doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.038

基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法*

员玉良[1,2]　盛文溢[1]　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)

摘要: 植物茎秆储水每天都会发生周期性变化。针对目前缺少对草本植物茎秆储水无损测量传感器的问题,提出了一种基于茎流传感器的草本植物茎秆储水动态观测方法。该方法以温室盆栽向日葵为试验对象,通过茎流传感器及电子秤的输出,得出向日葵茎秆储水状况及其内部充放水状态切换时间。向日葵茎秆直径动态变化的观测结果进一步验证了该方法的有效性。同时,该方法还可以采集向日葵所处环境下的微气象因子变化,试验结果表明微气象因子变化是引起茎秆储水动态变化主要因素。

关键词: 草本植物　茎秆储水　茎流传感器　观测

中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)05-0247-06

引言

众所周知,植物茎秆主要有两方面作用:茎秆作为根与叶水分的通道,用于传输水分及养分;由于木质部导管和存储组织之间存在着动态水分交换,茎秆又被用于存储水分[1-3]。因此,如何实现对茎秆储水动态变化跟踪具有现实意义。但草本植物的茎秆储水主要存于茎秆的韧皮和活的组织当中,而木本植物主要通过乔木的边材和木质部的导管进行储水[4-5]。

1990 年,Constantz 等采用时域反射法(TDR)实现了对松树茎秆储水变化的检测[6],之后,Holbrook[7]、Wullschleger[8]及 Hernández[9]等又先后采用 TDR 法对其他几种乔木茎秆储水进行了测量;国内,王海兰[10]、刘贺[11]等采用驻波原理法实现了对小麦茎秆水分和乔木茎体水分的测量。但是,以上方法均需将探针插入植物茎秆内部,这样势必会对植物体本身造成局部组织的伤害,特别是对于草本植物而言,极易造成其死亡。此外,在插入探针后需要等待几周,传感器才能输出正常信号[12]。因此,对于草本植物茎秆储水的测量仍是一个难点。为此,很多科学家曾尝试采用 γ 射线法、计算机轴向断层扫描法以及核磁共振法对茎秆储水进行检测,但这些方法均有明显缺点,例如 γ 射线法会对操作者健康构成威胁[13],核磁共振法设备昂贵、操作复杂,仅限于实验室应用。

近年来,许多种商用茎流传感器已经被广泛用于观测植物体的茎流变化[4,14-15],但市面上仍然还没有专门针对草本植物茎秆储水测量的商用传感器。而 Van leperen 等用电子秤测量盆栽植物的水分吸收和蒸腾,但他们提出的方法仅适用于水培植物[16]。基于以上情况,本文提出一种基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法,该方法仅需要一个茎流传感器和一台高精度的电子秤,通过严格的数学推导,实现对草本植物茎秆储水动态变化的无损测量。

1　试验

1.1　试验时间与地点

茎秆储水动态观测试验分为 2 个阶段(阶段 1:2011 年 6 月 3 日 ~6 月 8 日;阶段 2:2013 年 3 月 21 日 ~3 月 28 日),在北京市某温室(116°20′58″E,40°0′17″N)进行。试验对象均为盆栽向日葵,株高约 40 cm,茎秆直径 1.0 cm 左右,试验时向日葵样本处于生长末期。盆栽向日葵所用花盆容量为 8 L,盆中土壤的质地组成为沙粒(0.33 mg/mg)、粉粒(0.53 mg/mg)和粘粒(0.17 mg/mg),所不同的是第 2 阶段试验添加了对茎秆直径变化的测量。

1.2　试验方法

向日葵茎秆储水平衡状态可以表示为

$$\Delta W_{stem}(t) = \Delta W_{rt-ut}(t) - W_{lf-trs}(t) \qquad (1)$$

式中　ΔW_{stem}——茎秆储水变化量

收稿日期: 2013-06-27　修回日期: 2013-09-14

* 中德联合研究小组项目(GZ494)和中国农业大学研究生科研创新专项(2013YJ008)

作者简介: 员玉良,博士生,青岛农业大学讲师,主要从事草本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,信息解译与复杂农业对象建模研究,E-mail: pal@cau.edu.cn

ΔW_{rt-ut}——根吸水变化量

W_{lf-trs}——叶片蒸腾量

显然，$\Delta W_{stem}>0$，表示茎秆充水；$\Delta W_{stem}<0$，表示茎秆放水。

式(1)也可表示为

$$\frac{dW_{stem}}{dt}=\frac{dW_{rt-ut}}{dt}-\frac{dW_{lf-trs}}{dt}$$

即

$$\frac{dW_{stem}}{dt}=F_{stem}-E_T \tag{2}$$

式中 F_{stem}——茎流速率

E_T——叶片蒸腾速率

试验时用遮挡板尽量将盆遮住，如图 1 所示，则土壤水分蒸发可以忽略。此时，电子秤的变化值可以近似等于叶片水分蒸腾量，这样式(2)可进一步表示为

$$\frac{dW_{stem}}{dt}\approx F_{stem}-\frac{dW_{scale}}{dt} \tag{3}$$

W_{scale}为电子秤称量值。对式(3)两边同时积分可得

$$\int_{t_0}^{t}dW_{stem}\approx\int_{t_0}^{t}F_{stem}dt-\int_{t_0}^{t}dW_{scale} \tag{4}$$

因为

$$\Delta W_{stem}(t)=W_{stem}(t)-W_{stem}(t_0)=\int_{t_0}^{t}\frac{dW_{stem}}{dt}$$

结合式(4)得出

$$\Delta W_{stem}(t)\approx\int_{t_0}^{t}F_{stem}dt-\int_{t_0}^{t}dW_{scale} \tag{5}$$

式(5)可进一步整理得

$$W_{stem}(t)=W_{stem}(t_0)+\int_{t_0}^{t}F_{stem}dt-\int_{t_0}^{t}dW_{scale} \tag{6}$$

显然，只要获得 t_0时刻试验向日葵的茎秆储水量，即可得到任意时刻 t 向日葵的茎秆储水量。

为此，试验选取了 12 株同样处于生长末期但形态不同的向日葵，减掉根部、果实及叶片，分别测量其茎秆底部直径 d 及茎秆长度 l，并对其进行称量、干燥、再称量即可得到各自试验时的含水量 W。以茎秆含水量为因变量，以茎秆底部直径和茎秆长度为自变量，对其进行多元线性回归得到

$$W=-0.528l+16.882d-42.842$$
$$(R^2=0.945,p<0.01) \tag{7}$$

说明它们之间高度相关，因此，t_0时刻只要测量出试验向日葵的茎秆底部直径及茎秆长度即可得到试验向日葵的 $W_{stem}(t_0)$。

进而，通过式(6)可以得到任意时刻 t 向日葵的茎秆储水量。

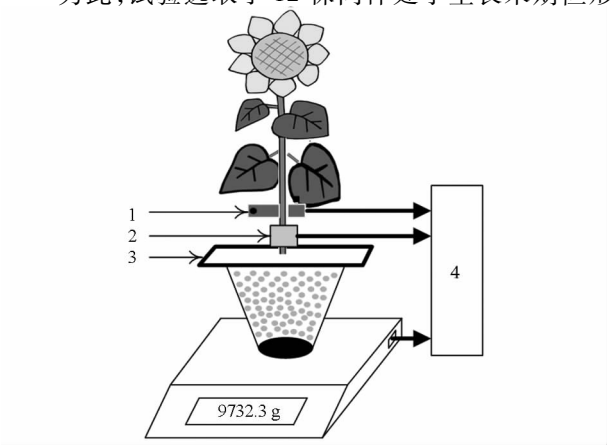


图 1 试验装置图

Fig. 1 Test equipment

1. 茎秆直径传感器 2. 茎流传感器 3. 遮挡板 4. 数据采集器

1.3 试验装置

基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法试验装置见图 1。所使用的传感器主要包括：美国 Dynamax 公司生产的基于热平衡原理的 SGB9 - WS 型植物茎流传感器、温度传感器(DS18B20 型，美国 Dallas 公司，量程：-55 ~ 125℃，精度：±0.5℃)、环境湿度传感器(PTS - 2A 型，量程：0 ~ 100% RH，精度：± 2%)、光量子传感器(AV - 19Q 型，美国 AVALON 公司，量程：0 ~ 3 000 μmol/(m²·s)，精度：±3%)以及用于第 2 阶段试验测量茎秆直径变化的中国上海极典电子有限公司生产的 GA09 系列 LVDT 传感器(量程：0 ~ 5 mm，精度：10 μm)。

数据采集器由核心芯片 MSP430 单片机、信号处理电路、时钟电路、存储电路以及串行通信接口 RS - 232 等组成。可以根据试验需要通过上位计算机软件对数据采集器进行数据采集时间及采集时间间隔设置，最小设置间隔为 1 min；也可对存储数据进行读取和删除，数据存储容量为 8 MB；数据采集器采用直流 +5 V 供电。

1.4 观测项目

(1)微气象因子：包括光合有效辐射 PAR (Photosynthetically active radiation)、空气温度和空气相对湿度，并由空气温度及相对湿度计算得出饱和水气压差 VPD (Vapor pressure deficit)[18]。

(2)蒸腾量：将整盆试验向日葵样本置于电子秤(0 ~ 30 kg，精度：1 g)上，该电子秤可以通过 RS - 232 串行口实时自动输出称量值。

(3)茎流及茎秆储水：将茎流传感器装于向日葵茎秆基部，离土壤表面约 10 cm 处。

(4)茎秆直径变化：第 2 阶段试验时，将茎秆直径传感器装于茎流传感器之上的向日葵茎秆上。

试验时所有传感器均接入数据采集器，自动采集传感器输出信号，采集间隔设为 30 min。

2　结果与分析

2.1　第 1 阶段试验结果

2.1.1　微气象因子

图 2a 显示的是连续 5 d 温室向日葵微气象因子的变化曲线。由图可知，6 月 4 日及 6 月 7 日天气阴，PAR 幅值较小，对应 VPD 幅值较小；而 6 月 3 日、6 月 5 日及 6 月 6 日为晴天，PAR 及 VPD 值相对较大。

2.1.2　蒸腾量

由于土表水分蒸发基本可以忽略，因此电子秤数值的变化即为向日葵叶片蒸腾量的变化，如图 2b 所示，显然曲线斜率的绝对值指示向日葵的蒸腾速率。从图中可以看出，除了 6 月 4 日与 7 日 3 次加水浇灌（图 2b 曲线上的 3 个跳跃点）外，电子秤的值是逐渐减小的，说明蒸腾一直在进行。但是，每天中午前后蒸腾作用最明显，曲线斜率绝对值最大，蒸腾速率最高；而进入夜间及凌晨前后，向日葵蒸腾作用基本停止，曲线近似于水平，斜率接近零。

另外，从图 2b 中还可以看出，向日葵每天叶片蒸腾量不尽相同，其中 6 月 4 日及 6 月 7 日为阴天，叶片蒸腾量较小，分别约为 320 g 和 290 g；而 6 月 3 日、6 月 5 日及 6 月 6 日天气晴朗，叶片蒸腾量分别达到 500 g、490 g 和 520 g 左右，说明蒸腾强度受天气状况影响较大，这与向日葵及其他植物的蒸腾作用规律完全吻合。

本试验中，由于土壤中的水分基本完全用于向日葵的蒸腾作用，所以图 2b 所显示的向日葵叶片蒸腾量变化实际上也反映了盆中土壤含水率的变化。

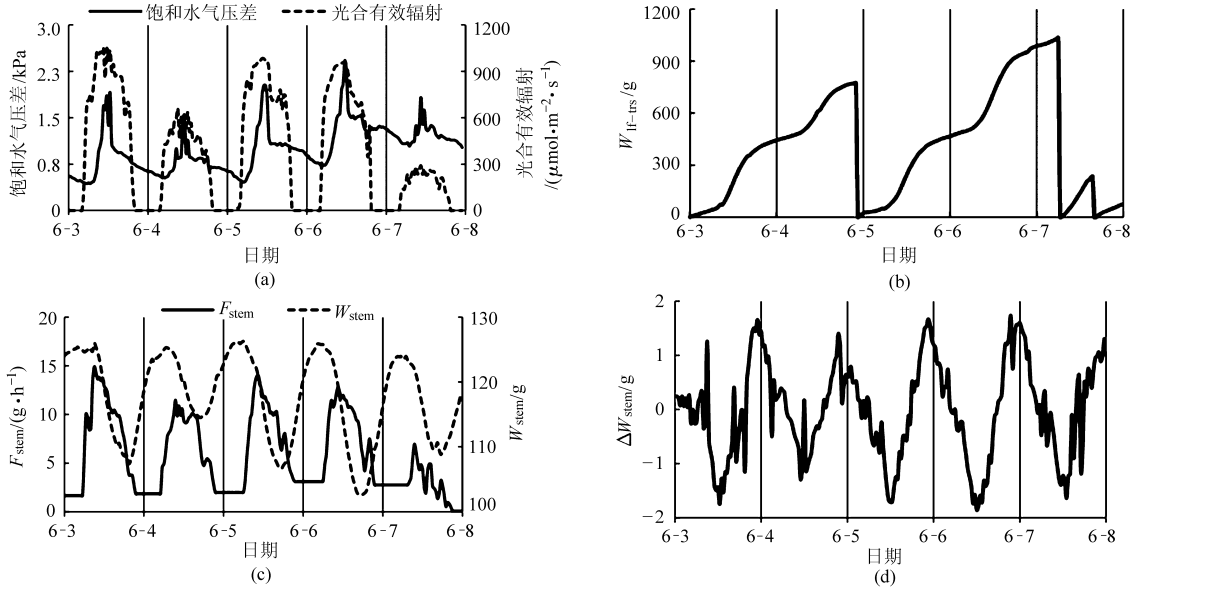


图 2　第 1 阶段试验向日葵相关参数变化曲线

Fig. 2　Curves of related parameters observed from the sunflower sample in the first experimental period

（a）微气象因子　（b）蒸腾量　（c）茎流及茎秆储水　（d）茎秆储水变化

2.1.3　微气象因子和茎流速率及茎秆储水变化

图 3 为 6 月 3 日、6 月 4 日连续两天的微气象因子变化和茎流及茎秆储水变化曲线。从图 3 中可以看出，每天 5:00 ~ 6:00，向日葵光合作用开始，茎流速率被激活，随着 PAR 和 VPD 的增加，茎流速率会迅速攀升，这说明蒸腾对微气象因子变化反应灵敏。在上午 9:00 ~ 10:30，由于太阳辐射的增强，净辐射增大，蒸腾作用加强，叶水势下降，细胞膨压降低，植株茎秆迅速收缩，茎秆储水量开始下降，而茎流速率达到峰值。这是由于向日葵茎秆储水组织中的水分会被释放给叶子以满足其蒸腾作用所需，在这种情况下，向日葵存储组织的水势（ψ_s）会比木质部的水势（ψ_x）大[3]；午后，随着 PAR 和 VPD 的减弱，蒸腾作用减弱，叶水势恢复，植株组织充水膨胀，茎流速率减小，茎秆储水持续释放，直到下午茎流速率达到最小值。之后在另一种潜在势能梯度（$\psi_x > \psi_s$）的作用下，茎秆内部存水会被重新得到补充，于是，茎秆储水量会逐渐增大，直到第 2 天凌晨达到最大值。很明显，晴天时，茎秆储水量变化幅度较大，茎流速率的峰值大于阴天的峰值。

类似的植物茎秆储水日变化规律可大量见诸基于乔木研究的文献上，如 Schepper 等通过 MRI 技术研究橡树的茎秆储水与茎秆直径变化的关系时，发现橡树的茎秆储水呈现同样的日变化规律[5]；Fernández 等[3] 和 Čermák 等[4] 分别以果树和冷杉树为研究对象也得到了相似的茎秆储水日变化曲线。而对于草本植物的茎秆储水状况研究相对较少，但从 Van leperen 等在以盆栽西红柿为试验对象，提出

一种同时测量其植物吸水量与蒸腾量方法的文章中,可以间接看出西红柿的茎秆储水日变化规律与蒸腾作用的关系[16],这与本文获得的温室向日葵茎秆储水日变化规律与蒸腾作用的关系十分接近。

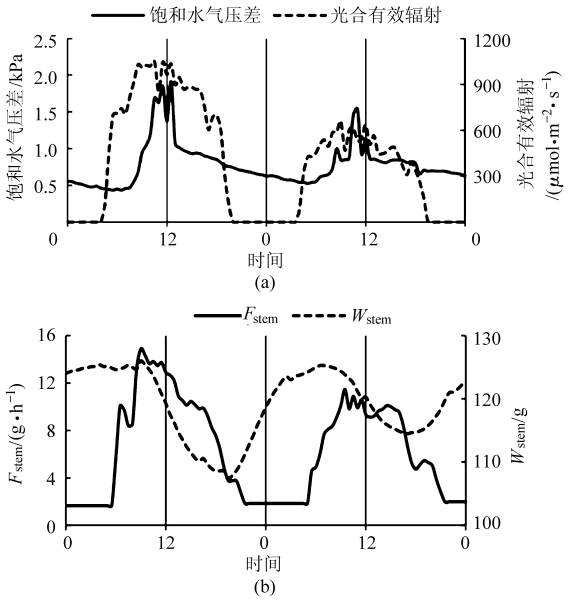


图 3 连续两天的微气象因子变化和茎流速率、茎秆储水变化

Fig. 3 Curves of microclimate variations, sap flows and stem water storage variations for consecutive days

(a) 微气象因子变化 (b) 茎流速率及茎秆储水变化

此外,由图 3b 可以得出茎秆充水和放水的切换时间。比如,整个试验周期内,茎秆充水和放水的切换时间大约在 5:30,而几乎在同一时间,茎流速率也被激活。相反地,茎秆水释放和补充的切换时间则发生在茎流速率达到最小值之前,大约在每天 17:00。许多针对乔木的研究已经揭示了早晨茎秆储水量与茎流速率之间在时间上存在着滞后,这一时间对个体小的乔木而言可能是几分钟,而个体大的乔木则可能长达数小时[20-21],后者主要归因于其较高的储水能力[22]。而在本文试验当中,并没有观察到早上向日葵茎秆储水量与茎流速率之间存在明显的时间滞后,这可能是由于向日葵本身有限的储水能力使得二者滞后时间较短,难以识别。

除此之外,从图 2b 中可以看出,阴天(6 月 4、7 日)时茎秆储水量的变化范围(10 g)明显小于晴天情况下的变化范围(20 g),这就说明,阴天条件下,由蒸腾引起的水分损失较晴天时要小。

综上所述,以茎秆储水量作为指示信号来观测向日葵茎秆储水的动态变化具有十分重要的意义。与之相对应的,茎秆储水量变化可以被用来确定被测对象充放水的切换时间以及其所处状态(充水还是放水及其水量大小,可依此来确定植物缺水状态)。更有利的是,茎秆储水量变化可直接由式(5)得到,而不必为了得到 $W_{stem}(t_0)$ 再去破坏其他的植物样本。

2.2 第 2 阶段试验结果

为了验证本方法对茎秆储水量的计算效果,在第 2 阶段试验中增加了向日葵茎秆直径变化的测量。图 4 为第 2 阶段试验向日葵所测参数的变化曲线。

从图中可以看出,第 2 阶段试验所测得的盆栽向日葵所处温室的 PAR、VPD、叶片蒸腾量、茎流速率、茎秆储水量及茎秆储水量变化等参数的日变化规律与第 1 阶段试验结果十分相似。每天伴随着

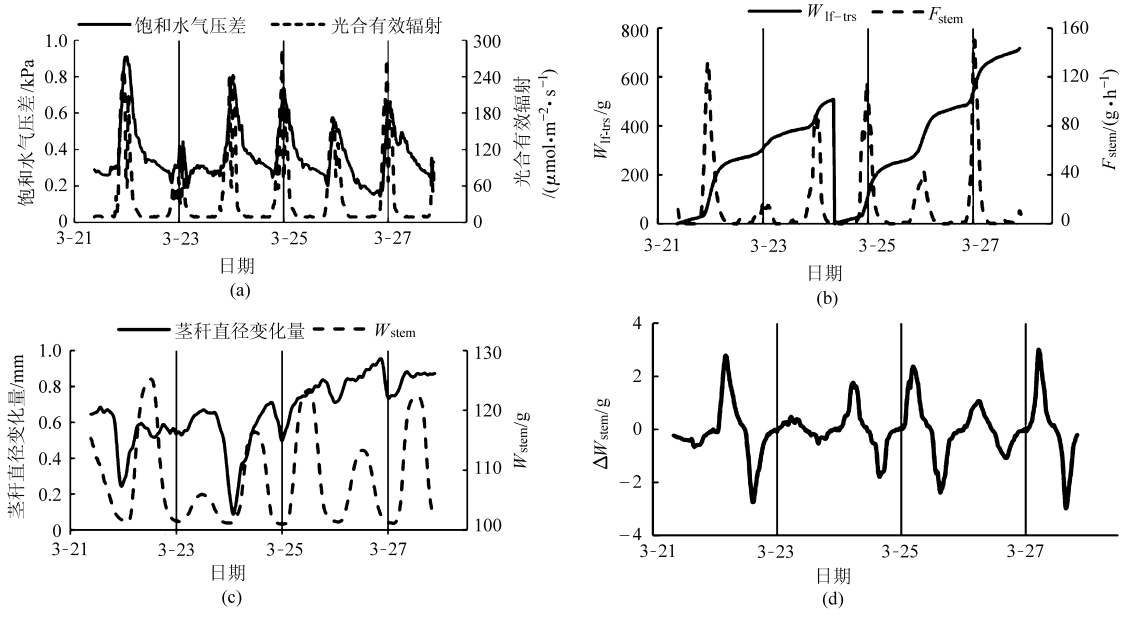


图 4 第 2 阶段试验向日葵相关参数变化曲线

Fig. 4 Curves of related parameters observed from the sunflower sample in the second experimental period

(a) 微气象因子 (b) 蒸腾量及茎流 (c) 茎秆直径变化及茎秆储水 (d) 茎秆储水变化

PAR 和 VPD 的增加，向日葵蒸腾作用强度加大，随之茎流速率和蒸腾速率增大。由图 4b 可以看出，中午前后向日葵茎流速率和蒸腾速率最大。

图 4c 为向日葵茎秆储水及茎秆直径变化曲线。可见，在不同天气条件下，茎秆储水量和茎秆直径变化量（l_{SDV}）呈现出同样的日变化规律。当早上太阳辐射增强时，向日葵蒸腾作用增强，茎秆储水量迅速减小，同时茎秆直径出现收缩（$dl_{SDV}/dt < 0$）。这说明向日葵根部吸水来不及供给用于蒸腾所需要的水分，导致向日葵释放体内储水以供应蒸腾耗水。这一过程一直持续到中午前后，之后，茎秆储水量逐渐增大，同时茎秆直径也恢复到之前水平（$dl_{SDV}/dt > 0$），这说明植物体内的水分得到了补充。向日葵的茎秆储水量变化幅度与天气密切相关，这与第 1 阶段试验结果一致。

3 月 24 日进行了一次浇灌，浇灌水量大约为 1 kg。显然，在浇水前，天气状况良好，蒸腾作用强烈，向日葵出现了一定的干旱胁迫，造成茎秆出现大幅收缩，显示向日葵缺水。浇水后茎秆储水得到了有效补充，茎秆直径变化基本稳定，并略有生长。茎秆直径变化与茎秆储水量变化的一致性也进一步肯定了本文所提出方法的有效性。

3　结论

（1）提出了一种基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法，该方法通过数学推导描述了测量原理，并在此基础上设计了试验方案。该方法仅需要结合茎流传感器和电子秤，即可实现对温室盆栽向日葵茎秆储水动态变化的跟踪，效果良好。因为茎流传感器的探针仅需贴在向日葵茎秆的表面，所以基本不会给植物体带来伤害，可以实现无损测量。

（2）茎秆储水动态观测试验在跟踪温室向日葵茎秆储水动态和茎流变化的同时，还可以监测向日葵所处温室内的微气象因子变化及向日葵茎秆直径的变化。结果表明微气象因子变化对向日葵茎秆储水动态变化有较大影响；茎秆直径与茎秆储水相同的日变化规律，进一步肯定了该方法的科学性；另外，也可以通过观测向日葵茎秆储水变化及茎秆直径变化情况来判断其缺水状态。

（3）尽管只研究了向日葵样本，但基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法同样适用于类似的盆栽草本植物。

参　考　文　献

1　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, 2006,26(3): 257 - 273.

2　Dzikiti S, Steppe K, Lemeur R, et al. Whole-tree level water balance and its implications on stomatal oscillations in orange trees [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] under natural climatic conditions[J]. Journal of Experimental Botany, 2007,58(7): 1893 - 1901.

3　Fernández J E, Cuevas M V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010,150(2): 135 - 151.

4　Čermák J, Kučera J, Bauerle W L, et al. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees[J]. Tree Physiology, 2007,27(2): 181 - 198.

5　De Schepper V, Van Dusschoten D, Copini P, et al. MRI links stem water content to stem diameter variations in transpiring trees [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(7): 2645 - 2653.

6　Constantz J, Murphy F. Monitoring moisture storage in trees using time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1990, 119 (1 - 4):31 - 42.

7　Holbrook N M, Burns M J, Sinclair T R, et al. Frequency and time-domain dielectric measurements of stem water contents in the arborescent palm, Sabal palmetto[J]. Journal of Experimental Botany, 1992, 43(1): 111 - 119.

8　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.

9　Hernández-Santana V, Martínez-Fernández J, Morán C, et al. Response of *Quercus pyrenaica* (melojo oak) to soil water deficit: a case study in Spain[J]. European Journal of Forest Research, 2008,127(5):369 - 378.

10　王海兰，白陈祥，赵燕东. 乔木茎体水分传感器探针结构试验[J]. 农业机械学报，2009,40(1):175 - 179.
Wang Hailan, Bai Chenxiang, Zhao Yandong. Experiment on the probe configuration of stem water content measuring sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1): 175 - 179. (in Chinese)

11　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)

12　Lu P, Woo K, Liu Z. Estimation of whole-plant transpirations of bananas using sap flow measurements [J]. Journal of Experimental Botany, 2002,53(375):1771 - 1779.

13　Irvine J, Grace J. Non-destructive measurement of stem water content by time domain reflectometry using short probes[J]. Journal of Experimental Botany,1997,48(308):813 - 818.

14 Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice [J]. Acta Botanica Sinica, 2004,46(6): 631 – 646.

15 Trcala M, Čermák J. Improvement of the trunk heat balance method including measurement of zero and reverse sap flows[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012,166 – 167(12): 120 – 126.

16 Van leperen W, Madery H. A new method to measure plant water uptake and transpiration simultaneously[J]. Journal of Experimental Botany ,1994,45(270):51 – 60.

17 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)

18 张寄阳,孟兆江,段爱旺,等. 茎直径变化诊断棉花水分亏缺程度的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2005,24(2):35 – 38.
Zhang J Y, Meng Z Y, Duan A W, et al. Experimental study on water deficit diagnostic for cottons using stem diameter variations [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005,24(2):35 – 38. (in Chinese)

19 Schulze E D, Čermák J, Matyssek M, et al. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees-a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements[J]. Oecologia,1985,66(4):475 – 483.

20 Goldstein G, Andrade J L, Meinzer F C, et al. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees [J]. Plant Cell Environ, 1998, 21(4): 397 – 406.

21 Steppe K, Lemeur R. An experimental system for analysis of the dynamic sap-flow characteristics in young trees: results of a beech tree [J]. Functional Plant Biology, 2004,31(1):83 – 92.

Method for Observing Stem Water Storage Dynamics Based on a Sap Flow Rate Sensor

Yun Yuliang[1,2] Sheng Wenyi[1] Sun Yurui[1]

(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*)

Abstract: Stem water storage varies with a daily cycle. However, none of sensor techniques can meet the noninvasive measurement of herbaceous plant stem water storage. A method of using a sap flow rate sensor to observe stem water storage dynamics for herbaceous plants was proposed. The preliminary experiment was conducted with a potted sunflower. The sunflower stem internal water recharging/discharging and its switching-time could be obtained by the outputs of a sap flow sensor and an electronic scale. The observation of sunflower stem diameter variations further validated the effectiveness of the method. At the same time, the micro-meteorological factors could be collected and the results showed that the micro-meteorological factors had a great impact on stem water storage dynamic changes. Compared with other methods, the measurement system is simple, easy to operate and non-destructive. Even though only sunflower samples were investigated, the method can be also applied to other herbaceous plants.

Key words: Herbaceous plant Stem water storage Sap flow rate sensor Observe