

doi:10.11937/bfyy.20165065

不同供水吸力对番茄光合特征与声发射特性的影响

卫如雪^{1,2}, 余礼根², 郭文忠^{1,2}, 薛绪掌², 岳焕芳³, 胡潇怡³(1. 北京农学院 植物科学技术学院, 北京 102206; 2. 国家农业智能装备技术研究中心, 北京 100097;
3. 北京市农业技术推广站, 北京 100029)

摘要:以“迪安娜”番茄为试材,采用负水头供水控水盆栽装置,吸力值分别设定为15、35、55、75 hPa持续稳定控制不同的土壤含水率。利用声发射监测系统(physical acoustic corporation, PAC)连续监测番茄的声发射信号,通过测定番茄叶片净光合速率(Pn)和蒸腾速率(Tr)等光合参数及空气温度、相对湿度和光照强度等,研究了声发射计数与番茄净光合速率、蒸腾速率之间的关系。结果表明:供水吸力越小,番茄的净光合速率、蒸腾速率越大,叶片温度越小,蒸腾速率与净光合速率变化规律一致;08:00—18:00番茄声发射特性与番茄光合特征之间变化规律一致,二者具有良好的吻合特性。其中,12:00—14:00净光合速率和蒸腾速率达到全天最大值,供水吸力为55 hPa和75 hPa的番茄植株声发射计数达到最大值,分别为34和15。综上所述,不同供水吸力下,番茄光合特征与声发射特性之间具有良好的线性关系,进一步的试验结果表明其可为灌溉策略的制定提供一定的研究基础。

关键词:番茄;负水头控水;蒸腾速率;声发射;灌溉

中图分类号:S 641.207⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)20-0093-07

近年来,随着“菜篮子”工程的实施,我国蔬菜产业发展迅猛,设施蔬菜栽培面积已达86.7万hm²,居世界第一。设施蔬菜栽培过程中,滴灌、喷灌等灌溉技术会导致土壤在一定范围内干湿交替,影响水分控制效果,并改变土壤的松紧度等^[1],从而对试验结果造成一定的影响。多

位研究者提出了负水头灌溉技术,应用于温室及大棚蔬菜栽培^[2-4]。该装置通过设置不同的供水吸力值来控制土壤不同的含水率,使土壤含水率保持一致,避免了土壤的干湿交替。前人已利用此装置研究了不同供水吸力对温室小麦、黄瓜、菜豆和观赏辣椒等作物生长发育的影响,明确了温室不同作物生长的最适供水吸力^[5-9]。

植物拥有某种“语言”随时传达着缺水的信号,这种“语言”是指发生在植物水流通路上由于缺水而造成水流断裂时发出的爆裂声,即植物的“声发射”现象^[10]。1966年,MILBURN等^[11]把蓖麻作为研究对象,利用一个改进的听筒听取了水柱断裂时产生的“咔嚓”声,发现这个声音与植物组织水分状况有关,且这种声音不仅仅与组织破裂有关的结论。TYREE等^[12]在此基础上做了改进,在超音频范围内采集声发射信号以避免环

第一作者简介:卫如雪(1993-),女,山西洪洞人,硕士研究生,研究方向为设施环境调控及蔬菜栽培生理。E-mail: Weiruxue0105@163.com.

责任作者:郭文忠(1970-),男,宁夏中卫人,博士,研究员,硕士生导师,现主要从事设施环境调控及蔬菜栽培生理等研究工作。E-mail: guowz@nercita.org.cn.

基金项目:科技部星火计划重点资助项目(2015GA600005);北京市农林科学院设施园艺科技创新团队资助项目(JNKST201615)。

收稿日期:2017-05-20

境噪声的干扰,使声发射法简便可行,后又对田间玉米进行研究,发现声发射信号可以作为水分胁迫和植物减产的早期标志^[13]。之后有大量试验表明,植物在缺水状态下会发出声发射信号^[14-19]。杨世凤等^[20]应用声发射技术,采用计算机虚拟仪器系统对作物的水胁迫及作物视情自动灌溉系统进行了研究,得出作物受水胁迫时声发射频次随水胁迫程度的增加而增加,并与作物的蒸腾变化量有直接关系的结论。除此之外,声发射也应用于植物病害的无损检测中。研究发现番茄在染病早期声发射信号的频次大大增加,且随病害严重程度增加而逐渐降低,并基于此机理设计了精准施药模糊控制模型^[21-24]。该试验利用改进后的负水头供水控水盆栽装置,基于负水头供水控水原理,分析不同供水吸力下番茄生长指标和生理指标之间的差异,以及番茄光合特征与声发射特性之间的关系,以期番茄灌溉策略的制定提供一定的研究基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试番茄品种为“迪安娜”,由北京市农林科学院蔬菜研究中心提供。供试仪器有非接触式管道液位传感器(WS03A, CAEA electrical appliance Co. Ltd., Beijing); GS1 土壤水分传感器结合手持式 ProCheck 多功能读表(decagon devices, Inc., USA); LI-6400XT 光合仪(LI-COR biotechnology, nebraska, USA); RS-13L 记录仪(ESPEC MIC Corporation, Osaka, Japan); 声发射监测系统 PCI-2(physical acoustic corporation, USA); 声发射信号分析软件 AE win-2(physical acoustic corporation, Princeton, New Jersey, USA)。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验于 2016 年 2—6 月在北京市农林科学院日光温室内进行。采用负水头供水控水盆栽装置,通过设定装置的供水吸力值来控制不同的土壤含水率。设 15、35、55、75 hPa 共 4 个供水吸力处理,每处理 4 次重复。2 月 14 日育苗,3 月 25 日定植,选长势一致的植株,每盆 1 株。试验盆钵

为高 23 cm、内径 34 cm 的塑料花盆。盆栽用土取自北京市农林科学院内温室回填土,为表层土,风干后过 2 mm 筛。每盆装土 11 kg,有机肥 100 g,复合肥 25 g 均作为基肥一次性施入。在开花期,盛果期分别追施可溶性水溶肥 1.5 g。番茄幼苗定植到盆栽前,设置 40 hPa 供水吸力供水,缓苗 7 d 后设置不同供水吸力。番茄生育期为苗期(3 月 25 日至 4 月 7 日)、花期(4 月 8 日至 5 月 1 日)、果期(5 月 2 日至 6 月 2 日)。

1.2.2 负水头供水控水盆栽设计

负水头供水控水盆栽装置由盛土盆、供水盘、供水桶、控压管与导气管组成(图 1)。所用的供水盘为一种内带空腔、透水不透气的陶瓷盘,其规格为直径 20.5 cm、厚度 2.0 cm、内空腔厚度 0.5 cm,一般为进水口朝上稍微倾斜放置于盛土盆底部,通过一软管与供水桶相连。基于负压入渗的原理,由于土壤基质势的存在,受到土壤张力作用,陶瓷盘供水器里面的水缓慢渗入土壤,由于压差关系,供水桶内的水经塑料软管进入陶瓷盘,水位下降,空气体积增大,压强减小,整个装置气压失衡。随后,控压管经由导气管与大气连通吸入空气,平衡供水桶内气压,整套装置以此循环运行。供水桶内水分不断输送至盆栽装置内供给土壤蒸发和植株蒸腾产生的耗水。当供水桶内水位高度低于其高度的 1/4,对其进行补水直至灌满供水桶。

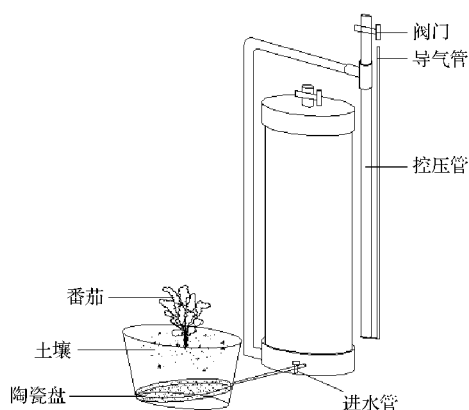


图 1 负水头供水控水盆栽装置

Fig. 1 Sketch map of negative pressure water supplying and controlling pot device

1.3 项目测定

1.3.1 日耗水量与土壤含水量的测定

每天 09:00 使用非接触式管道液位传感器读取负水头供水控水盆栽装置首部内的水位高度 (cm), 用当日测量的水位高度值 h_2 减去前一日测量的水位高度值 h_1 , 即可计算出前一日番茄植株耗水高度 Δh , 耗水体积为日耗水高度与负水头供水控水盆栽装置首部底面积的乘积, 底部直径为 8 cm。 $I = 64\pi \cdot \Delta h$, 式中, I 为耗水量, mL; Δh 为日耗水高度, cm。总耗水量为日蒸散量的累积相加值; 土壤含水量用 GS1 土壤水分传感器结合手持式 ProCheck 多功能读表实时测定。

1.3.2 光合参数的测定

选取番茄花期中的一个晴天 (4 月 28 日), 采用 LI-6400XT 光合仪测定叶片净光合速率 (Pn) 和蒸腾速率 (Tr) 等光合参数, 每处理测定 4 次重复, 从 08:00—16:00 每隔 2 h 整点测定, 叶片为生长点下数第 5 片叶片。

1.3.3 环境因子的测定

空气温度、相对湿度和光照强度采用 RS-13L 记录仪 (ESPEC MIC Corporation, Osaka, Japan) 进行测定。自番茄定植后开始进行连续监测, 每隔 5 min 采集一次数据, 并自动进行保存。

1.3.4 声发射 (Acoustic Emission, AE) 信号测定

采用声发射监测系统 PCI-2 记录生长过程中的声发射信号, 实行 24 h 连续采集。声发射传感器为圆柱体, 将声发射探头固定在番茄倒数第 5 叶位置茎部, 并在探头与茎部之间涂上凡士林。声发射特征参数有计数、幅值、上升时间等, 利用声发射信号分析软件 AE win-2 分析特征参数。其中, 计数是声发射信号越过阈值 40 dB 到峰值再回到阈值值的次数, 幅值是指信号波形的最大振幅值, 上升时间是信号第一次越过阈值至最大振幅所消耗的时间。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 软件对试验数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同供水吸力下的土壤含水量变化

由图 2 可知, 随供水吸力增大, 土壤含水量逐

渐减少, 土壤含水量与供水吸力值呈反比关系。供水吸力控制在 15~75 hPa 的土壤含水量范围为 11%~52%。

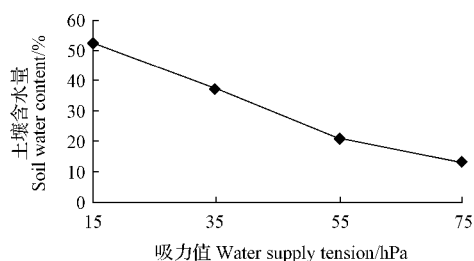


图2 不同供水吸力下土壤含水量的变化

Fig. 2 Variation of soil moisture under different water supply tension

2.2 不同供水吸力对番茄叶片光合特性的影响

由图 3 可知, 不同供水吸力下番茄叶片净光合速率不同, 随着供水吸力的增大而减少。在一天内, 净光合速率先增加后减少, 最高值出现在 12:00, 15 hPa 处理下净光合速率为 CO_2 $29.11 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 35 hPa 为 CO_2 $25.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 55 hPa 为 CO_2 $29.08 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 75 hPa 为 CO_2 $23.92 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因为光合速率随着光照强度的增加而逐渐增大, 12:00 光照强度最大 (图 4), 光合速率也达到最大。

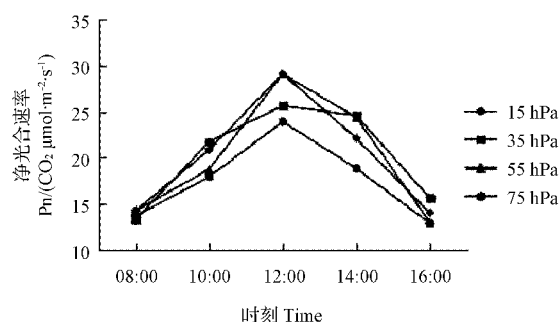


图3 不同供水吸力对番茄净光合速率的影响

Fig. 3 Effects on net photosynthetic rate (Pn) of tomato under different water supply tension

由图 5 可知, 番茄叶片的蒸腾速率先增大后减小, 12:00 达到最高值, 15、35、55、75 hPa 番茄蒸腾速率分别为 H_2O 15.17 、 13.66 、 14.85 、 $12.52 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 15 hPa 处理的番茄蒸腾速率最大。由图 3、4 对比可知, 不同处理的番茄叶片蒸腾速率的变化趋势与净光合速率一致,

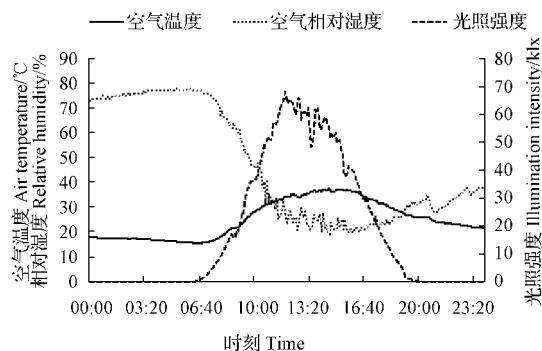


图4 温室环境因子变化

Fig. 4 Changes of enviromental parameters in greenhouse

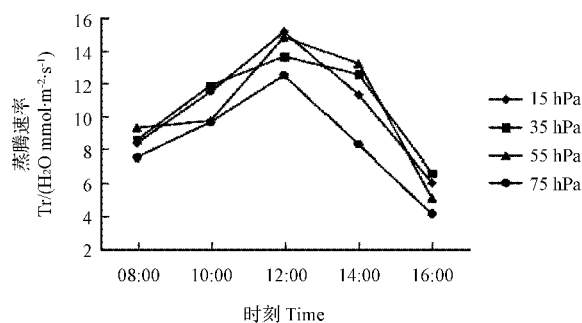


图5 不同供水吸力对番茄蒸腾速率的影响

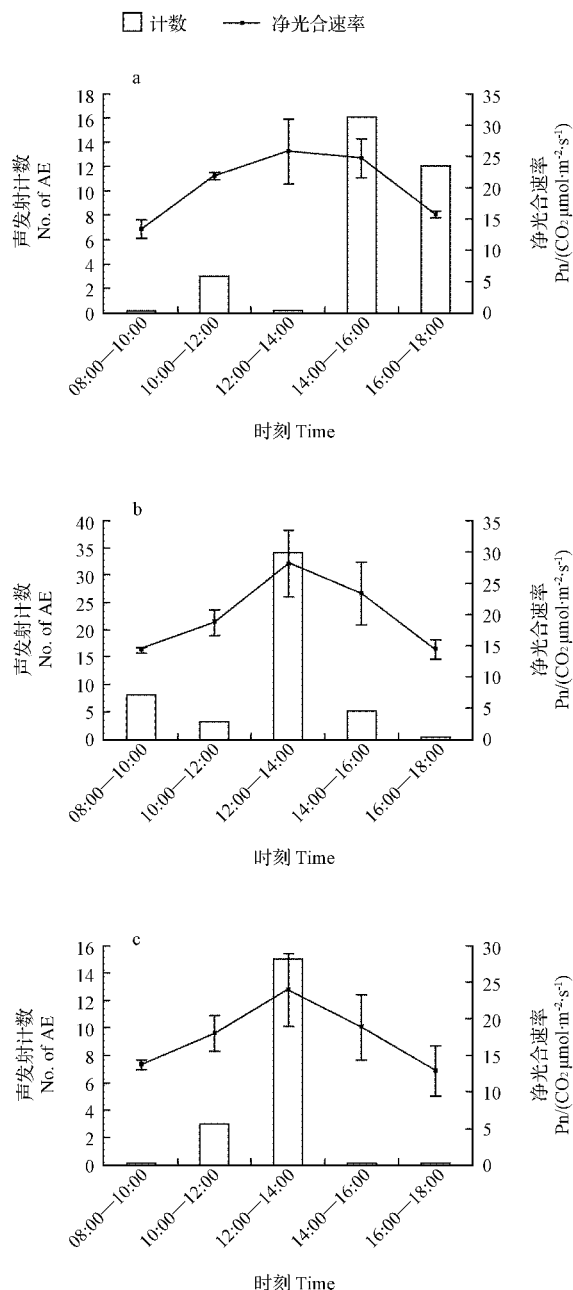
Fig. 5 Effects on transpiration rate (Tr) of tomato under different water supply tension

净光合速率较强时,其蒸腾速率也大。

2.3 不同供水吸力下番茄声发射计数与光合特性的关系

声发射信号为突发型信号,其典型特征参数包括计数、能量、幅值等。图形分析是最常用和最直观的声发射的活动情况和发展趋势的分析方法^[25]。选取花期中4月28日当天内检测的数据进行分析。以计数为特征参数,探究其与番茄净光合速率以及蒸腾速率之间的关系。计数是声发射发生的频次,当植物缺水时会发生撞击而产生计数。参照光合测量时间,选取08:00—18:00期间10 h内的声发射数据进行分析,统计声发射计数,计算出每2 h计数之和,再与光合参数进行对比。声发射计数和光合参数随时间变化结果如图6、7所示。环境因子变化图如图4所示。

图6(a)和图7(a)分别所示吸力值为35 hPa



注:a、b、c吸力值分别为35、55、75 hPa。下同。

Note: a, b, c water supply tension were 35, 55, 75 hPa, respectively. The same below.

图6 不同供水吸力下声发射计数与净光合速率的关系

Fig. 6 Relationship between AE counts and net photosynthetic rate (Pn) under different water supply tension

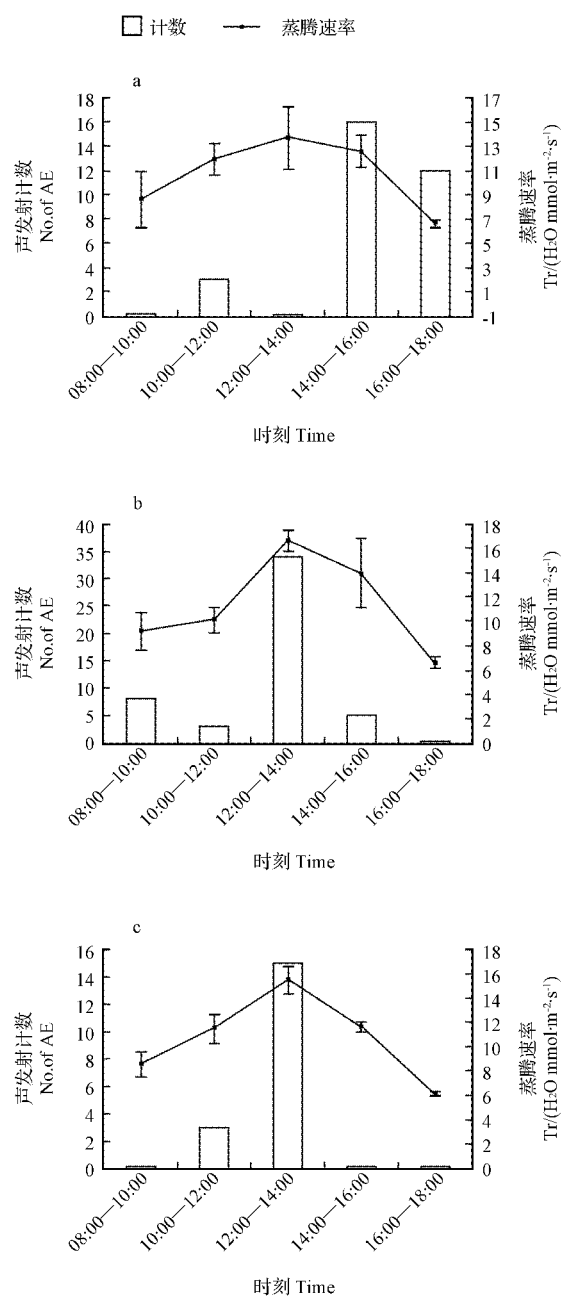


图 7 不同供水吸力下声发射计数和蒸腾速率的关系

Fig. 7 Relationship between AE counts and transpiration rate (Tr) under different water supply tension

的番茄声发射计数与其净光合速率、蒸腾速率之间的关系。08:00—18:00, 番茄声发射计数整体趋势为先增大后减小, 分别为 0、3、0、16、12, 这是

由于植株随时间逐渐呈现缺水状态。16:00 之后计数减小的原因是空气温度有所下降, 植物缺水状态有所缓解。12:00—14:00 计数为 0, 净光合速率和蒸腾速率最大。

图 6(b)和图 7(b)分别所示吸力值为 55 hPa 的番茄声发射计数与其净光合速率、蒸腾速率之间的关系。08:00—18:00, 番茄声发射计数整体趋势为先增大后减小, 分别为 8、3、34、5、0。图 6(c)和图 7(c)分别所示吸力值为 75 hPa 的番茄声发射计数与其净光合速率、蒸腾速率之间的关系。08:00—18:00 声发射计数分别为 0、3、15、0、0。可知吸力值为 55 hPa 和 75 hPa 的番茄植株的声发射计数与光合参数之间的关系相似, 声发射计数、净光合速率和蒸腾速率在 12:00—14:00 达到最大, 与 35 hPa 有所不同。出现这种情况的原因是吸力值为 55 hPa 和 75 hPa 的土壤含水量小于 35 hPa 的含水量, 在 12:00—14:00 时, 光照强度以及温度达到全天最高值, 使之光合达到最大的同时, 缺水情况也最严重。

3 结论

该试验采用一种负水头供水控水盆栽装置进行水分精确控制, 旨在探讨不同土壤水分持续控制下番茄植株光合参数和声发射特征参数的相关性。试验装置通过调整负水头值即供水吸力值控制土壤水分, 而装置的持续供水又避免了土壤的干湿交替, 使水分保持在一个持续稳定的状态。前人已经利用此装置研究了不同供水吸力控制下的不同土壤水分对番茄、黄瓜等作物生长发育的影响, 试验结果表明该装置设置的不同供水吸力值能持续稳定地控制不同的土壤含水量, 且供水吸力值与土壤含水量呈反比对应关系, 该试验中 15~75 hPa 的供水吸力处理控制的土壤含水量为 11%~52%。该试验结果表明, 供水吸力值越小, 番茄植株长势越好。叶片温度对净光合速率的影响较对蒸腾速率的影响明显。声发射计数与番茄净光合速率、蒸腾速率之间存在一定的关系。以声发射计数为指标, 声发射特性与番茄光合特征之间有良好的吻合特性。同时参照光合作用测量时间轴, 变化趋势一致, 其产生机理仍需进一步研究。

参考文献

- [1] KAUKORANTA T, MURTO J, TAKALA J, et al. Detection of water deficit in greenhouse cucumber by infrared thermograph and reference surfaces[J]. *Scientia Horticulturae*, 2005, 106(4): 447-463.
- [2] 薛绪掌. 一种负水头灌溉系统: 200510123974[P]. 2006-06-21.
- [3] 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎, 等. 负水头灌溉原理与装置[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 17-21.
- [4] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 负水头供水控水盆栽装置及灌溉系统的研究与应用[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2008, 26(5): 478-482.
- [5] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 硅藻土基质配方对盆栽观赏辣椒生长的影响[J]. *北方园艺*, 2008(11): 1-4.
- [6] 万克江. 水分精确控制下小麦、黄瓜和菠菜若干生理指标的变化[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [7] 邹朝望. 负水头灌溉技术基础研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [8] 耿伟, 薛绪掌, 王志敏. 不同供水吸力下豆角若干生理指标的变化[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(5): 206-210.
- [9] 毛思帅, 李豫宁, 胡跃高, 等. 负水头供给营养液对不同番茄品种生长特性的影响[J]. *北方园艺*, 2012(10): 28-32.
- [10] TYREE M T, SPERRY J S. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism[J]. *Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology*, 1989, 40(1): 19-38.
- [11] MILBURN J A, JOHNSON R P. The conduction of sap; II. detection of vibrations produced by sap cavitation in ricinus xylem[J]. *Planta*, 1966, 69(1): 43-52.
- [12] TYREE M T, SPERRY J S. Characterization and propagation of acoustic emission signals in woody plants: Towards an improved acoustic emission counter[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1989, 12(4): 371-382.
- [13] TYREEM T, FISCUS E L, WULLSCHLEGER S D, et al. Detection of xylem cavitation in corn under field conditions[J]. *Plant Physiology*, 1986, 82(2): 597-599.
- [14] ROO L D, VERGEYNST L, BAERDEMAEKER N D, et al. Acoustic emissions to measure drought-induced cavitation in plants[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(3): 71-78.
- [15] GAGLIANO M, MANCUSO S, ROBERT D. Towards understanding plant bioacoustics[J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17(6): 323-325.
- [16] CATE C T. Acoustic communication in plants: do the woods really sing?[J]. *Behavioral Ecology*, 2013, 24(4): 799-800.
- [17] KIKUTA S B, GULLO M A, NARDINI A, et al. Ultrasound acoustic emissions from dehydrating leaves of deciduous and evergreen trees[J]. *Plant Cell & Environment*, 1997, 20(11): 1381-1390.
- [18] JACKSON G E, GRACE J. Field measurements of xylem cavitation: are acoustic emissions useful?[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(11): 1643-1650.
- [19] PERKS M P, IRVINE J, GRACE J. Xylem acoustic signals from mature *Pinus sylvestris* during an extended drought[J]. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(1): 1-8.
- [20] 杨世凤, 钱东平, 霍晓静, 等. 作物水胁迫声发射检测及视情灌溉系统的研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(5): 150-152.
- [21] 杨世凤, 郭建莹, 王秀清, 等. 作物病害胁迫检测的研究进展[J]. *天津科技大学学报*, 2009, 24(5): 74-78.
- [22] 王秀清, 杨世凤, 刘玉良, 等. 作物病害胁迫声发射信号与环境因子分析[J]. *天津科技大学学报*, 2010, 25(6): 54-57.
- [23] 王秀清, 张春霞, 杨世凤. 番茄病害胁迫声发射信号采集与声源定位[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4): 159-162.
- [24] 王秀清, 游国栋, 杨世凤. 基于作物病害胁迫声发射的精准施药[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 205-209.
- [25] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 基于波形分析的声发射信号处理技术[J]. *无损检测*, 2002, 24(6): 257-261.

Experimental Research on Photosynthetic and Acoustic Emission Characteristics for Tomato Under Different Water Supply Tension

WEI Ruxue^{1,2}, YU Ligen², GUO Wenzhong^{1,2}, XUE Xuzhang², YUE Huanfang³, HU Xiaoyi³

(1. Plant Science and Technology College, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206; 2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097; 3. Beijing Agriculture Technology Extension Station, Beijing 100029)

Abstract: ‘Deanna’ tomato was used as material, using the negative pressure water supplying and controlling pot device, the water supply tension was set at 15 hPa, 35 hPa, 55 hPa and 75 hPa, respectively, and the soil water content was controlled continuously. Using the acoustic emission monitoring system to acquire acoustic emission signals, to measure the net photosynthetic rate (Pn) and transpiration rate (Tr) of tomato leaves, and air temperature, relative humidity and light intensity

to study the relationship between the acoustic emission count and the net photosynthetic rate and transpiration rate of the tomato. The results showed that the smaller water supply tension, the net photosynthetic rate and transpiration rate increased gradually and the leaf temperature decreased gradually. The change of transpiration rate and net photosynthetic rate were consistent. The characteristics of AE signal were analyzed within 10 hours from 08:00 to 18:00 and the changes of AE characteristics and tomato photosynthetic characteristics were counted every two hours, then it was found that there was a good agreement. Among them, the net photosynthetic rate and transpiration rate reached the maximum value between 12:00 and 14:00, the acoustic emission count of tomato under water supply tension of 55 hPa and 75 hPa reached the maximum, were 34 and 15 respectively. In conclusion, the photosynthetic characteristics and the acoustic emission characteristics of tomato under different water supply tension were significantly different, and there was a good linear relationship between them. The further experimental results showed that it could provide a basis for the formulation of irrigation strategies.

Keywords: tomato; negative pressure water control; transpiration rate; acoustic emission; irrigation

欢迎订阅《园艺学报》

《园艺学报》是中国园艺学会和中国农业科学院蔬菜花卉研究所主办的学术期刊,1962年创刊,刊载有关果树、蔬菜、观赏植物、茶及药用植物等方面的学术论文、研究报告、专题文献综述、问题与讨论、新技术新品种以及园艺研究动态与信息,适合园艺科研人员、大专院校师生及农业技术推广部门专业技术人员阅读参考。

《园艺学报》是中文核心期刊,中国科技核心期刊;被英国《CAB文摘数据库》、美国CA化学文摘、日本CBST科学技术文献速报、俄罗斯AJ文摘杂志、CSCD中国科学引文数据库等多家数据库收录。《园艺学报》荣获“第三届国家期刊奖”及“新中国60年有影响力的期刊”“中国国际影响力优秀学术期刊”“百种中国杰出学术期刊”“中国权威学术期刊”“中国精品科技期刊”等称号。

《中国科技期刊引证报告》核心版2016年公布的《园艺学报》核心总被引频次为4552,核心影响因子为1.060,均为学科第1位,在全国1985种核心期刊中排名第8位。

《园艺学报》为月刊,每月25日出版。每期定价48元,全年576元。国内外公开发行,全国各地邮局办理订阅,国内邮发代号82-471,国外发行由中国国际图书贸易总公司承办,代号M448。漏订者可直接寄款至编辑部订购。

地址:北京市海淀区中关村南大街12号中国农业科学院蔬菜花卉研究所《园艺学报》编辑部

邮政编码:100081

电话:(010)82109523

E-mail:yuanyixuebao@126.com

网址: [http:// www.ahs.ac.cn](http://www.ahs.ac.cn)

