

# 滴灌条件下芹菜叶片膨压变化特征及其影响因素研究

许全悦<sup>1</sup>, 郑利剑<sup>1</sup>, 孙西欢<sup>1\*</sup>, 李晓坚<sup>2</sup>, 马娟娟<sup>1</sup>, 郭向红<sup>1</sup>, 郭勇<sup>1</sup>

(1.太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2.山西省水利发展中心, 太原 030024)

**摘要:**【目的】探明滴灌芹菜的叶片膨压变化特征及其影响因素。【方法】采用叶片膨压探针在线监测充分灌溉(FI)和非充分灌溉(NI)下的滴灌芹菜叶片膨压变化参数( $P_p$ 、 $P_p^*$ ),同步记录相关温室环境因子与植物典型水分生理指标,分析膨压变化参数( $P_p$ 、 $P_p^*$ )在不同灌水条件下的变化特征,并利用多元回归、通径分析和时间错位法探讨叶片膨压变化对各影响因素的响应。【结果】①不同处理及不同生育期的典型晴日下,芹菜叶片 $P_p^*$ 均呈昼高夜低的单峰型日变化趋势,但NI处理的 $P_p^*$ 启动时间较FI处理提前,且其峰值较FI处理高39.3%~66.7%。②不同灌水处理下, $P_p^*$ 与气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $Tr$ )的日变化趋势相同,且呈正相关; $P_p^*$ 与叶水势( $\Psi$ )负相关。③灌溉能显著影响芹菜叶片膨压变化,不同处理灌水前 $P_p$ 峰值和谷值逐渐上升,灌水后二者迅速下降,但NI处理下的 $P_p$ 变化幅度更剧烈。④典型晴日不同处理下,芹菜叶片 $P_p^*$ 与大气温度( $TA$ )、饱和水汽压差( $VPD$ )显著正相关,与相对湿度( $RH$ )、风速( $WS$ )显著负相关。通径分析显示, $TA$ 对 $P_p^*$ 的直接影响最显著, $VPD$ 对 $P_p^*$ 的间接影响最显著。而逐步回归结果表明, $WS$ 对 $P_p^*$ 的影响只在NI处理下显著。各生育期 $P_p^*$ 与 $TA$ 间均存在时滞效应,但NI处理下二者的时滞时间较FI处理增长了10~30 min,形成的时滞面积增大4%~9.5%。【结论】综上,芹菜叶片膨压变化特征与灌溉条件、气象因子密切相关,水分供应不足时膨压变化参数的峰值增大,与温度的时滞效应增强。

**关键词:** 芹菜; 膨压探针; 气孔导度; 叶水势; 气象因子

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022200

OSID:



许全悦, 郑利剑, 孙西欢, 等. 滴灌条件下芹菜叶片膨压变化特征及其影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 27-35.  
XU Quanyue, ZHENG Lijian, SUN Xihuan, et al. Change in Turgor Pressure in Celery Leaf under Drip Irrigation and Its Determinants[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 27-35.

## 0 引言

【研究意义】芹菜富含蛋白质、维生素、膳食纤维等多种营养物质,具有极高的食用价值和药用价值<sup>[1]</sup>。然而芹菜耗水量较高且各生育期用水需求不同,水分制约着其生长及产量的提升<sup>[2]</sup>,因此明确芹菜的水分状况是促进其高效灌溉管理的首要条件。但目前能在线连续且精准衡量芹菜水分状况的指标较少,因而探寻准确反馈芹菜水分状况的新指标具有重要意义。【研究进展】传统表征芹菜水分状况的生理指标主要有气孔导度( $G_s$ )、叶水势( $\Psi$ )等<sup>[3-4]</sup>,但由于测定技术限制,这些指标在测定过程中存在破坏植株且不能连续监测等问题<sup>[5]</sup>。叶片膨压是叶片细胞内原生质体对细胞壁形成的压力,其变化较 $G_s$ 、 $\Psi$ 等更能敏感反映植物的水分状况<sup>[6-7]</sup>。植物水分状况良好时叶片膨压值较高,经历水分亏

缺后叶片膨压值降低<sup>[8]</sup>。叶片膨压探针(LPCP)技术能够实现在线连续无损监测植物的叶片膨压变化,其输出结果为膨压变化参数 $P_p$ , $P_p$ 与叶片膨压成反比关系, $P_p$ 值大时叶片膨压低<sup>[9]</sup>。叶片膨压的变化特征与气孔及水势的变化有关<sup>[10]</sup>。Zait等<sup>[11]</sup>对香蕉树的监测显示气孔孔径的振荡会引起 $P_p$ 曲线的振荡。Bramley等<sup>[5]</sup>对冬小麦的叶片膨压及叶水势的同步监测结果显示,水势减小时 $P_p$ 值增大。同时研究显示气象因子的变化会引起植物体水分状态的改变,进而导致叶片膨压的变化<sup>[12]</sup>。Rüger等<sup>[13]</sup>对多种林木的膨压监测结果表明,高温晴日时叶片 $P_p$ 增幅显著,温度降低时 $P_p$ 变化幅度降低。Bader等<sup>[14]</sup>发现 $VPD$ 与归一化的班克木叶片 $P_p$ 值间存在线性变化关系。且相关学者发现 $P_p$ 与气象因子间存在变化不同步现象,但对于产生这种现象的原因目前存在争议<sup>[5, 15]</sup>。此外,不同类型植物的叶片膨压变化特征存在一定差异<sup>[16-17]</sup>。综上,叶片膨压有作为芹菜水分状况监测新指标的潜力,但其变化过程与气孔、水势等典型植物水分生理指标有关,且受到气象因子的影响。【切入点】已有研究中将叶片膨压作为芹菜水分状况监测指标的研究较少,对不同灌水条件下芹菜各

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109061, 52079085); 山西省水利发展中心项目(SF-NS-F21001)

作者简介: 许全悦(1998-),女,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 1072579612@qq.com

通信作者: 孙西欢(1960-),男,教授,主要从事节水灌溉与土壤水动力学研究。E-mail: sunxihuan@tyut.edu.cn

生育期叶片膨压的变化特征尚不明确,且未分析设施芹菜叶片膨压的影响因素。【拟解决的关键问题】本研究利用 LPCP 技术对滴灌芹菜叶片膨压进行连续监测,探究不同灌水条件下各生育期芹菜叶片膨压的日变化特征及其差异性,分析叶片膨压与植物水分生理指标间的协同变化,明确叶片膨压对气象因子的响应程度,为滴灌设施芹菜的水分状况诊断及精准灌溉提供决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2021 年 11 月—2022 年 1 月在山西省太原市小店区刘家堡西红柿产业园 (112°49'E, 37°65'N, 海拔 766 m) 的温室大棚中开展。试验地位于太原市区东南部,属暖温带大陆性气候,降雨集中在夏季,多年平均降水量达 495 mm。全年无霜期 202 d,年平均气温为 9.6 °C,年平均日照时间为 2 675.8 h。试验区 0~60 cm 土壤质地主要为砂壤土,土壤平均体积质量为 1.45 g/cm<sup>3</sup>,田间体积持水率为 39%。试验期间大棚需进行盖帘保温,每日揭帘时间为 08:00,盖帘时间为 18:00。

表 1 不同灌水条件下芹菜各生育期灌水安排

Table 1 Irrigation arrangement of celery at each growing period under different irrigation conditions

处理	外叶生长期		立心期		心叶生长期	
	灌水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>2</sup> )	灌水次数	灌水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>2</sup> )	灌水次数	灌水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>2</sup> )	灌水次数
NI	90	2	170	1	410	2
FI	150		280		510	

灌水量计算式为:

$$W=(0.9\theta_f-\theta_v)\times S\times Z_r\times 0.6, \quad (1)$$

式中:  $\theta_f$  为田间持水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_v$  为灌水前的土壤含水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $S$  为各个处理的灌水面积;  $Z_r$  为计划湿润层深度 (cm),依据芹菜根系分布情况,计划湿润层深度取 20 cm; 0.6 为湿润比。

### 1.3 测定指标与方法

于 2021 年 11 月 15 日—2022 年 1 月 20 日,测定芹菜叶片膨压变化参数 ( $P_p$ , kPa)、叶水势 ( $\Psi$ , MPa) 以及气孔导度 ( $G_s$ , mmol/(m<sup>2</sup>·s))、蒸腾速率 ( $Tr$ , mmol/(m<sup>2</sup>·s)),同时监测大棚内的土壤含水率以及气象因子。

#### 1.3.1 叶片膨压变化参数

本试验采用叶片膨压探针 (LPCP) 技术进行膨压变化参数 ( $P_p$ ) 的测定,  $P_p$  与叶片膨压变化成反比,  $P_p$  值大表示叶片膨压小。探针具体形态及原理见文献[18]。参照 Bader 等<sup>[14]</sup>及郑利剑等<sup>[17]</sup>的膨压探针安装方法,本试验各处理分别选取 3 株大小高度且叶龄一致的芹菜,将膨压探针安装于植株东面中部偏上大小一致且非遮荫的展开叶上,安装时间为

### 1.2 试验设计

本试验的供试作物为“法国皇后”西芹,小区长 9.0 m,宽 5.0 m,栽种行株距为 20 cm。根据试验地大棚滴灌布设策略,本试验采用地面滴灌方式进行灌水,1 行 1 带方式布置滴灌带,间距与株距一致。滴灌带为内镶式贴片设计,工作压力为 1.0~2.0 MPa,额定流量为 1.38 L/h,滴头间距 30 cm。试验过程中的施肥及病虫害防治遵循当地常规处理。2021 年 11 月 1 日芹菜苗移栽时灌以定植水 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,11 月 18 日灌以缓苗水 360 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,之后进行不同灌水处理。

本试验将芹菜全生育期划分为外叶生长期 (2021 年 11 月 19 日—12 月 10 日)、立心期 (2021 年 12 月 11—31 日) 以及心叶生长期 (2022 年 1 月 1—19 日)。根据课题组前期对滴灌芹菜灌溉制度的研究成果<sup>[4]</sup>,试验设置充分灌溉 (FI) 和非充分灌溉 (NI) 2 个处理。FI 处理: 灌水上下限为 70% $\theta_f$ ~90% $\theta_f$  ( $\theta_f$  为田间持水率)。NI 处理: 外叶生长期和立心期的灌水量为 FI 的 60%,心叶生长期的灌水量为 FI 的 80%。每隔 7 d 测定 1 次土壤含水率判断是否需要灌溉。不同灌水条件下芹菜各生育期具体灌水量见表 1。

清晨或者傍晚。每 5 min 记录 1 次数据。探针安装前需将叶片表面擦拭干净,探针安装好后由自制支撑装置保持叶片的位置不变,避免因扰动影响探针的测量结果。张威贤<sup>[4]</sup>关于芹菜叶水势的研究显示,外叶生长期以外叶水势测定为主,立心期、心叶生长期以心叶水势测定为主,故在外叶生长期固定监测外叶,立新期更换为心叶。

#### 1.3.2 叶水势

采用 WP4C 露点水势仪在各生育期典型晴日进行叶水势测量,测量时间为 06:00—18:00,时间间隔为 2 h。测量时选取与探针夹持叶的大小及安装位置一致的 3 片展开叶。

#### 1.3.3 气孔导度和蒸腾速率

采用 LI-6400XT 便携式光合测定仪在芹菜各生育期选择典型晴日进行气孔导度及蒸腾速率的测量,测量时间为 08:00—18:00,每 2 h 测量 1 次。测量叶片选择与探针夹持叶的大小及安装位置一致的 3 片展开叶。

#### 1.3.4 土壤含水率

本试验含水率测管位于 2 条滴灌带中间,距滴

灌带 10 cm。利用 TDR 每隔 7 d 对 10、20、30、40 cm 土层深度的土壤水分状况进行测定，并在灌前灌后加测，全生育期土壤含水率变化如图 1 所示。

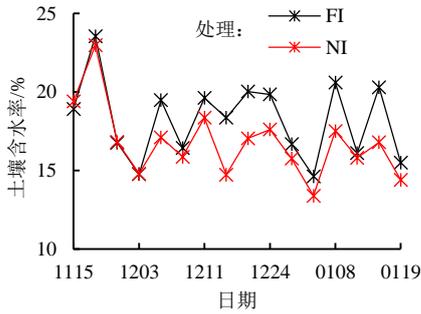


图 1 不同灌水条件下芹菜全生育期土壤含水率

Fig.1 Soil moisture content of celery during the whole growth period under different irrigation conditions

### 1.3.5 气象因子

利用大棚内的全自动气象站进行气象因子监测，监测指标包括大气温度 ( $TA$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )、相对湿度 ( $RH$ )、风速 ( $WS$ ,  $\text{m/s}$ ) 等。每 1 min 采集 1 次数据。饱和水汽压亏缺<sup>[19]</sup> ( $VPD$ ,  $\text{kPa}$ ) 计算式为：

$$VPD=0.611 \times \exp\left(\frac{17.502 \times TA}{TA+240.97}\right) \times (1-RH), \quad (2)$$

### 1.3.6 数据处理

本文参考 Lee 等<sup>[20]</sup>的方法将采集的叶片膨压变化参数 ( $Pp$ ) 数据进行标准化处理，得到了新的膨压变化参数  $Pp^*$  ( $Pp^*$ =日实测  $Pp$ -日最小  $Pp$ ,  $Pp^*$ 与叶片膨压成反比,  $Pp^*$ 高时膨压低)，进一步分析叶片膨压的单日变化特征。

采用时间错位对比法探究芹菜叶片  $Pp^*$ 与不同环境因子间的时滞时间，将  $TA$  逐次向前（提前）或

向后（滞后）10 min 错位移动，并进行相关性分析，得到相关系数最大的时间差为  $TA$  与  $Pp^*$ 的时滞时间。

利用 Microsoft Excel 进行数据初步分析及作图，采用 Origin 进行曲线拟合，并通过 SPSS 进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水条件下芹菜叶片 $Pp^*$ 的日变化特征

选取各生育期典型晴日数据对芹菜叶片膨压日变化进行分析，图 2 为芹菜外叶生长期（2021 年 12 月 1 日）、立心期（2021 年 12 月 14 日）、心叶生长期（2022 年 1 月 15 日）的  $Pp^*$ 日变化图。为方便单日膨压变化比较，引入新的膨压变化参数  $Pp^*$ ,  $Pp^*$ 与叶片膨压的变化趋势相反,  $Pp^*$ 高则叶片膨压低, 反之亦然。由图 2 可知，各生育期滴灌芹菜  $Pp^*$ 的整体日变化趋势一致，均呈昼高夜低的“几”字型曲线。根据  $Pp^*$ 在不同时段的日变化特征，将其按以下 4 个阶段进行区分：①谷值波动阶段（前期 00:00—8:00，后期 17:00—24:00）分为前期和后期 2 个时间段,  $Pp^*$ 总体维持谷值状态波动，存在小幅度的上升和下降变化，此阶段叶片膨压处于最大值。②快速上升阶段（08:00—11:00） $Pp^*$ 值开始启动而后迅速增大，表明芹菜由于叶片水分消耗使得叶片膨压逐渐降低。③峰值波动阶段（11:00—14:00） $Pp^*$ 达到其峰值且保持峰值水平持续波动，此阶段叶片膨压达到最小值。④快速下降阶段（14:00—17:00） $Pp^*$ 值逐渐下降，表明芹菜水分状态的恢复使得叶片膨压逐渐升高。

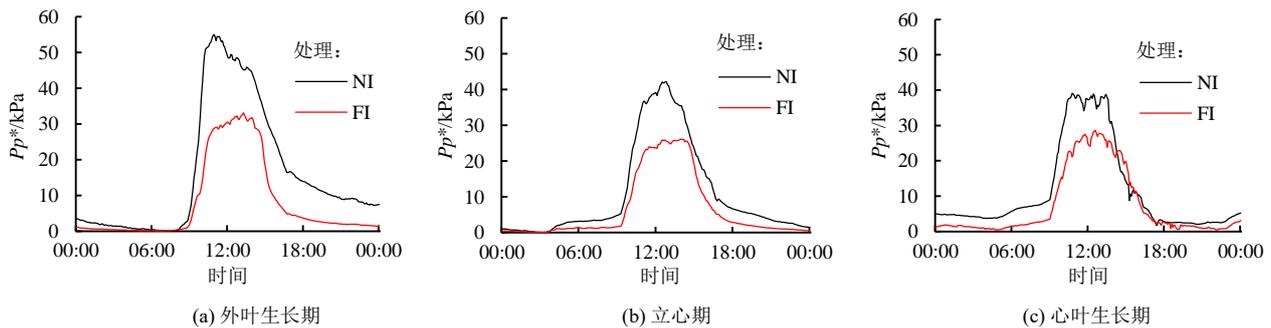


图 2 典型晴日不同灌溉条件下芹菜各生育期  $Pp^*$ 日变化

Fig.2 Diurnal variation of celery  $Pp^*$  in each growing period under different irrigation conditions on typical sunny days

由图 2 还可知，芹菜  $Pp^*$ 的日变化在不同灌水条件下存在显著差异。整体表现为各生育期 NI 处理的  $Pp^*$ 启动时间均提前于 FI 处理，且 NI 处理达到的  $Pp^*$ 峰值较 FI 处理高 11~22 kPa，但其在峰值的波动时间总是较 FI 处理短。以外叶生长期的芹菜  $Pp^*$ 日变化为例，NI 处理的  $Pp^*$ 启动时间为 08:15，较 FI 处理提前约 40 min。NI 处理到达  $Pp^*$ 峰值为 55 kPa，较 FI 处理高约 22 kPa。而后 NI 处理在  $Pp^*$ 峰值水平

波动 130 min，较 FI 处理短 55 min。17:00 后 FI 处理的  $Pp^*$ 值能回落到前期（00:00—8:00）的谷值水平，但 NI 处理的  $Pp^*$ 值仍处于较高值，表明该时期 NI 处理下的叶片膨压未上升到原来的最大值，芹菜出现膨压损失。

### 2.2 不同灌水条件下芹菜叶片 $Pp^*$ 与植物典型水分生理指标的协同变化

以立心期典型晴日（2021 年 12 月 28 日）的

$Pp^*$ 与气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $Tr$ )、叶水势 ( $\Psi$ ) 的日变化为例进行分析。由图 3 可知,不同灌水条件下  $G_s$ 、 $Tr$  与芹菜  $Pp^*$  的日变化趋势一致,均呈先增加后减小的单峰型曲线,而叶水势 ( $\Psi$ ) 与  $Pp^*$  的日变化趋势相反,呈先减小再增加的倒“V”型日变化曲线。具体表现为:06:00—12:00 内,气孔打开  $G_s$  增大,叶片  $Tr$  上升而  $\Psi$  下降,此时  $Pp^*$  处于上升阶段。12:00 左右  $G_s$  与  $Tr$  达到最大值,  $\Psi$  达到最小值,此时  $Pp^*$  处于峰值波动阶段。12:00—18:00,气孔开始闭合,  $G_s$  和  $Tr$  逐渐减小,而  $\Psi$  逐渐增加,

$Pp^*$  处于下降阶段。与 FI 处理相比, NI 处理的  $G_s$ 、 $Tr$  的日最大值降低了 11.1%、8.9%,  $\Psi$  的日最小值降低了 8.1%,但  $Pp^*$  的峰值增大了 85.3%。这表明灌水减少后,  $G_s$ 、 $Tr$ 、 $\Psi$  以及叶片膨压值均存在一定程度的下降,但叶片膨压的下降幅度更大。此外,对全生育期对应时段的  $G_s$ 、 $Tr$ 、 $\Psi$  与叶片  $Pp^*$  值进行相关分析,结果如图 4 所示。图中  $R$  表示相关系数; \*\*表示在 0.01 级别,相关性显著; \*表示在 0.05 级别,相关性显著。由图 4 可知,不同灌水处理下,芹菜  $G_s$ 、 $Tr$  与  $Pp^*$  正相关,  $\Psi$  与  $Pp^*$  负相关。

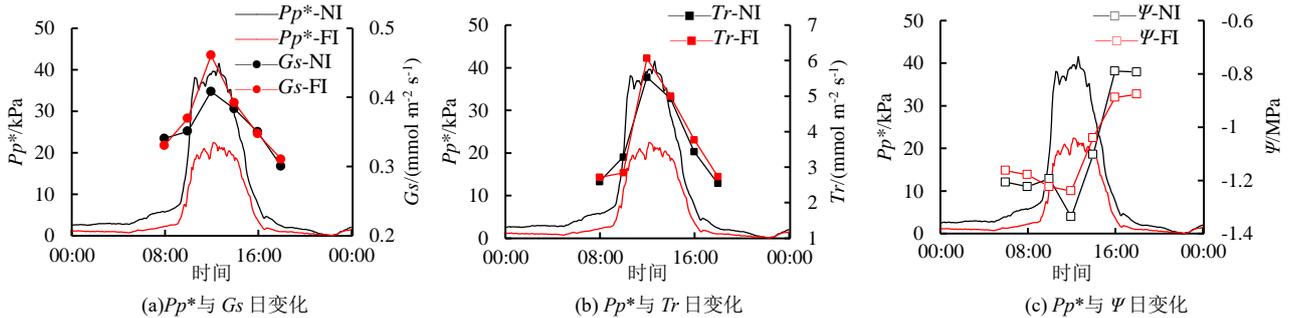


图 3 不同灌水条件下立心期典型晴日芹菜  $Pp^*$  与  $G_s$ 、 $Tr$ 、 $\Psi$  的日变化

Fig.3 Diurnal variation of celery  $Pp^*$  and  $G_s$ ,  $Tr$ ,  $\Psi$  on sunny days at the heart-standing period under different irrigation conditions

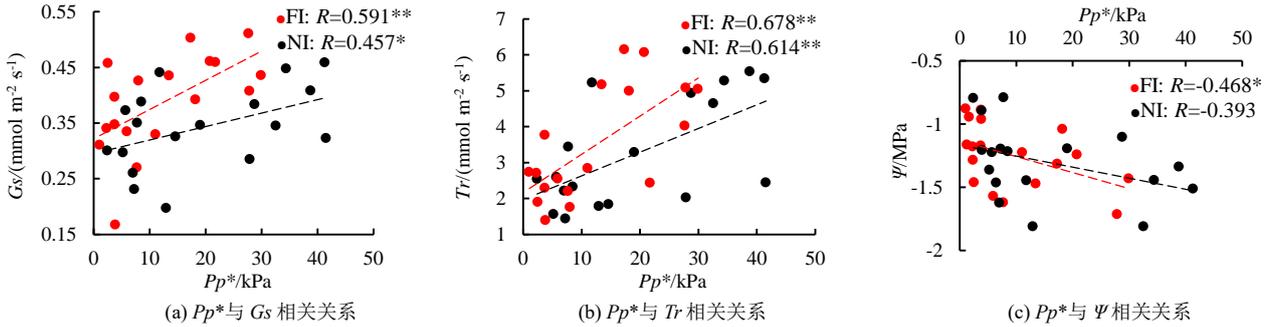


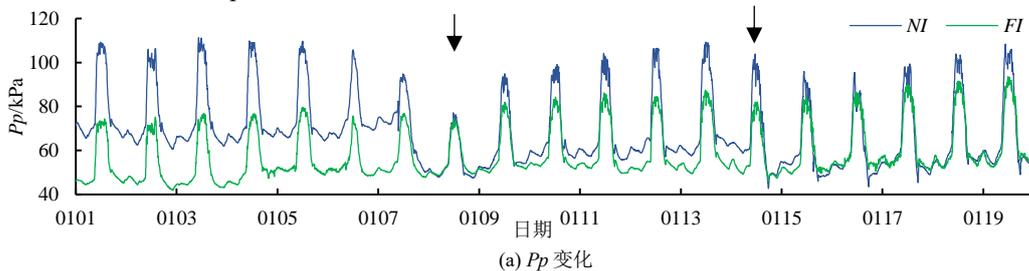
图 4 不同灌水条件下全生育期芹菜  $Pp^*$  与  $G_s$ 、 $Tr$ 、 $\Psi$  的相关关系

Fig.4 Correlation between celery  $Pp^*$  and  $G_s$ ,  $Tr$ ,  $\Psi$  in whole growth period under different irrigation conditions

### 2.3 灌溉对滴灌芹菜叶片 $Pp$ 变化特征的影响

心叶生长期是芹菜生长的关键时期,该时期芹菜耗水量大,水分需求高<sup>[4]</sup>。故本文以滴灌芹菜心叶生长期的  $Pp$  变化曲线(图 5,图中黑色箭头表示灌水)为例,探究其在不同灌水条件下灌前灌后的膨压变化差异。由图 5 (a)可知,不同灌水条件下的  $Pp$  变化趋势相似,均呈连续的单峰型曲线。总体而言,灌水前  $Pp$  的夜间谷值及日间峰值随土壤水分的消耗逐渐升高;灌水后植株得到水分补充,  $Pp$  的峰值谷值显著下降。但不同灌水条件下的  $Pp$  变化仍存在一定差异。NI 处理的  $Pp$  曲线整体上较 FI 处理

高, NI 处理的平均  $Pp$  峰值为 102 kPa,较 FI 处理高 20 kPa;且 NI 处理的平均  $Pp$  谷值为 54 kPa,较 FI 处理高 6 kPa。同时 NI 处理灌前灌后的  $Pp$  曲线变化幅度较 FI 处理更大。1 月 8—14 日的灌水间隔期内, NI 处理的  $Pp$  峰值升高 32 kPa,谷值升高 10 kPa;但 FI 处理的  $Pp$  峰值和谷值仅分别升高 13、1 kPa。这是因为 NI 处理一直处于水分亏缺状态,芹菜叶片出现膨压损失但得不到充分恢复,故该处理的  $Pp$  值一直较 FI 处理高。同时 NI 处理下芹菜水分状态不稳定,导致其对土壤水分的变化更敏感,因而灌前灌后的升高和下降幅度更大。



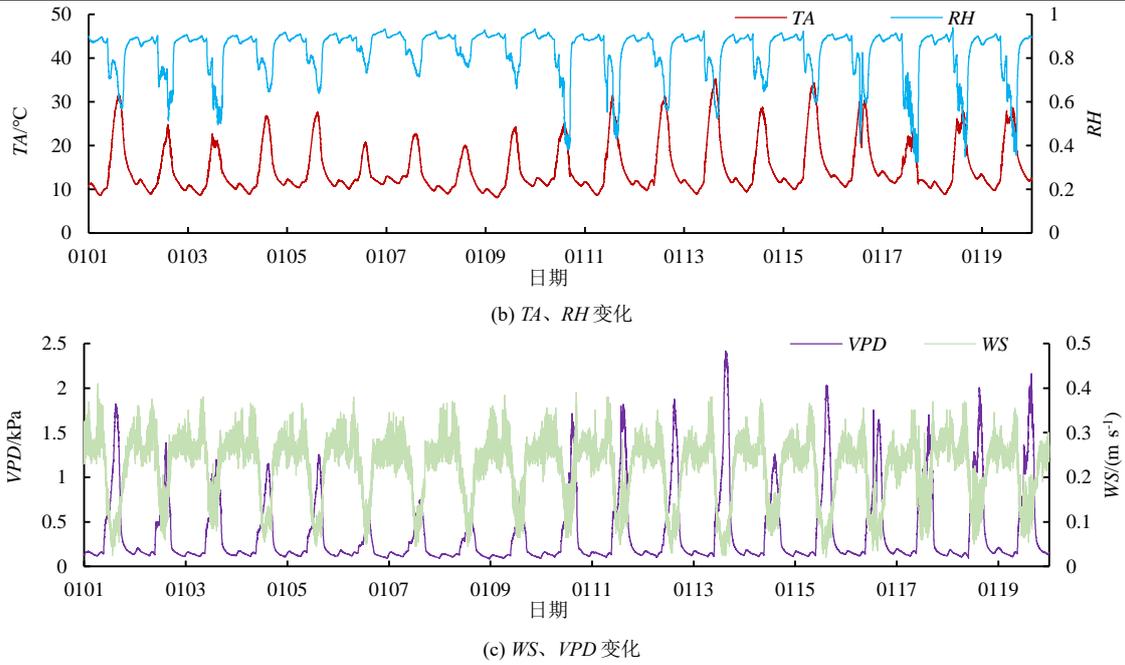


图 5 心叶生长期不同灌水条件下芹菜  $P_p$  及气象因子变化

Fig.5 Variation in celery  $P_p$  and meteorological factors under different irrigation conditions during the heart-leaf growth period

2.4 不同灌水条件下芹菜叶片  $P_p^*$ 对气象因子的响应

由图 5 可知，芹菜的叶片膨压变化也会受气象因子的影响。大气温度 ( $TA$ )、饱和水汽压差 ( $VPD$ ) 升高而相对湿度 ( $RH$ ) 和风速 ( $WS$ ) 降低时，叶片膨压降低；反之  $TA$ 、 $VPD$  降低而  $RH$ 、 $WS$  升高时，叶片膨压升高。且  $TA$ 、 $VPD$  的峰值相对较高时，叶片膨压损失值增大。

在此基础上，从芹菜各个生育期分别选择 3 d 典型晴日一共 9 d 的膨压及气象数据进行相关性分析。

图 6 为  $P_p^*$ 与各气象因子的相关性热图，图中圆形面积越大和颜色越深表示相关性越强，红色表示正相关，蓝色表示负相关。从图 6 可知，NI 处理、FI 处理下  $P_p^*$ 与相对湿度 ( $RH$ )、风速 ( $WS$ )、大气温度 ( $TA$ )、饱和水汽压差 ( $VPD$ ) 均存在极显著相关性。其中， $P_p^*$ 与  $TA$ 、 $VPD$  极显著正相关，与  $RH$ 、 $WS$  极显著负相关。相关性程度大小为： $TA > WS > VPD > RH$ ，故  $P_p^*$ 与  $TA$  的相关性最强。

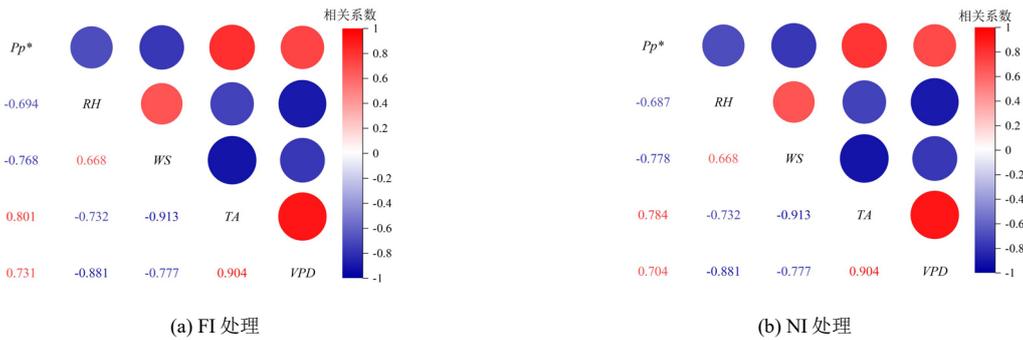


图 6 不同灌水条件下全生育期芹菜  $P_p^*$ 与气象因子的相关性热图

Fig.6 Correlation between celery  $P_p^*$  and meteorological factors at whole growing period under different irrigation conditions

分别将不同灌水条件下的  $P_p^*$ 值与  $RH$ 、 $WS$ 、 $TA$ 、 $VPD$  进行逐步多元回归分析，得到以下回归方程：

NI 处理：

$$P_p^* = 55.464 + 1.698TA - 65.121RH - 17.157VPD - 39.375WS, R^2 = 0.690;$$

FI 处理：

$$P_p^* = 23.363 + 1.356TA - 39.402RH - 10.147VPD, R^2 = 0.691.$$

经  $F$  检验，2 个回归方程均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。由回归方程可知  $TA$ 、 $RH$ 、 $VPD$  对不

同灌水条件下的  $P_p^*$ 变化均会产生影响，但  $WS$  只对非充分灌溉条件下的  $P_p^*$ 变化产生影响。这可能是由于非充分灌溉条件下，芹菜的水分状况不稳定，导致其叶片膨压更易受风速的影响。

为探究不同气象因子间的相互作用对芹菜  $P_p^*$ 的影响，分别对 NI、FI 处理进行途径分析。由表 2 可知，不同灌水条件下，对芹菜  $P_p^*$ 直接影响程度最高的气象因子是  $TA$ ，间接影响最大的气象因子是  $VPD$ ，且  $VPD$  主要通过其他气象因子间接影响  $P_p^*$ 变化。

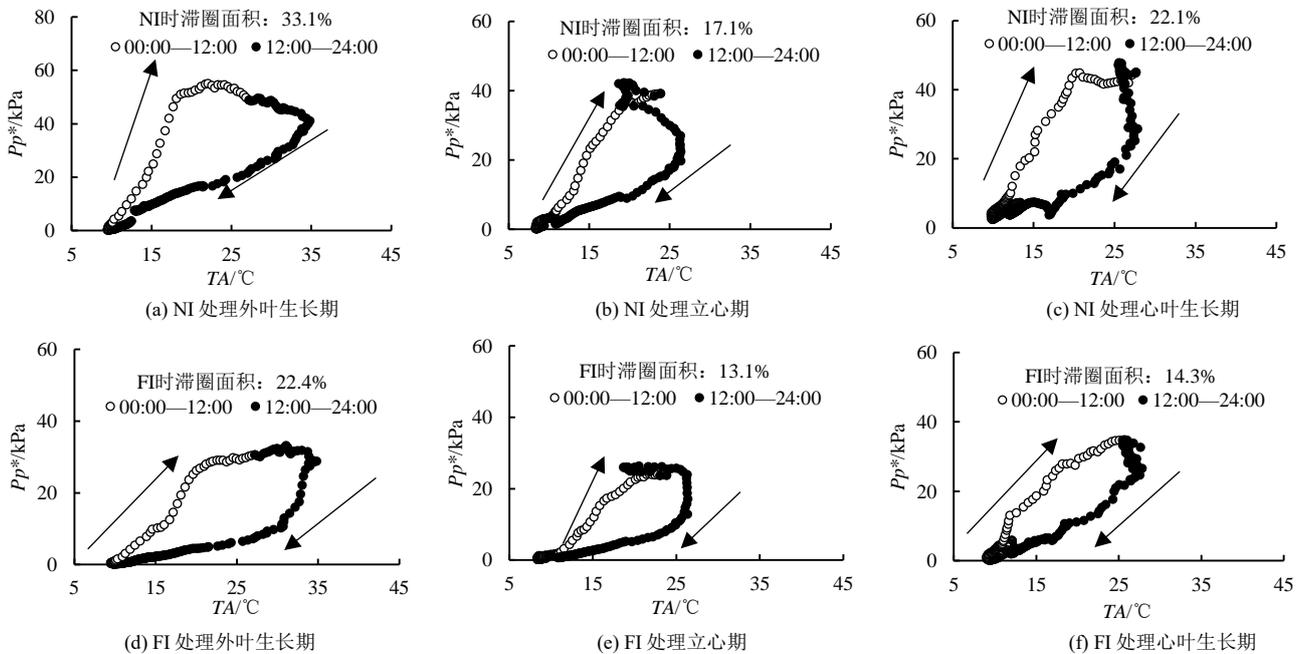
表 2 不同灌水条件下芹菜  $Pp^*$  与气象因子的通径分析Table 2 Path analysis of celery  $Pp^*$  and meteorological factors under different irrigation conditions

处理	自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数				合计
				$TA$	$RH$	$VPD$	$WS$	
NI	$TA$	0.784	0.771	-	0.391	-0.558	0.180	0.013
	$RH$	-0.687	-0.534	-0.564	-	0.546	-0.132	-0.150
	$VPD$	0.704	-0.617	0.697	0.470	-	0.153	1.320
	$WS$	-0.778	-0.197	-0.704	-0.357	0.479	-	-0.582
FI	$TA$	0.801	0.850	-	0.347	-0.465	-	-0.118
	$RH$	-0.694	-0.474	-0.622	-	0.453	-	-0.169
	$VPD$	0.731	-0.514	0.768	0.418	-	-	1.186

注 “-”表示没有数据。

综上可知, 本试验条件下大气温度 ( $TA$ ) 是影响芹菜叶片  $Pp^*$  变化的最主要气象因子。叶片膨压与气象因子间存在变化不协同现象, 类似这种现象称为时滞效应<sup>[18]</sup>。故以  $TA$  为例, 进一步分析各生育期典型晴日芹菜  $Pp^*$  与  $TA$  间的时滞现象。由图 7 可知, 不同灌水条件下各生育期芹菜  $Pp^*$  与  $TA$  形成的时滞圈均呈顺时针变化, 且  $TA$  的变化明显滞后于

$Pp^*$ 。为了量化时滞水平, 利用横纵坐标计算出时滞圈的面积, 并根据其在绘图区域的面积占比进行归一化处理。由归一化结果 (图 7) 可知, NI 处理各生育期的时滞圈面积均明显大于 FI 处理。且外叶生长期时 2 处理的时滞圈面积差最大, 达到了 9.5%。这表明非充分灌溉条件下, 芹菜  $Pp^*$  与  $TA$  的时滞圈面积会增大。

图 7 不同灌水条件下各生育期典型晴日芹菜  $Pp^*$  与  $TA$  的时滞效应Fig.7 Inverse hysteresis of celery  $Pp^*$  and  $TA$  on typical days at different growing period and different irrigation conditions表 3 不同灌水条件下各生育期典型晴日芹菜  $Pp^*$  与  $TA$  的时滞时间Table 3 Hysteresis time between celery  $Pp^*$  and  $TA$  on typical days at each growing period under different irrigation conditions

处理	外叶生长期		立心期		心叶生长期	
	时滞时间/min	相关性	时滞时间/min	相关性	时滞时间/min	相关性
NI	-80	0.958**	-80	0.898**	-70	0.980**
FI	-70	0.964**	-60	0.908**	-40	0.966**

注 \*\*表示在 0.01 水平, 相关性显著。

进一步采用时间错位对比法计算芹菜  $Pp^*$  与  $TA$  的时滞时间 (表 3), 结果显示 3 个生育期的  $TA$  变化均滞后于  $Pp^*$ 。且 NI 处理的时滞时间均较 FI 处理长, 表明非充分灌溉条件下芹菜  $Pp^*$  与  $TA$  的时滞时

间增加。其中心叶生长期 2 个处理的时滞时间差最大, 达到了 30 min。

### 3 讨论

#### 3.1 滴灌芹菜叶片膨压的变化特征

本试验条件下, 各生育期滴灌芹菜典型晴日的叶片  $Pp^*$  变化曲线均呈“几”字单峰型, 表明芹菜叶片膨压呈现“昼低夜高”的日变化趋势, 这与前人在冬小麦<sup>[10]</sup>、番茄<sup>[19]</sup>、玉米<sup>[21]</sup>等作物上的研究结果一致。进一步由日变化及相关性分析可知, 芹菜的叶片膨压变化与气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $Tr$ ) 及叶水势 ( $\Psi$ ) 紧密相关。这是由于气孔开度增加后

蒸腾作用增强，叶水势减小，进而导致  $Pp^*$  值上升而叶片膨压减小；反之气孔关闭后蒸腾作用减弱，叶水势增大，使  $Pp^*$  值下降而叶片膨压增大。部分研究者针对班克木和橄榄树等乔木上的研究也发现了类似结果<sup>[14,22]</sup>。此外，持续的水分亏缺会引起  $Pp$  曲线的反转现象，即白天出现谷值，夜晚出现峰值<sup>[23]</sup>。Martínez-gimeno 等<sup>[24]</sup>对 2 种基因型柿树的研究显示，中午茎水势低于 -1.4 MPa 时  $Pp$  曲线出现反转现象。部分研究者认为将植物水势与  $Pp$  曲线的反转状态关联，并划分出一定阈值范围，对于合理规划灌溉水量具有积极意义<sup>[25]</sup>。但本次试验过程中并未出现该反转现象，这可能与土壤水分未降到使芹菜出现严重水分亏缺的下限值有关<sup>[26]</sup>，因而有关设施芹菜的叶水势阈值划分目前尚不明确。

同时，本研究得出不同灌水条件下的芹菜叶片膨压变化特征存在一定差异。单日  $Pp^*$  变化显示，非充分灌溉条件下  $Pp^*$  的启动时间较充分灌溉时提前，且  $Pp^*$  的峰值升高。这是因为充分灌溉条件下芹菜可利用水分充足，植物体水分状况良好<sup>[27]</sup>，而非充分灌溉条件下土壤平均含水率较充分灌溉低 12%（图 2），导致芹菜可利用水分减少，处于水分亏缺状态。此时植物将通过促进根系吸水的方式缓解亏缺状态，造成根-叶系统间形成张力梯度的时间提前<sup>[28]</sup>，最终导致  $Pp^*$  的启动时间提前。并在水分持续供应不足的情况下，使得芹菜叶片膨压损失增加， $Pp^*$  的峰值增大。且长期结果显示非充分灌溉时芹菜  $Pp$  灌前灌后的上升及下降幅度增大，这表明芹菜自身水分状况不稳定时易受土壤水分变化的影响导致膨压剧烈变化。Westhoff 等<sup>[9]</sup>对葡萄树的研究结果也显示持续灌溉使叶片  $Pp$  值保持稳定状态，停止灌溉后  $Pp$  峰值逐渐上升。而 Bader 等<sup>[14]</sup>发现干旱条件下班克木叶片  $Pp$  的谷值维持稳定状态不上升，其认为银杏树的夜间水分调节促进了叶片水分状态的恢复。Camoglu 等<sup>[29]</sup>对辣椒的膨压监测试验则表明灌溉不是使  $Pp$  峰值下降的唯一原因， $Pp$  的下降还与气象因子的变化有关。

综上可知，叶片膨压的变化与植物内部水分变化存在相互关联，其变化特征能够反映土壤水分的改变，但将其应用于芹菜水分状况的诊断仍需进一步定量分析。

### 3.2 滴灌芹菜叶片膨压对气象因子的响应

气象因子是引起叶片膨压变化的关键因素之一<sup>[12]</sup>。本试验不同灌水条件下， $TA$  和  $VPD$  升高而  $RH$  和  $WS$  下降时， $Pp^*/Pp$  值升高，叶片膨压降低；反之  $TA$  和  $VPD$  下降而  $RH$  和  $WS$  升高时， $Pp^*/Pp$  值下降，叶片膨压增大。Zimmermann 等<sup>[12]</sup>发现  $TA=36$  °C 时，

$RH$  瞬时增加 15% 使香蕉树的  $Pp$  值降低 10 kPa。Aissaoui 等<sup>[30]</sup>对橄榄树的膨压研究表明  $VPD$  与  $Pp$  间具有明显的协同变化，Ehrenberger 等<sup>[31]</sup>对橡树的研究也表明， $VPD$  增大时  $Pp$  峰值上升。同时本试验非充分灌溉条件下  $WS$  对芹菜叶片膨压的影响更显著。作物经历水分亏缺时，气孔出现开闭振荡，蒸腾作用减弱<sup>[32]</sup>。但适宜微风能促进温室内的气流运动，使气孔外围的蒸汽扩散层变薄或消失，减小气孔外部阻力，从而促进了叶片的蒸腾作用<sup>[33-34]</sup>。因此，非充分灌溉条件下的风速变化加剧了设施芹菜的蒸腾失水现象，使得叶片膨压损失进一步增大，表明该状态下芹菜叶片膨压对风速变化更敏感。Fernández 等<sup>[35]</sup>也发现  $WS$  越大  $Pp$  曲线的振荡幅度越大，其认为风对植物叶片膨压的影响随着风速的增大而增大。此外，李豆豆等<sup>[36]</sup>发现小时尺度下毛白杨叶片膨压与气象因子的相关性显著，但日尺度下的相关性不显著。这表明需进一步研究不同尺度下芹菜叶片膨压对气象因子的响应。

同时，本试验得出  $TA$  是芹菜叶片膨压变化的主要影响因素，且  $TA$  与叶片膨压间存在显著的时滞效应。不同灌水条件下芹菜各生育期的  $TA$  变化均滞后于  $Pp^*$ ，但非充分灌溉时  $Pp^*$  与  $TA$  的时滞时间及时滞圈面积增加，表明灌水减少使芹菜叶片膨压与  $TA$  的时滞效应增强。但也有研究者认为水分亏缺时叶片膨压与  $TA$  的时滞圈面积减小<sup>[5]</sup>。不同的结果与植物的水分调节能力差异有关<sup>[37]</sup>。芹菜的水分调节能力相对较弱，缺水状态下不能及时补充叶片损失水分，使得木质部栓塞程度增加<sup>[38]</sup>，进而导致叶片膨压迅速减小且增强了其与  $TA$  的时滞效应。以上研究进一步说明气象因子对植物叶片膨压的影响具有复杂性，且存在灌水条件不同导致的显著差异，未来需进一步从机理深入分析时滞效应与植物水分状况的关联，并基于此建立气象因子与膨压间的稳定关系进行植物水分状况诊断。

## 4 结论

1) 各生育期典型晴日不同处理下，滴灌芹菜  $Pp^*$  均呈单峰型曲线，且  $Pp^*$  与  $G_s$ 、 $Tr$  的日变化趋势相同，与  $\Psi$  的日变化趋势相反。相关性分析显示， $Pp^*$  与  $G_s$ 、 $Tr$  正相关，与  $\Psi$  负相关。

2) 非充分灌溉条件下  $Pp^*$  的启动时间较充分灌溉时提前，且  $Pp^*$  的峰值增大。灌水前  $Pp$  峰值逐渐上升，灌水后  $Pp$  急剧下降，但非充分灌溉条件下  $Pp$  的变化幅度增大。

3) 不同灌水条件下，气象因子对芹菜叶片膨压变化存在显著影响。其中  $TA$  为主要影响因素，且

*TA* 与叶片膨压间存在显著时滞效应。但非充分灌溉条件下叶片膨压与 *TA* 的时滞圈面积及时滞时间增加。

#### 参考文献:

- [1] 程陈,董朝阳,黎贞发,等.日光温室芹菜外观形态及干物质积累分配模拟模型[J].农业工程学报,2021,37(10):142-151.  
CHENG Chen, DONG Chaoyang, LI Zhenfa, et al. Simulation model of external morphology and dry matter accumulation and distribution of celery in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(10): 142-151.
- [2] 马筱建,孙景生,刘浩,等.不同方式加气灌溉对温室芹菜生长及产量的影响研究[J].灌溉排水学报,2018,37(4):29-33.  
MA Xiaojian, SUN Jingsheng, LIU Hao, et al. Impact of different aerated irrigation on growth and yield of greenhouse celery[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 29-33.
- [3] 张萌.温度、干旱和UV-B照射时间对芹菜生长及黄酮类物质积累的影响[D].南京:南京农业大学,2017.  
ZHANG Meng. Effects of temperature, drought and UV-B irradiation time on celery growth and flavonoids accumulation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [4] 张威贤.不同灌水方式对温室芹菜生长及产量的影响[D].太原:太原理工大学,2021.  
ZHANG Weixian. Effects of different irrigation methods on the growth and yield of celery in greenhouse[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [5] BRAMLEY H, EHRENBERGER W, ZIMMERMANN U, et al. Non-invasive pressure probes magnetically clamped to leaves to monitor the water status of wheat[J]. Plant and Soil, 2013, 369: 257-268.
- [6] 朱鑫庆,王伯初,付雪,等.膨压在植物细胞生长中的作用[J].生物物理学报,2013,29(8):583-593.  
ZHU Liqing, WANG Bochu, FU Xue, et al. Turgor pressure in plant cell growth[J]. Acta Biophysica Sinica, 2013, 29(8): 583-593.
- [7] ZIMMERMANN D, REUSS R, WESTHOFF M, et al. A novel, non-invasive, online-monitoring, versatile and easy plant-based probe for measuring leaf water status[J]. Journal of Experimental Botany, 2008, 59(11): 3 157-3 167.
- [8] CHEHAB H, TEKAYA M, MECHRI B, et al. Effect of the Super Absorbent Polymer Stockosorb on leaf turgor pressure, tree performance and oil quality of olive trees cv. *Chemlali* grown under field conditions in an arid region of Tunisia[J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 221-231.
- [9] WESTHOFF M, REUSS R, ZIMMERMANN D, et al. A non-invasive probe for online-monitoring of turgor pressure changes under field conditions[J]. Plant Biology, 2009, 11(5): 701-712.
- [10] RIBOLDI L B, OLIVEIRA R F, ANGELOCCI L R. Leaf turgor pressure in maize plants under water stress[J]. Australian Journal of Crop Science, 2016, 10(6): 878-886.
- [11] ZAIT Y, SHAPIRA O, SCHWARTZ A. The effect of blue light on stomatal oscillations and leaf turgor pressure in banana leaves[J]. Plant, Cell and Environment, 2017, 40(7): 1 143-1 152.
- [12] ZIMMERMANN U, RÜGER S, SHAPIRA O, et al. Effects of environmental parameters and irrigation on the turgor pressure of banana plants measured using the non-invasive, online monitoring leaf patch clamp pressure probe[J]. Plant Biology, 2010, 12(3): 424-436.
- [13] RÜGER S, EHRENBERGER W, AREND M, et al. Comparative monitoring of temporal and spatial changes in tree water status using the non-invasive leaf patch clamp pressure probe and the pressure bomb[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(2): 283-290.
- [14] BADER M K F, EHRENBERGER W, BITTER R, et al. Spatio-temporal water dynamics in mature *Banksia menziesii* trees during drought[J]. Physiologia Plantarum, 2014, 152(2): 301-315.
- [15] KANT S, BURCH D, EHRENBERGER W, et al. A novel crop water analysis system: Identification of water stress tolerant genotypes of canola (*Brassica napus* L.) using non-invasive magnetic turgor pressure probes[J]. Plant Breeding, 2014, 133(5): 602-608.
- [16] FERNÁNDEZ J. Plant-based methods for irrigation scheduling of woody crops[J]. Horticulturae, 2017, 3(2): 35.
- [17] 郑利剑,马娟娟,孙西欢,等.叶片膨压探针诊断植物体水分状况原理及应用进展[J].灌溉排水学报,2022,41(2):27-34.  
ZHENG Lijian, MA Juanjuan, SUN Xihuan, et al. Online-monitoring of plant water statuses using the leaf patch clamp pressure probe: a review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 27-34.
- [18] ZIMMERMANN U, BITTER R, MARCHIORI P, et al. A non-invasive plant-based probe for continuous monitoring of water stress in real time: a new tool for irrigation scheduling and deeper insight into drought and salinity stress physiology[J]. Theoretical and Experimental Plant Physiology, 2013, 25(1): 2-11.
- [19] 徐世琴,吉喜斌,金博文.典型荒漠植物沙拐枣茎干液流密度动态及其对环境因子的响应[J].应用生态学报,2016,27(2):345-353.  
XU Shiqin, JI Xibin, JIN Bowen. Dynamic of sap flow density in stems of typical desert shrubs *Calligonum mongolicum* and its responses to environmental variables[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 345-353.
- [20] LEE K M, DRIEVER S M, HEUVELINK E, et al. Evaluation of diel patterns of relative changes in cell turgor of tomato plants using leaf patch clamp pressure probes[J]. Physiologia Plantarum, 2012, 146(4): 439-447.
- [21] BRAMLEY H, BITTER R, ZIMMERMANN G, et al. Simultaneous recording of diurnal changes in leaf turgor pressure and stem water status of bread wheat reveal variation in hydraulic mechanisms in response to drought[J]. Functional Plant Biology, 2015, 42(10): 1 001-1 009.
- [22] PADILLA-DÍAZ C M, RODRIGUEZ-DOMINGUEZ C M, HERNANDEZ-SANTANA V, et al. Water status, gas exchange and crop performance in a super high density olive orchard under deficit irrigation scheduled from leaf turgor measurements[J]. Agricultural Water Management, 2018, 202: 241-252.
- [23] RODRIGUEZ-DOMINGUEZ C M, HERNANDEZ-SANTANA V, BUCKLEY T N, et al. Sensitivity of olive leaf turgor to air vapour pressure deficit correlates with diurnal maximum stomatal conductance[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 272: 156-165.
- [24] MARTÍNEZ-GIMENO M A, CASTIELLA M, RÜGER S, et al. Evaluating the usefulness of continuous leaf turgor pressure measurements for the assessment of Persimmon tree water status[J]. Irrigation Science, 2017, 35(2): 1-9.
- [25] MARINO G, PERNICE F, MARRA F P, et al. Validation of an online system for the continuous monitoring of tree water status for sustainable irrigation managements in olive (*Olea europaea* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 298-307.
- [26] 梁媛媛,孙景生,郭凤台,等.日光温室芹菜适宜灌溉指标研究[J].灌溉排水学报,2009,28(2):48-50.  
LIANG Yuanyuan, SUN Jinsheng, GUO Fengtai, et al. Water-saving irrigation index for sunlight greenhouse celery[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 48-50.
- [27] 祁焕军,雷晓婷,雷金银,等.灌水量及灌水pH值对宁南山区土壤养分及芹菜产量品质的影响[J].节水灌溉,2021(9):29-34.  
QI Huanjun, LEI Xiaoting, LEI Jinyin, et al. Effects of irrigation water quantity and pH value on soil nutrients and celery yield and quality in Southern Ningxia Mountain Area[J]. Water Saving Irrigation, 2021(9): 29-34.
- [28] RODRIGUEZ-DOMINGUEZ C M, EHRENBERGER W, SANN C, et al. Concomitant measurements of stem sap flow and leaf turgor pressure in olive trees using the leaf patch clamp pressure probe[J]. Agricultural

- Water Management, 2012, 114: 50-58.
- [29] CAMOGLU G, DEMIREL K, KAHRIMAN F, et al. Discrimination of water stress in pepper using thermography and leaf turgor pressure probe techniques[J]. Agricultural Water Management, 2021(254): 106-142.
- [30] AISSAOUI F, CHEHAB H, BADER B, et al. Early water stress detection on olive trees (*Olea europaea* L. cvs 'chemlali' and 'Chetoui') using the leaf patch clamp pressure probe[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 20-28.
- [31] EHRENBERGER W, RÜGER S, FITZKE R, et al. Concomitant dendrometer and leaf patch pressure probe measurements reveal the effect of microclimate and soil moisture on diurnal stem water and leaf turgor variations in young oak trees[J]. Functional Plant Biology, 2012, 39(4): 297-305.
- [32] XU H L, XU C, QIN F F, et al. Photosynthetic Oscillation in Leaves of Tomato and Hibiscus under High Light Intensity[J]. Acta Horticulturae, 2011, 907: 343-347.
- [33] 赵哈林, 李瑾, 周瑞莲, 等. 不同强度净风频繁吹袭对樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)幼苗光合蒸腾特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1 431-1 437.
- ZHAO Halin, LI Jin, ZHOU Ruilian, et al. Effects of wind frequency on the rates of photosynthesis and transpiration in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1 431-1 437.
- [34] 葛建坤, 辛清聪, 龚雪文, 等. 温室通风控水条件对番茄耗水特性及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 204-213.
- GE Jiankun, XIN Qingcong, GONG Xuewen, et al. Effects of greenhouse ventilation and water control conditions on water consumption characteristics and yield of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(15): 204-213.
- [35] FERNÁNDEZ J E, RODRIGUEZ-DOMINGUEZ C M, PEREZ-MARTIN A, et al. Online-monitoring of tree water stress in a hedgerow olive orchard using the leaf patch clamp pressure probe[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 25-35.
- [36] 李豆豆, 席本野, 王斐, 等. 毛白杨叶片膨压变化规律及其对环境因子的响应[J]. 植物生态学报, 2018, 42(7): 741-751.
- LI Doudou, XI Benye, WANG Fei, et al. Patterns of variations in leaf turgor pressure and responses to environmental factors in *Populus tomentosa*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(7): 741-751.
- [37] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰. 植物水分调节对策: 等水与非等水行为[J]. 植物生态学报, 2017, 41(9): 1 020-1 032.
- LUO Dandan, WANG Chuankuan, JIN Ying. Plant water-regulation strategies: Isohydic versus anisohydric behavior[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(9): 1 020-1 032.
- [38] RYU J, HWANG B G, KIM Y X, et al. Direct observation of local xylem embolisms induced by soil drying in intact *Zea mays* leaves[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(9): 2 617-2 626.

## Change in Turgor Pressure in Celery Leaf under Drip Irrigation and Its Determinants

XU Quanyue<sup>1</sup>, ZHENG Lijian<sup>1</sup>, SUN Xihuan<sup>1\*</sup>, LI Xiaojian<sup>2</sup>, MA Juanjuan<sup>1</sup>, GUO Xianghong<sup>1</sup>, GUO Yong<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Water Conservancy Development Center, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** **【Objective】** Turgor pressure in crops varies with root water uptake as a response to occurrence of water stress. This paper investigates how turgor pressure in the leaf of celery responds to drip irrigation and the factors which affect the pressure variation. **【Method】** The experiment was conducted in a greenhouse. It consists of sufficient irrigation (FI) and deficit irrigation (NI) treatment. Change in leaf turgor pressure, characterized by expansion parameters  $Pp$  and  $Pp^*$ , in each treatment was measured using a probe. We also measured the environmental factors and physiological traits of the plant, and analyzed their relationship with  $Pp/Pp^*$  using multiple regression, path analysis and time warping methods. **【Result】** ① The parameter  $Pp^*$  maximized at daytime and minimized at night on typical sunny days, regardless of the irrigation treatments and growing stage. However,  $Pp^*$  started to increase earlier in NI than in FI treatment, with the peak of  $Pp^*$  in the former being 39.3%~66.7% higher than that in the latter. ② The diurnal change in  $Pp^*$  was similar to that in the stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $Tr$ ).  $Pp^*$  was positively correlated to  $G_s$  and  $Tr$ , but negatively to leaf water potential ( $\Psi$ ). ③ The change in leaf turgor pressure varied with irrigation. The maximum and minimum  $Pp$  increased gradually prior to irrigation and decreased rapidly after irrigation, especially in the NI treatment where the change was more profound. ④  $Pp^*$  was positively correlated to atmospheric temperature ( $TA$ ) and vapour pressure deficit ( $VPD$ ), but negatively to relative humidity ( $RH$ ) and wind speed ( $WS$ ). Path analysis showed that the highest correlation between  $Pp^*$  and  $TA$ , and  $VPD$  was an indirect factor affecting  $Pp^*$ . Stepwise regression indicated that  $WS$  impacted  $Pp^*$  significantly only in NI. We also found that the impact of  $TA$  on  $Pp^*$  was not instant but existed a delay, especially in NI where the delay was more than 10~30 min than that in FI. **【Conclusion】** Variation in leaf turgor pressure in greenhouse celery was closely related to irrigation amount and meteorological factors. Insufficient irrigation increased the maximum turgor-pressure variation parameter but delayed the effect of atmospheric temperature on the turgor pressure.

**Key words:** celery; turgor probe; stomatal conductance; leaf water potential; meteorological factors

责任编辑: 白芳芳