

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.039

基于茎直径和茎流复合测量的植物根压无损观测方法^{*}

员玉良^{1,2} 程 强¹ Lutz Damerow³ 孙宇瑞¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109;
3. 波恩大学农业工程学院, 波恩 53115)

摘要: 植物夜间补水依靠根压。根压是研究植物水分生理的重要指标之一,但是根压测量是一个迄今尚未解决的技术难题,尤其是对草本植物,因不允许采用开窗式测量,所以具有更大的技术挑战性。为此探讨了在茎直径与茎流速率复合测量基础上,对 Steppe 水分存储和流动数学模型作算法换序,实现植物根压的无损动态观测。实验样本选取3株温室茄子,得到了2个独立的、连续5 d的实验数据。结果显示夜间及次日凌晨茄子样本的茎流速率为零,茎直径缓慢增长,此时间段内根压开始出现;晴天时,白天茄子样本蒸腾作用强烈,茎流速率大,茎秆收缩明显,夜间根压增幅较快;阴天时,情况恰好相反,夜间茄子样本根压幅值较小。可见,根压动态均满足茎流速率和茎直径变化的信息解译与气象数据的影响,完全符合已知的植物水分生理调节规律。因此,算法换序对无损观测茄子样本的根压是可行的,可将该方法应用于其他植物根压的无损检测。

关键词: 茄子 根压 茎流 茎直径 水分传输模型

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0290-06

Non-destructive Observation of Plant Root Pressure Based on Combined Measurement of Stem Diameter and Sap Flow

Yun Yuliang^{1,2} Cheng Qiang¹ Lutz Damerow³ Sun Yurui¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China
3. Institute of Agricultural Engineering, University of Bonn, Bonn 53115, Germany)

Abstract: As the nighttime replenishment engine, root pressure is one of the most important plant water physiological indices. But root pressure measurement is still a technical problem needed to be resolved. Especially for little plants or herbaceous plants, they are not allowed to be measured invasively. Thus it is a greater technical challenge. On the basis of the combined measurement of stem diameter and sap flow, we attempted to measure the plant root pressure by changing the algorithm orders of the Steppe water flow and storage model. Three greenhouse eggplant samples were selected in the experiment and two groups of five consecutive days of experimental data, which were independent, were displayed. The results showed that from night to dawn, the sap flow rate was zero and the stem grew slowly. Meanwhile, the root pressure began to appear. In the sunny days, the transpirations of eggplant samples were more intensive, the sap flow rates were higher and the stem shrank more significantly. Accordingly, the root pressure increased faster at night. On the contrary, when it was cloudy, the root pressure amplitudes of the eggplant samples were smaller. Obviously, the dynamics of the root pressure were fully consistent with the interpretation for the dynamics of the sap flow rate and the stem diameter, the influence of meteorological data and the known plant physiological water adaptability law. Therefore, it's feasible to observe the root

收稿日期: 2015-04-27 修回日期: 2015-05-29
^{*} 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110008110046)和高端外国专家资助项目(GDT20141100003)
作者简介: 员玉良, 博士生, 青岛农业大学讲师, 主要从事土壤水分及植物生理信息采集研究, E-mail: yunyuliang@cau.edu.cn
通讯作者: 孙宇瑞, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤、植物传感方法和信息解译与复杂农业对象建模研究, E-mail: pal@cau.edu.cn

pressure dynamics of the eggplant samples nondestructively by changing the algorithm orders of the Steppe water flow and storage mathematical model. It allows conducting the similar experiments for other plants.

Key words: Eggplant Root pressure Sap flow Stem diameter Water flow and storage model

引言

植物体内的水分传输白天以蒸腾作用为主,夜间根压起主导作用^[1-3],而水分子内聚力(−20 MPa)的存在则保证了水分传输的连续性^[4]。白天,植物叶片气孔打开,蒸腾作用由叶片开始,首先消耗植物体内存储的水分,造成植物茎秆膨压下降,茎秆收缩,水分的散失引起叶片水势降低,产生的水势梯度自上而下传递到根部,致使根系开始吸收土壤中的水分。而夜晚气孔关闭,蒸腾作用基本停止,但植物仍然处于水分亏缺状态,此时根系需要继续从土壤中吸收水分以补充白天由于蒸腾导致的水分亏缺。这个过程的证据之一是茎秆的逐渐膨胀^[5-10],而水分传输的主要动力来源于根压^[11-12]。吐水和伤流都是根压存在的直接证据^[13-14]。前人研究结果表明,根压一般只在植物蒸腾作用消失或者微弱的夜间和凌晨出现^[15-16],如初春长新叶或深秋已落叶的树木根压作用比较明显,随着叶片长大,根压会慢慢消失。尽管根压对植物水生理的调节作用不可忽视,但是它的测量始终是一个技术瓶颈。对于木本植物,根压不得不采用破坏性测量,但因对植物体伤害较大^[17-20],无法应用于草本植物。

目前商业化的传感技术已经分别实现了植物蒸腾速率无损测量与茎秆直径测量^[21-22]。本研究以

温室栽培的茄子样本为对象,通过 2 种传感器的复合应用与 Steppe 植物水分传输模型作算法换序,测量植物茎流速率与茎直径的动态变化,并同时观测根压的日周期变化规律。

1 材料与方法

1.1 实验条件

实验于 2013 年 11—12 月在北京某日光温室(116°26′41″ E,40°10′37″ N)进行。实验对象为随机选取的 3 株茄子样本,播种时间为 2013 年 8 月,行距 60 cm,株距 40 cm。该温室为向南朝向,长 30 m,宽 8 m。

1.2 观测参数与方法

植物茎直径与茎流的测量:将微变传感器 LVDT(Linear variable differential transformer)安装在茄子样本茎秆离土壤表层 10 cm 处。茎流速率传感器安装于茎秆微变传感器 LVDT 下方,采集时间间隔 15 min。

微环境因子:主要包括空气温度(Air temperature,T)、空气相对湿度(Relative humidity,RH)、光合有效辐射(Photosynthetically active radiation,PAR)以及饱和水汽压差(Vapor pressure deficit,VPD)等指标,其中饱和水汽压差可由空气温度及相对湿度计算得出^[23]。

以上各传感器的基本信息见表 1。

表 1 传感器基本信息
Tab.1 Basic information of sensors

传感器名称	型号	量程	精度	生产厂商
LVDT	GA09	0 ~ 5 mm	±0.01 mm	上海极典电子公司
茎流传感器	SGB9-WS	−2.5 ~ 2.5 V	±0.33 μV	美国 Dynamax 公司
温度传感器	DS18B20	−55 ~ 125 ℃	±0.5 ℃	美国 Dallas 公司
湿度传感器	PTS-2A	0 ~ 100%	±2%	锦州阳光气象科技公司
光量子传感器	AV-19Q	0 ~ 3 000 μmol/(m ² ·s)	±3%	美国 AVALON 公司

1.3 Steppe 水分传输模型

根据内聚力张力理论,水分在植物体内自下而上完成运移,其动力来源于叶片与根系间的水势差。Steppe 等^[24]按照水分在植物体内的传输路径分为 3 个水分存储区:土壤区(input)、茎秆区和冠层带(output)。尤其需要指出的是,茎秆既作为水分传输通道,其内部的细胞组织又起着充、放水的缓冲功能。Steppe 水分传输模型(图 1)描述了三者间的相

互支撑关系^[25]。其中左框图为以水势作为输入的水分传输子模型,右框图为以茎直径为输入参数的茎直径变化子模型。图中 Ψ^s 为总水势, Ψ^m 为基质水势, W 为总储水量, C 为总储水容量, R^s 为木质部与存储组织间的水分阻力, ρ_w 为水的密度, A 为木质部与存储组织虚拟隔离膜的面积, L 为虚拟隔离膜径向水力传导系数, W^s 为茎秆储水量, R^x 为木质部的水分阻力, Ψ^x 为木质部水势, F_{H_2O} 为茎流速率, V^s 为单个存储组织体积, a 为异速生长系数, l 为所

选取茎秆部分的长度, D 为所选取茎秆外部茎直径, Ψ_p^s 为存储组织的膨压势, ε_0 为比例参数, Γ 为膨压势的阈值, 达到或超过 Γ 时细胞壁开始分裂, Φ 为细胞壁的可拓展系数, Ψ_π^s 为存储组织的渗透势。

通常该模型的计算顺序为: 先以水势作为输入计算茎流速率, 再利用茎流速率计算茎直径和水势, 或者直接利用茎直径计算水势。本文的技术亮点为算法换序(见 1.4.1 节)及其实验(见 1.4.2 节)。

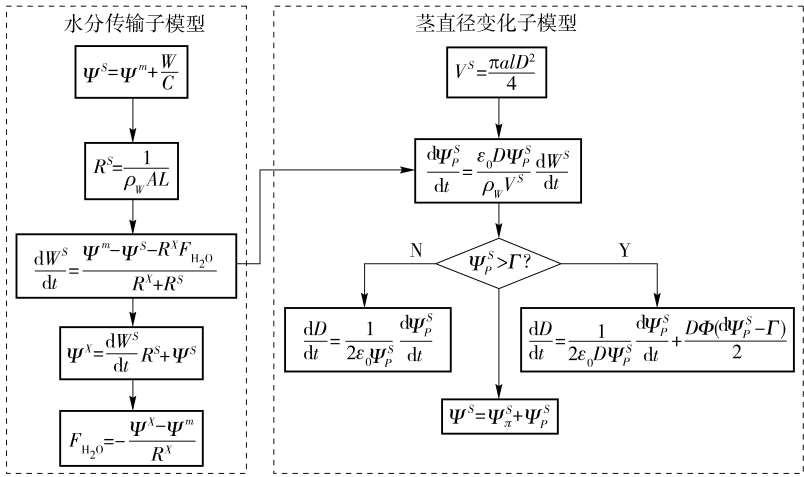


图 1 水分传输数学模型

Fig. 1 Mathematical model of water transmission

1.4 实验方法

1.4.1 模型的算法换序

根据范特霍夫方程

$$\Psi_\pi^s = - \frac{RTM_s}{M_{M_{sucrose}}W^s} \tag{1}$$

式中 R ——通用气体常数,取 8.31 MPa·g/(mol·K)
 T ——温度, K
 M_s ——存储组织内的含糖量, g
 $M_{M_{sucrose}}$ ——蔗糖的摩尔质量,取 342.3 g/mol
因为初始 Ψ_p^s 是在假设 $\Psi^x = \Psi^s$ 时算得, 所以

$$\Psi_\pi^s(0) = - \frac{RTC(0)}{M_{M_{sucrose}}} \tag{2}$$

式中 $C(0)$ ——存储组织的初始糖分质量比, g/g
结合式(1)和式(2), 将水分传输数学模型进行优化、完善, 可整理为以下计算序列

$$\Psi^x = \Psi^m - F_{H_2O}R^x \tag{3}$$

$$\frac{dW^s}{dt} = \frac{\Psi^x - \Psi^s}{R^s} \tag{4}$$

$$W^s = \frac{D^2(1 - a^2)\pi l \rho_{H_2O}}{4} \tag{5}$$

$$\frac{dW^s}{dt} = \frac{\pi l \rho_{H_2O}}{R^s} \frac{dD}{dt} \tag{6}$$

$$\frac{d\Psi_p^s}{dt} = \frac{\varepsilon_0 D \Psi_p^s}{W^s} \frac{dW^s}{dt} \tag{7}$$

$$\frac{d\Psi_p^s}{dt} = \frac{\varepsilon_0 D \Psi_p^s}{W^s} \frac{dW^s}{dt} + \varepsilon_0 D \Psi_p^s \Phi (\Psi_p^s - \Gamma) \tag{8}$$

除去茎流速率和茎直径以及温室内的空气温度等参数, 公式中涉及到的其他未知参数初值, 可参照

文献[24-25]提供方法得到。

显然, 通过式(1)~(8), 对算法进行换序处理, 以茎流速率作为输入量, 可以求得 Ψ^x 和 D ; 以茎直径为输入量, 也可以求出 Ψ^x 。两次求得的 Ψ^x 相减即可求得根压。

1.4.2 实验步骤

算法实验步骤如下:

- (1) 同步检测茄子样本的微环境因子、茎流速率与茎直径等。
- (2) 以实测茎流速率作为输入变量, 求木质部水势和茎直径, 并比较实测茎直径与模型计算所得茎直径。
- (3) 以实测茎直径为输入, 求木质部水势, 并与步骤(2)所得木质部水势作差, 求得根压。
- (4) 在每一个连续 5 d 的实验数据采集过程中重复步骤(3)计算, 以进一步验证根压测量结果。

2 结果与分析

2.1 茎直径与茎流速率

植物的茎直径日变化除了受自然生长影响外, 主要是由茎秆充放水引起^[26]。清晨随着太阳升起和太阳辐射的增强, 植物蒸腾作用逐渐变强, 叶片气孔附近的细胞失水使得水势下降, 便从邻近细胞吸收水分, 该过程自上而下一直传递到根部, 由根部从土壤中吸取水分。显然, 对于长距离传输, 根部吸收的水分来不及满足植物蒸腾作用所需, 茎秆细胞就会释放夜间存储的水分, 从而造成茎秆微量收缩。下午当太阳辐射减弱后, 蒸腾作用也随之减小, 此

时,根部吸收的水分足以满足蒸腾作用,茎秆内细胞组织开始存储水分,进而引起茎秆膨胀。而夜间,通常认为蒸腾作用基本停止,茎流速率为零。茎秆充放水基本结束后,茎直径不再发生显著变化。

图 2 为 11 月 26 日—12 月 1 日期间的气象数据,总体看在此期间气象环境稳定,全部为晴天。图中阴影代表黑夜,下同。图 3 分别为在此期间 3 株茄子样本的茎直径与茎流变化曲线。3 株茄子样本的实测茎直径和计算茎直径均为先随着蒸腾量的增加而减小,后随着蒸腾的减小而逐渐增大。不同的是,通过模型计算得到的茎直径在夜幕降临时达到峰值,不再变化,一直持续到次日新的变化周期开始;而实际观测到的茎直径则在夜间仍处于逐渐膨胀状态,一直增加至次日凌晨新的变化周期开始。因此,该算法对植物白天的茎直径变化具有良好的

预测效果。夜间茎流速率实测值为零是因为传感器灵敏度受限所致^[27],实际上植物仍有微量液流存在,以保证植物茎秆仍处于充水状态。显然,实测数据表明除了叶片蒸腾拉力,还存在一种推力,即根压,它起到一个水泵的作用,是夜间驱动水分运移的动力。

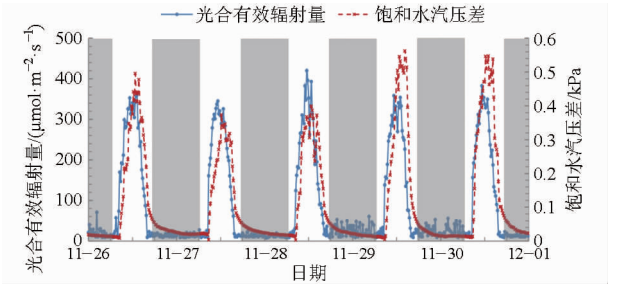


图 2 温室微环境因子变化曲线

Fig. 2 Curves of micrometeorological factors in greenhouse

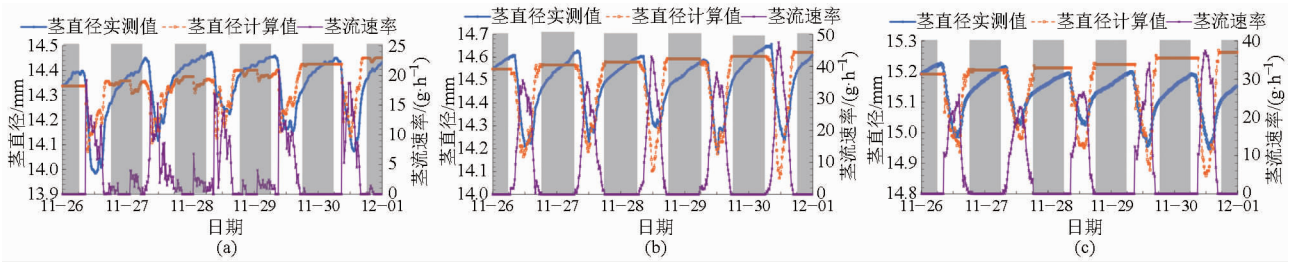


图 3 茎直径与茎流速率变化曲线

Fig. 3 Stem diameter and sap flow rate curves

(a) 样本 1 (b) 样本 2 (c) 样本 3

从图 2 中还可以看出,温室内的饱和水汽压差也呈周期性日变化规律:中午前后达到峰值,夜间基本接近于零,说明夜间空气相对湿度较大,而空气温度相对较低,已经形成了根压产生的有利条件。

2.2 木质部水势及根压

由 Steppe 水分传输数学模型可知,木质部和周围细胞存储组织的水势差造成了植物茎秆的充放水,膨压的变化导致了植物茎秆的膨胀或收缩;而这种水势差是由植物的蒸腾作用和根压分时作用引起的。当蒸腾作用增强时,木质部水势会减小,茎秆释放水分,茎秆收缩;反之,当蒸腾作用非常微弱时,根压随之产生,保证根部从土壤中吸收水分以维持对

植物体进行充水,夜间茎秆继续微膨胀也是一个直接的定性证据。因此,通过观测植物木质部水势的变化可以间接估计植物根压的变化动态。

图 4 为相同温室环境下,分别以茎流速率和茎直径作为输入条件,计算得到的 3 株茄子样本的木质部水势、根压的变化曲线。

从图 4(木质部水势 1 和木质部水势 2)中看出,3 株茄子样本 2 次计算得到的木质部水势的变化趋势基本一致,但存在一定的差异。这种差异基本都出现在夜间或者次日凌晨,而这个时间段的茄子样本蒸腾作用基本消失或者很微弱,而且此时温室内的饱和水汽压差相对较小,符合根压产生的条件。

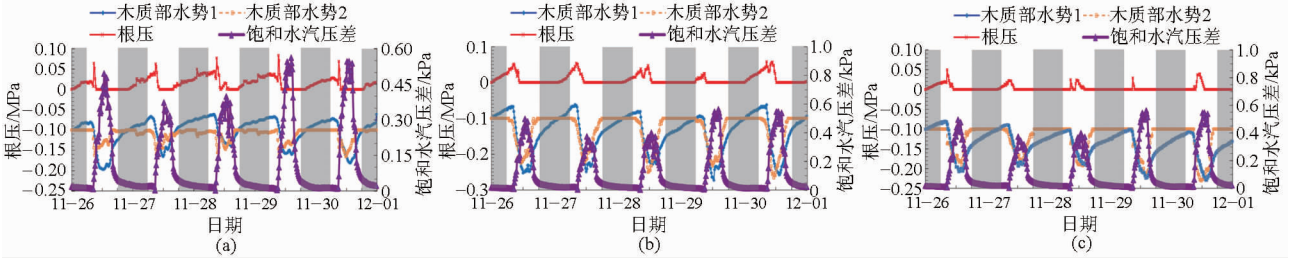
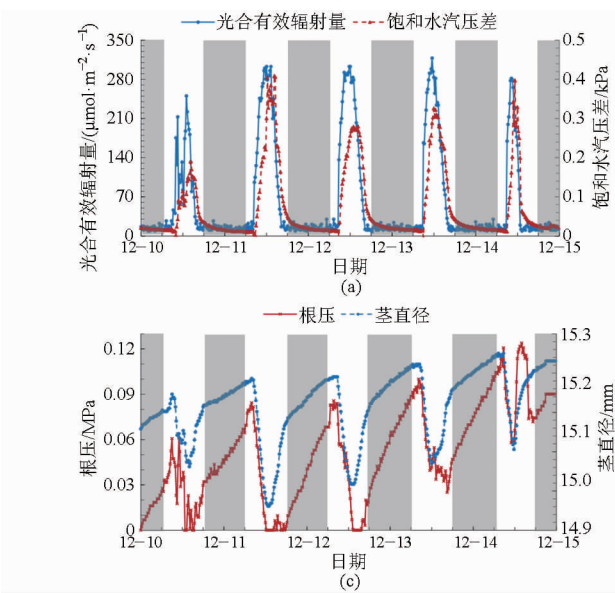


图 4 水势与根压变化曲线

Fig. 4 Root pressure and water force curves

(a) 样本 1 (b) 样本 2 (c) 样本 3

另外,图 3 中还显示,3 株茄子样本的茎直径在该阶段仍继续增长,显然,只有根压作用才能解释这一现象,即该水势差为茄子样本的根压。



2.3 重复性实验验证

另选取 12 月 10—15 日连续 5 d 的数据进行重复性根压观测,结果如图 5 所示。

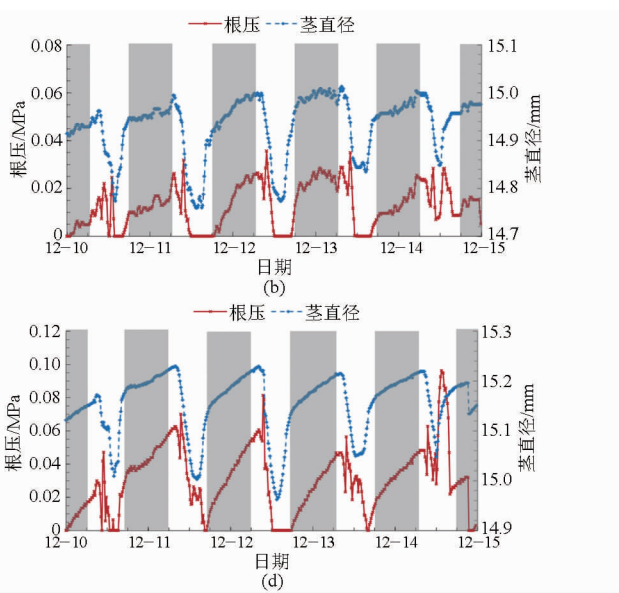


图 5 验证阶段 3 株茄子样本数据变化曲线
Fig. 5 Data curves for three eggplant samples in validation phase
(a) 微气象因子 (b) 样本 1 (c) 样本 2 (d) 样本 3

首先,这个实验阶段包括了阴天(12 月 10 日)、多云(12 月 12—13 日)与晴天,它与第 1 次观测期间的稳定气象数据有了很大的不同。

与图 4 结果类似,根压的最大值约为 0.1 MPa。随着黑夜的来临,茄子样本的蒸腾作用随之变得十分微弱,根压开始出现,并逐渐增加。此时,在根压推力的作用下,根部开始从土壤中吸收水分,并对茎秆进行充水,以补充白天蒸腾作用损失的水分,因此,茎秆逐渐变粗。整个过程一直持续到次日上午,直至蒸腾作用大于根压。从图 5 中可以清楚地看到茎直径与根压的变化趋势一致。由于 12 月 10 日白天天气阴,光合有效辐射相对较小,而且中午前后辐射强度波动较大,使得蒸腾作用相对较弱,相应地,茄子样本茎秆释放的水分相对较少,茎秆收缩幅度较小。因此,受水势差的直接影响,根压幅值出现了波动且幅值较小,根压的驱动力下降,茎秆充水量随之减小,使得茎秆膨胀的幅度较小。而在晴天,白天天气晴朗,光合有效辐射稳定,茄子样本的蒸腾作用

强烈,茎流速率较大,茎秆收缩幅度较大,失水较多;所以,夜间根压增幅较快,对茎秆充水较多,茎秆膨胀的幅度也比较大,以尽快补充白天茎秆失水。

综合以上 2 个阶段的实验结果,表明观测到的根压动态均满足茎流速率和茎直径变化的信息解译与气象数据的影响,说明算法换序对无损观测茄子样本的夜间根压是可行的。

3 结束语

鉴于植物茎秆与茎流传感器均已商品化,因此本文提出的测量方法为植物生理学实验研究提供了一种可行的植物根压无损感测手段。换句话说,用 2 种植物传感器,通过 Steppe 模型的换序计算得到了 3 个与植物水分生理密切相关的测量结果,它对整体解译植物水分生理调节具有重要意义。该方法成功地实现了茄子样本根压的无损动态观测。为确定该方法的适应性,以后将结合不同作物物种与不同的生长环境继续实验。

参 考 文 献

1 Sands R, Theodorou C. Water uptake by mycorrhizal roots of radiata pine seedlings[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1978, 5(3): 301–309.
2 Wegner L H. Root pressure and beyond: energetically uphill water transport into xylem vessels[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(2): 381–393.
3 Palzkill D A, Tibbitts T W. Evidence that root pressure flow is required for calcium transport to head leaves of cabbage[J]. Plant Physiology, 1977, 60(6): 854–856.
4 谭红朝, 李秧秧. 树干直径变化与其水分传输和贮存关系研究进展[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(6): 51–55.
Tan Hongchao, Li Yangyang. Advance in tree stem diameter changes and its relationship to water transport and water storage[J].

- Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(6): 51–55. (in Chinese)
- 5 李会, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 夏玉米茎流速率和茎直径变化规律及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 187–191.
Li Hui, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Change of sap flow rate and stem diameter microvariation of summer maize and influence factors [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 187–191. (in Chinese)
- 6 王力, 王艳萍. 黄土塬区苹果树干液流特征[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 152–158.
Wang Li, Wang Yanping. Characteristics of stem sap flow of apple trees in Loess Tableland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 152–158. (in Chinese)
- 7 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 718–724.
Zhao Chunyan, Si Jianhua, Feng Qi, et al. Xylem sap flow of *Populus euphratica* in relation to environmental factors in the Lower Reaches of Heihe River [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 718–724. (in Chinese)
- 8 孙振伟, 赵平, 牛俊峰, 等. 外来引种树种大叶相思和柠檬桉树干液流和蒸腾耗水的季节变异[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2588–2595.
Sun Zhenwei, Zhao Ping, Niu Junfeng, et al. Seasonal variations of sap flow and transpiration water consumption of introduced tree species *Acacia auriculaeformis* and *Eucalyptus citriodora* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2588–2595. (in Chinese)
- 9 刘鑫, 张金池, 汪春林, 等. 长三角地区典型树种杉木液流速率变化特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(2): 86–92.
Liu Xin, Zhang Jinchi, Wang Chunlin, et al. The variation characteristics of sap flow of Chinese fir in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2014, 38(2): 86–92. (in Chinese)
- 10 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条(*Caragana korshinskii*)树干液流动态及其影响因子[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1376–1381.
Xia Yongqiu, Shao Ming'an. The sap flow dynamics of *Caragana korshinskii* and the influence of environmental factors in semi-arid region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1376–1381. (in Chinese)
- 11 Oosterhuis D M, Wiebe H H. Water stress preconditioning and cotton root pressure-flux relationships [J]. Plant and Soil, 1986, 95(1): 69–76.
- 12 Steudle E. The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2001, 52(6): 847–875.
- 13 Tibbetts T J, Ewers F W. Root pressure and specific conductivity in temperate lianas: exotic *Celastrus orbiculatus* (Celastraceae) vs. native *Vitis riparia* (Vitaceae) [J]. American Journal of Botany, 2000, 87(9): 1272–1278.
- 14 Enns L C, Canny M J, McCully M E. An investigation of the role of solutes in the xylem sap and in the xylem parenchyma as the source of root pressure [J]. Protoplasma, 2000, 211(3–4): 183–197.
- 15 Fisher J B, Angeles G, Ewers F W, et al. Survey of root pressure in tropical vines and woody species [J]. International Journal of Plant Science, 1997, 158(1): 44–50.
- 16 李卫民, 张佳宝. 植物木质部导管栓塞[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(3): 581–584.
Li Weimin, Zhang Jiabao. Embolism in xylem vessel of plants [J]. Plant Physiology Communications, 2008, 44(3): 581–584. (in Chinese)
- 17 Clearwater M J, Blattmann P, Luo Z, et al. Control of scion vigour by kiwifruit rootstocks is correlated with spring root pressure phenology [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(7): 1741–1751.
- 18 Liu B B, Steudle E, Deng X P. Root pressure probe can be used to measure the hydraulic properties of whole root systems of corn (*Zea mays* L.) [J]. Botanical Studies, 2009, 50(3): 303–310.
- 19 Henzler T, Waterhouse R N, Smyth A J, et al. Diurnal variations in hydraulic conductivity and root pressure can be correlated with the expression of putative aquaporins in the roots of lotus japonicas [J]. Planta, 1999, 210(1): 50–60.
- 20 Steudle E, Murrmann M, Peterson C A. Transport of water and solutes across maize roots modified by puncturing the endodermis [J]. Plant Physiology, 1993, 103(2): 335–349.
- 21 员玉良, 盛文溢, 孙宇瑞. 基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 247–252.
Yun Yuliang, Sheng Wenyi, Sun Yurui. Method for observing stem water storage dynamics based on sap flow rate sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 247–252. (in Chinese)
- 22 Juhász Á, Seps P, Nagy Z, et al. Water consumption of sweet cherry trees estimated by sap flow measurement [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164(12): 41–49.
- 23 王晓森, 刘祖贵, 刘浩, 等. 番茄茎直径 MDS 的通径分析与数值模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 187–192.
Wang Xiaosen, Liu Zugui, Liu Hao, et al. Path analysis and numerical simulation of MDS of tomato stem diameter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 187–192. (in Chinese)
- 24 Steppe K, De Pauw D J W, Lemeur R, et al. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth [J]. Tree Physiology, 2005, 26(3): 257–273.
- 25 Swaef T D, Hanssens J, Cornelis S, et al. Non-destructive estimation of root pressure using sap flow, stem diameter measurements and mechanistic modelling [J]. Annals of Botany, 2012, 111(2): 271–282.
- 26 Steppe K, Cochard H, Lacomte A, et al. Could rapid diameter changes be facilitated by a variable hydraulic conductance [J]. Plant, Cell and Environment, 2012, 35(1): 150–157.
- 27 龙秋波, 贾绍凤. 茎流计发展及应用综述[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4): 18–23.
Long Qiubo, Jia Shaofeng. Review on the development and application of sap flow gauge [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(4): 18–23. (in Chinese)