波原理的乔木茎干含水率检测方法研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008.
BAI Chenxiang. The study on measurement of stem water content based on standing wave theory[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese)
- [17] 王海兰. 乔木体水分的测试技术及其监测系统的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
WANG Hailan. Research on measurement and monitor of stem water content[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [18] 刘贺, 赵燕东. 基于驻波原理的短探针小麦茎水分传感器[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11):140-144.
LIU He, ZHAO Yandong. Wheat stem moisture sensor using short probes based on SWR principle[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11):140-144. (in Chinese)
- [19] 张新. 植物生命需水状况实时在线智能检测方法研究[D]. 北京:北京林业大学, 2017.
ZHANG Xin. Research on real time online and intelligent detection measurement of plant water content[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [20] 高超, 赵玥, 赵燕东. 基于茎干含水率的紫薇病虫害等级早期诊断方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11):189-194, 250.
GAO Chao, ZHAO Yue, ZHAO Yandong. Early diagnosis method of disease and pest level on *Lagerstroemia indica* based on stem water content[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):189-194, 250. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181122&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.022. (in Chinese)
- [21] GAO C, ZHAO Y, ZHAO Y D. A novel sensor for noninvasive detection of in situ stem water content based on standing wave ratio[J/OL]. Journal of Sensors, 2019:3594964. <https://doi.org/10.1155/2019/3594964>.
- [22] 田昊, 高超, 赵玥, 等. 基于潜热效应的活立木冻融检测传感器设计与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3):223-231.
TIAN Hao, GAO Chao, ZHAO Yue, et al. Design of freeze-thaw detection sensor for standing forest stock based on latent heat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):223-231. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200326&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.026. (in Chinese)
- [23] 赵燕东, 王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. 农业机械学报, 2002, 33(4):109-111, 121.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4):109-111, 121. (in Chinese)
- [24] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):310-316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160142&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.042. (in Chinese)
- [25] 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]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4):988-995. (in Chinese)
- [26] 董满宇, 江源, 王明昌, 等. 芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征[J]. 生态学报, 2012, 32(23):7430-7439.
DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al. Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23):7430-7439. (in Chinese)
- [27] GARCIA L, ALVAREZ I, TITOS M, et al. Automatic detection of long period events based on subband-envelope processing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(11):5134-5142.