排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 10 月 Oct. 2018 | 第 36 卷 第 10 期 Vol. 36 No. 10
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.18.1169

水分胁迫对番茄幼苗生理特性的影响

郝舒雪，曹红霞*，王虎兵，潘小燕
（西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西 杨凌 712100）


郝舒雪

摘要： 为了探讨番茄苗期生理特性在水分胁迫胁迫下的响应，试验设置充分灌溉的对照(T)和轻度(T1)、中度(T2)、重度(T3)水分胁迫处理. 在试验开始的第 5,10,15 和 20 d,测定各处理番茄幼苗的叶绿素荧光参数、气孔特征及抗氧化酶等指标. 与对照相比，不同程度水分胁迫条件下，随胁迫程度的增大，各处理番茄幼苗的 PSⅡ光化学效率(F_v/F_m)、光化学淬灭(qP)及电子传递速率(ETR)均有所下降，且由大到小基本表现为 T,T1,T2,T3；处理 T1,T2 和 T3 的气孔密度、长度及宽度均有所减小，重度水分胁迫条件下，气孔关闭；叶片中的超氧化物歧化酶、过氧化物酶及过氧化氢酶活性随着水分胁迫的加重而增加. 轻度水分胁迫番茄幼苗各生理指标与对照差异较小，故可在番茄苗期进行 50% ~60% 田间持水量的参考灌溉制度.

关键词： 番茄幼苗；叶绿素荧光；抗氧化酶；水分胁迫；气孔特性
中图分类号： S641 **文献标志码：** A **文章编号：** 1674-8530(2018)10-0943-05

郝舒雪，曹红霞，王虎兵，等. 水分胁迫对番茄幼苗生理特性的影响[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10):943-947.
HAO Shuxue, CAO Hongxia, WANG Hubing, et al. Effects of water stress on physiological characteristics during tomato seedlings period[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2018,36(10):943-947. (in Chinese)

Effects of water stress on physiological characteristics during tomato seedlings period

HAO Shuxue, *CAO Hongxia**, *WANG Hubing*, *PAN Xiaoyan*
(Northwest A&F University, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the response on the physiological characteristics of tomato seedlings under water stress, and provide theoretical reference for the water management and irrigation schedule during tomato seedlings period. The tomato type which selected for experiment was "Changfeng No. 5", and there were four water levels: full irrigation, mild, moderate and severe water stress. The indexes were measured every five days for a total of 20 days. The results indicate that under the water stress condition, the maximal photochemical efficiency (F_v/F_m), photochemical quenching coefficient (qP) and electron transport rate (ETR) decrease remarkably, and the performance of all the treatments from high to low is T, T_1, T_2 and T_3. On the other hand, the stomatal density, length and width of T1, T2 and T3 decrease a lot compared to the control. Furthermore, the stomata deeply closes under severe water stress. The leaf antioxidant enzyme activities increase with the increasing of water stress levels. The physiological parameters under the mild water stress have no obviously discrepancy compared to CK. Therefore, the reference irrigation regime: 50% -60% of field capacity can

收稿日期： 2018-05-10；**修回日期：** 2018-06-19；**网络出版时间：** 2018-07-16
网络出版地址： http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180716.1547.006.html
基金项目： 国家“863”计划项目(2013AA103004)；陕西省水利科技计划项目(2014slkj-17)；中央高校基本科研业务费专项(2452016074)
第一作者简介： 郝舒雪(1993—)，女，陕西榆林人，硕士研究生(haoshuxue925@163.com)，主要从事农业高效用水研究.
通信作者简介： 曹红霞(1971—)，女，新疆五家渠人，副教授，博士(chx662002@163.com)，主要从事农业高效用水研究.

be used for reference in the tomato seedling stage.

Key words: tomato seedling; chlorophyll fluorescence parameters; antioxidant enzyme; water stress; stomatal characteristics

番茄是我国设施栽培的主要蔬菜品种之一,在生长过程中会受到水分胁迫的影响. 水分胁迫会破坏植物体内水分代谢,导致植物的形态和生理性状发生变化,因此探索其在水分胁迫下的生理进程和防御机制,对揭示番茄苗期亏缺灌溉和抗旱机理有重要意义. 叶绿素荧光参数可以迅速、灵敏、无损伤地反映植物的光合进程. 通常在水分胁迫下,植株的PSⅡ光化学效率 F_v/F_m、光化学淬灭 qP、电子传递速率 ETR 降低,非光化学淬灭 NPQ 升高. 气孔是植物与外界进行水分散失和二氧化碳交换的主要通道. 气体交换主要由气孔开口、气孔大小和气孔密度决定[1]. 水分胁迫导致植物体内的活性氧增加及丙二醛的形成迫使其抗氧化酶活性升高[2]. 抗氧化酶可保护植物细胞免受自由基的伤害[3]. 水分胁迫下超氧化物歧化酶SOD、过氧化氢酶CAT及过氧化物酶POD活性增加. 水分胁迫下,PSⅡ的光能转换和活性氧的代谢密切相关. 因此,对水分胁迫下植物叶绿素荧光参数、抗氧化酶活性和两者之间相关关系的研究可以帮助解释光能转化、光能利用以及植物抗旱性机制. 马树庆等[4]研究表明苗期的土壤水分与玉米的产量息息相关.

本试验以番茄幼苗生理特性的变化为切入点,研究不同程度水分处理对番茄幼苗叶绿素荧光、抗氧化酶的影响,以期为番茄幼苗的水分管理和确定灌溉制度提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于2016年9—10月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的温室内进行. 该试验站位于108°40′E,34°18′N,海拔高度521 m,年平均降水量630 mm,年累积日照时数1 900 h,年蒸发量900~1 100 mm. 试验期间,温室内平均气温26.5 ℃,相对湿度约51%. 采用桶栽试验,试验材料为长丰五号番茄,试验土壤为重壤土,取自西北农林科技大学周边20 cm耕层. 土壤容重为1.3 g/cm^3,田间持水量为31.3%(体积含水率).

1.2 试验设计

试验用规格相同的塑料桶(底部直径14 cm,顶部直径19 cm,高15.5 cm),考虑根部透水透气情况在桶底打孔,每桶7个圆孔,直径5 mm,底部放置托盘,可以防止水分流失. 每桶装5 kg土壤,同时表面覆1层珍珠岩,以防止土层表面干裂. 按300 kg/hm^{2}的氮肥和钾肥及150 kg/hm^{2}的磷肥施肥量进行施肥,每桶分别装入氮肥4.57 g、磷肥6.62 g、钾肥4.15 g.

番茄于2016-09-03定植,试验设置4个水分处理,分别为充分灌溉的对照(T)和轻度(T1)、中度(T2)和重度(T3)水分胁迫,其土壤含水量分别为田间持水量的70%~80%,50%~60%,40%~50%和30%~40%. 缓苗期后进行水分胁迫处理,每天8:00和18:00采用称重法补水控水并记录,处理期间除土壤水分明显差异外其他管理一致. 土壤相对含水量达到4个不同水分胁迫程度的第5,10,15和20 d进行试验指标的测定及取样,每处理重复3次. 试验过程中每桶栽种1株番茄,每个处理5株番茄,共60株番茄.

1.3 测定指标与方法

叶绿素荧光参数:于晴天9:00—11:00,采用便携式调制叶绿素荧光仪PAM-2500(德国WALZ公司)测定. 取番茄叶片从上至下第4节位成熟的功能叶进行测定. 抗氧化酶活性:超氧化物歧化酶SOD活性采用NBT(氮蓝四唑)光还原法测定;过氧化氢酶CAT活性采用分光光度法测定;过氧化物酶POD采用愈创木酚比色法测定. 气孔特性于近叶脉处用刀片取5 mm×5 mm大小叶片,每个处理取3~5片,放入体积分数4%戊二醛溶液中固定,经pH6.8,0.1 mol/L的磷酸缓冲液漂洗,进行不同乙醇梯度脱水后放入中间置换液等待干燥,粘台喷金后在扫描电子显微镜(JSM-6360LV,日本)下观察气孔形态,选取15个典型视野拍照.

数据处理与分析是采用SPSS和Microsoft Excel 2010对试验数据进行处理,并且采用OriginPro 2016作图.

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对番茄幼苗叶绿素荧光参数的影响

图1为水分胁迫对番茄幼苗叶绿素荧光参数的

影响. 图 1a 表明,随胁迫时间的延长,*qP* 呈持续下降趋势. 不同水分胁迫条件下,*qP* 从大到小依次表现为 T,T1,T2,T3,其中处理 T 的 *qP* 值在水分胁迫后期显著高于 T3;在水分胁迫持续至 20 d 时,处理 T1,T2 和 T3 下的 *qP* 较对照分别降低了 9.16%,19.12%,23.24%.

从图 1b 可以看出,在水分胁迫条件下,不同处理的 *NPQ* 值从大到小基本表现为 T2,T3,T1,T,呈上升趋势,在水分胁迫的 15—20 d,处理 T1,T2 和 T3 的 *NPQ* 显著高于处理 T 的 *NPQ*,且 T3 出现下降趋势. 图 1c 表明,不同处理下 F_v/F_m 从大到小表现为 T,T1,T2,T3,且呈下降趋势. 处理 T 显著高于 T1,T2 和 T3,处理 T1 的 F_v/F_m 在处理期间均显著高于 T3.

图 1d 显示,水分胁迫期间,各处理的 *ETR* 均呈下降趋势,且从大到小基本表现为 T,T1,T2,T3. 在水分胁迫的 15—10 d,处理 T 的 *ETR* 显著高于处理 T1,T2 和 T3. 水分胁迫第 20 天时,处理 T1,T2 和 T3 的 *ETR* 较处理 T 分别降低了 29.62%,37.31%,42.31%.

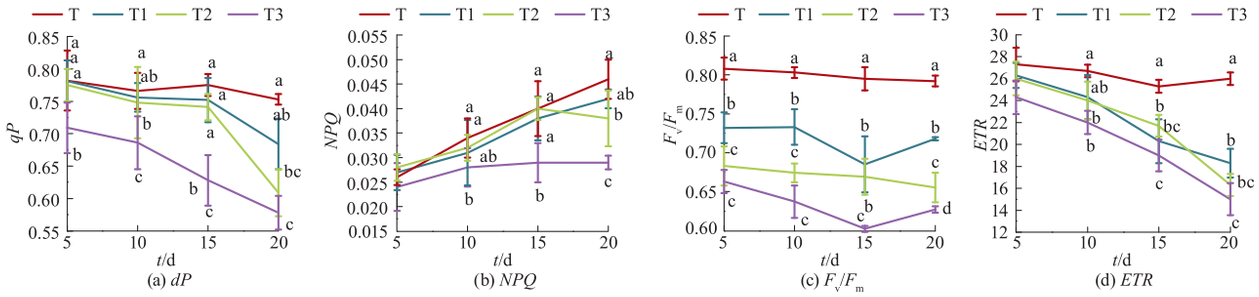


图 1　水分胁迫对番茄幼苗叶绿素荧光参数的影响

Fig. 1　Effects of water stress on chlorophyll fluorescence of tomato seedlings

2.2　水分胁迫对番茄幼苗气孔特性的影响

图 2 为水分胁迫对番茄幼苗气孔特性的影响. 图 2a 表明,水分胁迫下气孔密度 S_D 降低,各时期均从大到小表现为 T,T1,T2,T3,处理 T 的 S_D 显著高于 T1,T2 和 T3. 处理 T1 的 S_D 在水分胁迫 5—10 d 出现上升趋势,随后持续降低. 水分胁迫第 5 天时,处理 T1 和 T2 的 S_D 均显著高于处理 T3. 在水分胁迫的 20 d,处理 T1,T2 和 T3 的 S_D 较处理 T 分别降低了 24.59%,41.11%,46.37%. 图 2b 显示,水分胁迫下,各处理的气孔长度 S_L 均降低,且处理过程中均从大到小表现为 T,T1,T2,T3. 处理 T1 的 S_L 在水分胁迫的 10—15 d 显著高于处理 T2,T3. 至水分胁迫第 20 天时,处理 T1,T2 和 T3 的 S_L 较处理 T 分别降低了 12.61%,15.63%,19.71%. 从图 2c 看出,水分胁迫条件下,各处理的气孔宽度 S_W 均随处理时间的延长呈下降趋势,且与 S_L 的变化趋势基本相同. 在胁迫的 15—20 d,处理 T 的 S_W 与处理 T1 无显著差异,但显著大于 T2,T3. 至水分胁迫第 20 天时,处理 T1,T2 和 T3 的 S_W 值较处理 T 分别降低了 9.80%,16.00%,16.94%.

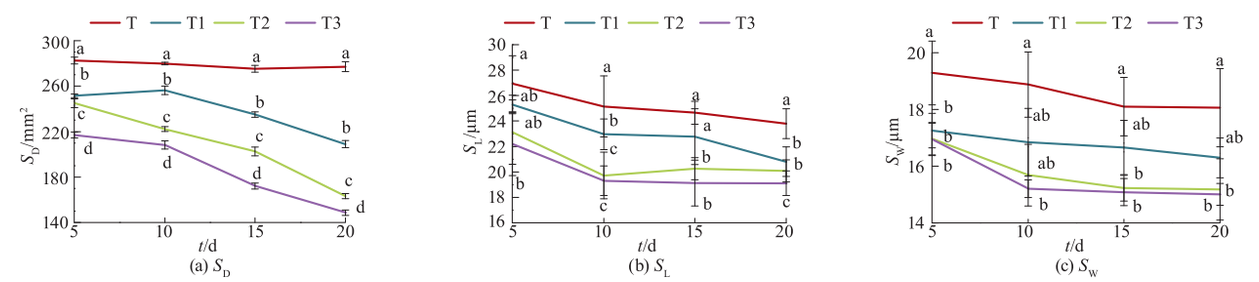
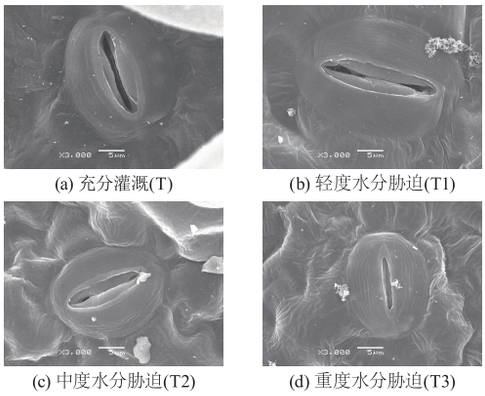


图 2　水分胁迫对番茄幼苗气孔特性的影响

Fig. 2　Effects of water stress on stomatal characteristics of tomato seedlings

图 3 为水分胁迫对番茄幼苗叶片表皮气孔的影响. 从图 3a 可以看出,处理 T 番茄叶片的气孔大部分张开,且开张程度较大,气孔周围较为平整. 图 3b 显示,在处理 T1 叶片的气孔约 1/3 关闭,气孔周围褶皱较少;且处理 T1 的气孔体积较处理 T 的气孔稍大. 图 3c,d 显示,处理 T2 和 T3 下的气孔均小于处理 T;处理 T3 处于完全关闭的状态,气孔周围不平整.



(a) 充分灌溉(T) (b) 轻度水分胁迫(T1)

(c) 中度水分胁迫(T2) (d) 重度水分胁迫(T3)

图3 水分胁迫对番茄幼苗叶片表皮气孔的影响

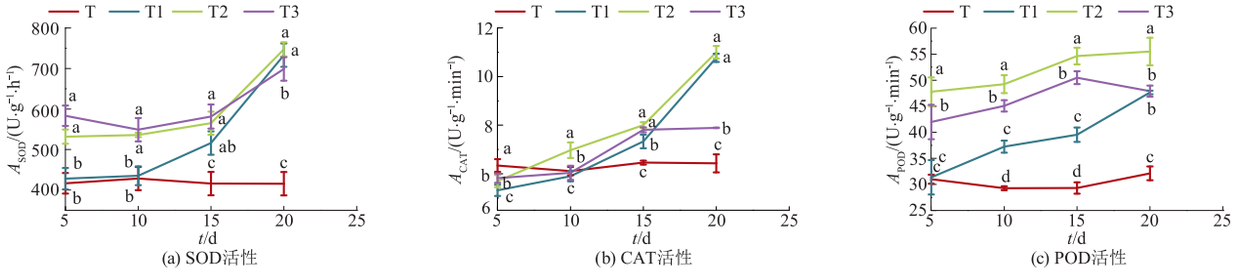
Fig. 3 Effects of water stress on leaf stomatal characteristics of tomato seedlings

2.3 水分胁迫对番茄幼苗抗氧化酶的影响

图4为水分胁迫对番茄幼苗抗氧化酶活性的影响. 图4a显示,水分胁迫期间,除处理T的SOD活性A_{SOD}总体呈下降趋势外,其余处理的SOD活性均呈上升趋势,由大到小表现为T3,T2,T1,T,在水分胁迫的15—20 d,处理T1的SOD活性显著高于处理T. 水分胁迫结束时处理T1,T2和T3的SOD活性较处理T分别升高76.32%,79.79%和68.14%.

图4b显示,水分胁迫下,各处理的CAT活性A_{CAT}均呈上升趋势,水分胁迫的前15 d,CAT活性由大到小依次为处理T2,T3,T1,T;至水分胁迫20 d时,处理T1,T2和T3的CAT活性较处理T分别增加了67.50%,71.07%,22.71%.

图4c表明,水分胁迫期间,各处理的POD活性A_{POD}总体均有所增加,不同水分条件下的POD活性从大小到依次为T2,T3,T1,T. 在水分胁迫的10—20 d,处理T1,T2,T3的POD活性显著高于处理T. 水分胁迫第20天时,处理T1,T2和T3的POD活性较处理T分别升高了48.35%,72.79%,49.13%.



(a) SOD活性 (b) CAT活性 (c) POD活性

图4 水分胁迫对番茄幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effects of water stress on antioxidant enzyme activities of tomato seedlings

2.4 叶绿素荧光参数、气孔特性及抗氧化酶活性的相关性分析

水分胁迫条件下,F_v/F_m,qP和ETR与气孔的密度、长度和宽度均呈极显著正相关,qP与抗氧化酶活性呈极显著负相关,ETR与SOD,CAT活性呈极显著负相关;NPQ与气孔的密度、长度和宽度均呈现极显著负相关,且NPQ与CAT,POD活性呈极显著正相关. SOD活性与气孔密度呈极显著负相关,与气孔长度和宽度无显著相关性;但CAT和POD活性均与气孔的密度、长度和宽度均呈极显著负相关. 气孔密度、长度、宽度三者之间均呈极显著正相关.

表1 番茄幼苗叶绿素荧光参数,气孔特性及抗氧化酶活性的相关关系

Tab. 1 Correlations of chlorophyll fluorescence, stomatal characteristics and antioxidant enzyme activities of tomato seedlings

指标 Index	F_v/F_m	qP	NPQ	ETR	A_{SOD}	A_{CAT}	A_{POD}	S_D	S_L	S_W
F_v/F_m	1									
qP	0.712**	1								
NPQ	−0.599*	−0.672**	1							
ETR	0.704**	0.902*	−0.899**	1						
A_{SOD}	−0.255	−0.626**	0.497	−0.634**	1					
A_{CAT}	−0.317	−0.637**	0.866**	−0.786**	0.644**	1				
A_{POD}	−0.843*	−0.65**	0.753**	−0.715	0.381	0.619**	1			
S_D	0.895**	0.912**	−0.791**	0.905**	−0.511**	−0.62**	−0.854**	1		
S_L	0.877**	0.731**	−0.755**	0.791**	−0.282	−0.523**	−0.872**	0.886**	1	
S_W	0.924**	0.771**	−0.764**	0.785**	−0.267	−0.493**	−0.886**	0.911**	0.953**	1

注:“*”和“**”表示相关性分别在0.05和0.01水平上差异具有统计学意义

3　讨　论

本研究表明在水分胁迫条件下,处理 T1,T3 的 F_v/F_m 先降低后升高. 由于胁迫前期,处于快速反应调节期,处理 T1 的 F_v/F_m 值可恢复并升高. 处理 T3 的 *qP* 显著低于 T2 和 T1,由于处理 T2 和 T3 下番茄的气孔关闭,从而碳代谢酶的光活化降低,黄瓜花后光合特性的研究也得出相同的结论[5]. 水分胁迫条件下,*NPQ* 均升高;在处理 T2,T3 下,*NPQ* 值较高,番茄幼苗需耗散激光能降低伤害. 水分胁迫下,番茄幼苗的 *ETR* 有不同程度的下降. 水分胁迫后期处理 T2 和 T3 的 *ETR* 较对照均显著降低,电子传递所受阻力增大,光合作用能量供应降低. 试验表明,在水分胁迫处理下,番茄叶片的 S_D,S_L 和 S_W 均呈下降趋势. 处理 T2,T3 下,气孔的关闭有利于 CO_2 和 H_2O 的滞留,当外界环境改变时,滞留在褶皱中的 CO_2 增加了气孔周围的浓度,为光合作用提供充足的原料,同时减少水分散失,从而降低蒸腾. 水分胁迫下,番茄幼苗的气孔密度随水分胁迫程度加重呈持续降低趋势;而气孔关闭的同时,叶绿素荧光参数下降,气孔引起 CO_2 受阻,从而降低光合能力,说明气孔因素是导致光合降低的主要原因. 水分胁迫条件下,番茄幼苗的 SOD 活性持续升高,而刘佳等[6]对辣椒的研究中 SOD 活性呈升后降的趋势. 在处理 T3 下,CAT 和 POD 活性先升高后降低,说明随着水分胁迫的加重,番茄幼苗体内的活性氧和超氧阴离子积累过多,超出了抗氧化酶的清除能力. 水分胁迫下,番茄幼苗的 F_v/F_m,*qP* 和 *ETR* 与 S_D,S_L 和 S_W 均呈极显著正相关,CAT 和 POD 活性均与气孔特性呈极显著负相关. 表明水分胁迫下,气孔限制是光合作用降低的主要原因. 在处理 T3 下,番茄幼苗的 *NPQ* 和 CAT 活性在水分胁迫后期呈先升后降趋势,说明其光系统和抗氧化系统已紊乱,应及时进行复水处理.

4　结　论

水分胁迫影响叶番茄幼苗的叶绿素荧光参数、气孔特性及抗氧化酶活性. 中度和重度水分胁迫导致番茄幼苗光能过剩,F_v/F_m,*qP* 及 *ETR* 显著降低,*NPQ* 升高. S_D,S_L,S_W 值较对照有不同程度降低. 抗氧化酶活性显著增加,且 SOD,POD,CAT 活性趋势基本相符. 叶绿素荧光、气孔特性及抗氧化酶之间存在极显著相关性,可较好地解释水分胁迫下番茄幼苗的光能转化和抗旱性机制. 轻度水分胁迫对番茄幼苗叶绿素荧光参数和气孔特性影响不显著,但抗氧化系统酶活性升高,增强了番茄植株在水分胁迫下的抗逆性,故 50% ~60% 田间持水量的灌水量可作为番茄苗期水分管理的参考值.

参考文献(References)

[1] HSIE B S, MENDES K R, ANTUNES W C, et al. Jatropha curcas L. (Euphorbiaceae) modulates stomatal traits in response to leaf - to - air vapor pressure deficit [J]. Biomass and bioenergy, 2015,81: 273 - 281.

[2] SHEIKH MOHAMMADI M H, ETEMADI N, ARAB M M, et al. Molecular and physiological responses of Iranian Perennial ryegrass as affected by Trinexapac ethyl, Paclobutrazol and Abscisic acid under drought stress [J]. Plant physiology and biochemistry, 2017, 111: 129 - 143.

[3] WU X, YUAN J, LUO A, et al. Drought stress and rewatering increase secondary metabolites and enzyme activity in dendrobium moniliforme [J]. Industrial crops and products, 2016,94: 385 - 393.

[4] 马树庆, 王琪, 张铁林, 等. 吉林省中部玉米出苗率和产量对播种出苗期水分胁迫的反应及其气象评估[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 451 - 457.
MA Shuqing, WANG Qi, ZHANG Tielin, et al. Response of maize emergence rate and yield to soil water stress in period of seeding emergence and its meteorological assessment in central area of Jilin Province[J]. Chinese journal of applied ecology, 2014, 25(2): 451 - 457. (in Chinese)

[5] 林琅, 汤昀, 张纪涛, 等. 不同水势对黄瓜花后叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2030 - 2040.
LIN Lu, TANG Yun, ZHANG Jitao, et al. Effects of different water potentials on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of cucumber during post-flowering growth stage [J]. Chinese journal of applied ecology, 2015, 26(7):2030 - 2040. (in Chinese)

[6] 刘佳, 郁继华, 徐秉良, 等. 干旱气候条件下水分胁迫对辣椒叶片生理特性的影响 [J]. 核农学报, 2012, 26(8): 1197 - 1203.
LIU Jia, YU Jihua, XU Bingliang, et al. Effects of water stress on the physiological characteristics of pepper leaves in arid climates [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2012, 26(8): 1197 - 1203. (in Chinese)

(责任编辑　朱澍云)