

抑制蒸腾对番茄生长及植株镁、钾、钙吸收的影响

李惠霞^{1,2,3}, 刘岩^{1,2}, 陈竹君^{1,2}, 周建斌^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100;2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100;
3.宁夏大学农学院,宁夏银川 752100)

摘要:北方日光温室生产中蔬菜频繁出现营养失调,导致产量、品质明显下降,为探明番茄养分失调是否与蒸腾受到抑制有关,通过2个水培试验分别研究了短期(24 h)及长期(24 d)喷施蒸腾抑制剂对中杂9号和改良毛粉两个番茄品种蒸腾、生物量和镁、钾及钙养分吸收的影响。结果表明:短期(24 h)抑制蒸腾,蒸腾量减少20.6%、镁吸收量减少4.5%,蒸腾与番茄镁吸收呈显著正相关关系;长期(24 d)喷施蒸腾抑制剂减少了番茄生长量、光合速率,蒸腾量减少47.5%时镁吸收量减少17.1%,钾、钙吸收量分别减少12.9%和44.1%,不同番茄品种间对钾、钙、镁的吸收无显著差异。可见,抑制蒸腾减少番茄对镁、钾、钙的吸收。北方日光温室冬茬栽培中高湿、寡照等不良环境因子会诱导番茄营养失调症的发生。

关键词:抑制蒸腾;番茄;钾;钙;镁;吸收;生长

中图分类号:S641.2 **文献标志码:**A

Effect of anti-transpiration on growth and magnesium, potassium and calcium uptake in tomato plant

LI Hui-xia^{1,2,3}, LIU Yan^{1,2}, CHEN Zhu-jun^{1,2}, ZHOU Jian-bin^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwestern China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 752100, China)

Abstract: It is well known that nutrition disorder reduces yield and quality of tomato in solar greenhouses in northern China. This study investigated the effect of transpiration on uptake and transport of magnesium (Mg), potassium (K), and calcium (Ca) in tomato plants. Two independent hydroponic experiments with different time periods (24 h and 24 d) were set up to evaluate the effect of spray application of a transpiration inhibitor on the growth and Mg uptake of two tomato cultivars (Zhongza 9 and Gailiangmaofen). The short term (24 h) results showed that after spraying transpiration inhibitor, the transpiration and Mg uptake of tomato decreased by 20.6% and 4.5%, respectively, and it was positively correlated with transpiration and Mg absorption. After 24 d of spraying transpiration inhibitor, the growth and photosynthetic rate decreased, and decrease in the transpiration and Mg uptake of tomato was 47.5% and 17.1%, respectively. Meanwhile, K and Ca uptake were also reduced by 12.9% and 44.1%, respectively. In conclusion, inhibiting transpiration reduced Mg, K, and Ca uptake and transport in tomato plants. Adverse environmental factors such as high humidity and weak sunlight will induce nutrition disorder in tomato plants in greenhouses in northern China.

Keywords: inhibiting transpiration; tomato; potassium; calcium; magnesium; uptake; growth

蒸腾是植物体内水分以气态方式向外界散失的过程,是植物吸收水分的主要驱动力,也是影响

矿质养分吸收的主要因素^[1]。一般光照充足、温度较高、湿度较低且有一定风速能够提高植物蒸腾量,促进植物对矿质养分的吸收^[2]。蒸腾是养分以质流方式向根表迁移的主要动力^[3]。以质流为主要迁移方式的离子,离子由介质向根表迁移过程明显受蒸腾作用影响,如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 等^[4-5];而以扩散为主要方式的离子受蒸腾影响较小,如 K^+ 、 NH_4^+ 等^[6]。

蒸腾也是养分在木质部长距离运输的主要驱动力,蒸腾作用降低,养分在木质部运输速率就会明显减缓。当猕猴桃叶片水分蒸腾量减少 77.1% 时,木质部汁液流速减少 40%~50%^[7]。蒸腾对木质部养分运输的影响程度与养分种类有密切关系,高蒸腾强度对木质部 K^+ 运输速率影响不大,但能大幅度提高 Ca^{2+} 的运输速率^[8]。矿质营养随着蒸腾流从根外进入植物的不同器官中,但矿质营养的移动与蒸腾流并不同步,一般以质外体运输为主的养分受蒸腾作用影响较大,而以共质体运输为主的养分则受影响较小。蒸腾对养分吸收的影响程度与养分种类密切相关,当蒸腾速率减少 75% 时,红辣椒果实中钾、钙、镁元素的含量分别减少 3.29%、47.3% 和 20.0%^[3,9]。同一养分由于存在状态不同受蒸腾对其影响也不同,铵态氮与蒸腾无关,而硝态氮与蒸腾关系密切^[10],蒸腾对 Ca^{2+} 的影响远大于螯合态钙^[11-13]。目前蒸腾与钙吸收关系的研究较多,而与镁、钾吸收关系的研究相对较少。本研究以北方日光温室主栽的番茄品种为试材,研究抑制蒸腾对番茄镁、钙、钾吸收的影响,为生产中解决营养失调问题提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2017 年 4—6 月在西北农林科技大学科研温室与资源环境学院水培实验室进行。供试番茄 (*Solanum Lycopersicum* L.) 品种为北方日光温室主栽的番茄品种 (中杂 9 号 (ZZ) 和改良毛粉 (MF))。种子经消毒、清水浸泡,均匀播于 72 孔育苗穴盘内,7~10 d 后出苗,育苗期间浇灌全营养液 (山崎番茄配方)。培育 35 d 后挑选长势均一的幼苗,用去离子水洗根并用滤纸吸干根表面水分,称重并再次根据地上部和根系长势挑选相对均一的植株用于试验。

试验中培养液采用山崎配方,除不同处理离子浓度不同外,其它离子浓度完全相同。营养液中其它元素浓度为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 354 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 76 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Na}_2\text{Fe-EDTA}$ 16 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、

H_3BO_3 1.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.72 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.09 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mg}_7\text{O}_{12}$ 0.01 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,用去离子水配制培养液。用 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 和 HNO_3 调节培养液,使其 pH 值在 6.5 左右;并监测培养液电导值 ($<1.2 \text{ ds} \cdot \text{m}^{-1}$)使其符合水培条件。

试验中蒸腾抑制剂 (VG) 由郑州劳恩格润生物有限公司生产,主要成分为氯乙烯二十二醇,属物理性膜型蒸腾抑制剂。

1.2 试验设计与样品采集

(1) 喷施蒸腾抑制剂对不同品种番茄短期的影响:试验设喷施蒸腾抑制剂 (喷蒸腾抑制剂 VG 或喷去离子水 CK) 及番茄品种 (中杂 9 号和改良毛粉) 2 个因素,组成 4 个处理,每处理重复 5 次。试验在科研温室进行,将准备好的番茄幼苗,洗根后用全山崎营养液配方 1/8 浓度的营养液预培养 1 周,使其根系恢复,按处理将 4 株番茄苗作为一组放入装有全山崎营养液配方 1/4 浓度的营养液 300 mL 的黑色三角瓶内。分别于上午 7:00 喷施蒸腾抑制剂 ($v_{\text{抑制剂}} : v_{\text{水}} = 1 : 1000$) 和等量去离子水,喷施后于 3、6、9、12、24 h 测定营养液中 Mg^{2+} 浓度与番茄水分蒸腾量。

(2) 喷施蒸腾抑制剂对不同品种番茄长期的影响:试验处理与环境条件与试验 1 相同,培养期间每隔 8 d 按 (1) 中的方法喷施蒸腾抑制剂和等量去离子水,共喷施 3 次。将两个品种番茄苗定植于 4L 的黑色水培盆内,每盆定植两株,每隔 6 d 更换 1 次营养液,前 12 天用全山崎营养液配方 1/4 浓度的营养液培养,后 12 d 用 1/2 营养液培养,共培养 24 d。收获前测定株高、茎粗、光合参数;按处理将植株分为根和地上部,称其干、鲜重并测定番茄不同部位镁、钾和钙浓度。

1.3 测定项目及方法

蒸腾量采用称重法测定;株高、茎粗分别采用刻度尺及游标卡尺测定;植株生长速率 = (处理后鲜重 - 处理前鲜重) / 处理天数;含水率采用烘干法。

光合参数测定:培养至 22d 时,在上午 9:00—11:30 用 LI-6400 便携式光合仪 (LI-6400, LI-COR; Lincoln, NE, USA) 测定植株顶端完全展开叶片的光合速率,3 个重复。测定室内 IRGA (Infrared gas analyzer) 的设置条件为:光照强度 1 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度 380 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,相对湿度 60%,温度 27 $^{\circ}\text{C}$ 。

养分吸收量 = 干物质生物量_{地上部} × 养分浓度_{地上部} + 干物质生物量_{根系} × 养分浓度_{根系}

吸收液(试验1)稀释并加入掩蔽剂(LaCl_3)后待测。植株样品待试验结束后,立即取出植株,去离子水冲洗后剪下根部,用滤纸吸干根系表面附着的水分并立即称鲜重,并将根系置于 105°C 烘箱杀青30 min后, 70°C 烘干至恒重,记录干重。样品粉碎并过80目筛装瓶备用。样品经碳化、 550°C 下于马福炉灰化6 h后,用20 mL 1:1(体积比)硝酸消解、冲洗,并用水定容,稀释并加入掩蔽剂(LaCl_3)待测。

吸收液镁浓度及植株镁、钙浓度采用不同标准曲线用原子吸收光谱仪(Z-2000, ICP-AES, 日产, 燃烧器高度7.5 mm、波长285.2 nm)测定。钾浓度采用火焰光度计测定。

1.4 数据处理

用Excel 2007制作图表,用SAS V8进行统计分析, Duncan's 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

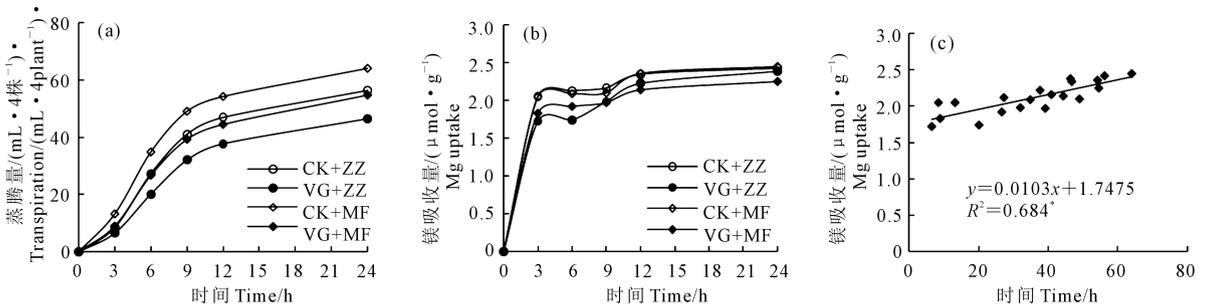
2.1 蒸腾抑制剂对番茄短期蒸腾量及镁吸收的影响

喷施蒸腾抑制剂24 h内对番茄蒸腾量、镁吸收量有显著影响(图1)。图1a表明,喷施蒸腾抑制剂

明显抑制了番茄地上部蒸腾量,与CK相比喷施蒸腾抑制剂后平均蒸腾量减少20.6%;改良毛粉蒸腾量高于中杂9号,但品种间差异不显著。从番茄对镁的吸收量结果可看出(图1b),喷施蒸腾抑制剂后两个番茄品种对镁的吸收量均低于CK,喷施蒸腾抑制剂后镁吸收量平均减少4.5%;两种番茄品种对镁的吸收无显著差异。喷施蒸腾抑制剂和品种两因素对蒸腾量、镁吸收量无显著交互效应($p=0.615$)。蒸腾量与镁吸收相关关系表明(图1c),蒸腾与镁吸收有显著相关关系($R^2=0.684^*$),但镁吸收量随蒸腾变化的幅度较小,蒸腾量减少88.4%,镁吸收量仅减少28.9%。

2.2 蒸腾抑制剂对番茄生长及生物量形成的影响

表1表明,喷施蒸腾抑制剂24 d后显著影响了番茄生长,与CK相比喷施蒸腾抑制剂后株高、茎粗和植株生长速率分别减少23.9%、11.6%和46.3%;同时番茄生物量也明显降低,地上部、根系、总生物量分别减少38.3%、29.9%和37.7%。两个番茄品种间各生长指标无显著差异,喷施蒸腾抑制剂与品种也无显著交互效应。



注:CK、VG 分别代表对照和喷施蒸腾抑制剂;ZZ、MF 分别代表番茄品种中杂9号和改良毛粉。下同。

Note: Control and spraying transpiration inhibitor was indicated as CK and VG, tomato cultivar Zhongza No.9 and Gailiangmaofen was indicated as ZZ and MF. The same below.

图1 喷施蒸腾抑制剂对番茄蒸腾及镁吸收的影响

Fig.1 The effect of spraying transpiration inhibitor on transpiration and Mg uptake of tomato

表1 喷施蒸腾抑制剂对番茄生长的影响

Table 1 The effect of spraying transpiration inhibitor on tomato growth

处理 Treatment	中杂9号 Zhongza No.9		改良毛粉 Gailiangmaofen	
	CK	VG	CK	VG
地上部含水率 Water content in shoot/%	90.5	90.4	90.3	90.6
株高 Height/cm	47.4±1.14a	36.8±1.92b	49.0±2.23a	36.6±2.13b
茎粗 Diameter/mm	7.08±0.12a	6.51±0.22b	7.14±0.13a	6.06±0.84b
植株生长速率 Growth rate/(g · d ⁻¹)	2.70±0.22a	1.50±0.19b	2.51±0.31a	1.30±0.20b
地上部生物量 Shoot biomass/g	5.64±0.52a	3.71±0.28b	5.53±0.46a	3.18±0.34b
根系生物量 Root biomass/g	0.53±0.07a	0.31±0.05b	0.44±0.11a	0.37±0.06a
总生物量 Total biomass/g	6.17±0.55a	4.02±0.31b	5.97±0.57a	3.54±0.38b

注:同行同一指标数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same line indicate significant difference at $P<0.05$.

2.3 蒸腾抑制剂对番茄叶片光合特性的影响

喷施抑制剂 24 d 后光合速率 (P_n)、胞间二氧化碳浓度 (C_i)、气孔导度 ($Cond$)、蒸腾速率 (Tr) 均明显下降,抑制蒸腾对气孔导度 ($Cond$) 和蒸腾速率 (Tr) 影响最大,二者分别减少 38.1%、26.6%,总蒸腾量减少 47.5% (表 2)。两个品种间气孔导度有显著差异,改良毛粉高于中杂 9 号;品种间其它各指标无显著差异,喷施抑制剂和品种也无显著交互效应。

2.4 抑制蒸腾对番茄养分吸收的影响

由表 3、表 4 可以看出,喷施蒸腾抑制剂 24 d 后

番茄不同部位镁、钾和钙吸收量显著减少,与 CK 相比,镁、钾和钙总吸收量分别减少 17.1%、12.9% 和 44.1%;地上部镁、钾和钙吸收量分别减少 17.2%、12.8% 和 44.3%,可见,抑制蒸腾显著抑制了番茄对镁、钾及钙的吸收。喷施蒸腾抑制剂对中杂 9 号和改良毛粉吸收镁、钙无显著差异,但对钾吸收的影响不同,中杂 9 号钾吸收量显著高于改良毛粉,说明中杂 9 号在钾吸收过程中受蒸腾影响较小。喷施蒸腾抑制剂与品种间对镁、钙吸收无交互效应,但对钾吸收有显著交互效应。

表 2 喷施蒸腾抑制剂对番茄光合特性及蒸腾量的影响

Table 2 The effect of spraying transpiration inhibitor on photosynthetic and transpiration of tomato

品种 Variety	处理 Treatment	光合速率 $P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	气孔导度 $Cond/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	蒸腾速率 $Tr/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	蒸腾量 TP/mL
中杂 9 号 Zhongza No.9	对照 (CK)	10.79a	0.53b	9.33a	1485.92a
	喷抑制剂 (VG) Spraying transpiration inhibitor	8.86b	0.38c	6.92b	844.12b
改良毛粉 Gailiangmaofen	对照 (CK)	10.80a	0.65a	9.54a	1480.09a
	喷抑制剂 (VG) Spraying transpiration inhibitor	8.47b	0.35c	6.90b	712.84b

注:同列同一指标数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$.

表 3 喷施蒸腾抑制剂对番茄镁、钾和钙吸收的影响/($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)

Table 3 The effect of spraying transpiration inhibitor on Mg, K, and Ca uptake of tomato plants/($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$)

养分 Nutrient	部位 Position	中杂 9 号 Zhongza No.9		改良毛粉 Gailiangmaofen	
		CK	VG	CK	VG
Mg	地上部 Shoot	24.60±2.32a	20.70±0.92b	23.50±0.99a	19.10±1.51b
	根系 Root	1.40±0.11b	1.10±0.16b	2.27±0.62a	1.93±0.31a
	总量 Total	26.00±1.11a	21.80±0.93b	25.70±1.47a	21.10±1.47b
K	地上部 Shoot	231±11.00a	215±15.60b	227±6.00ab	184±4.01c
	根系 Root	27.80±2.57a	20.60±3.07b	23.90±3.45ab	23.80±3.73ab
	总量 Total	258±6.73a	236±14.50b	251±10.70a	207±6.17c
Ca	地上部 Shoot	198±8.62a	109±5.96b	191±5.46a	108±4.68b
	根系 Root	4.84±0.70a	2.27±0.30c	4.35±0.75ab	3.82±0.40b
	总量 Total	203±9.81a	111±14.40b	195±9.09a	112±14.40b

注:表中数字为均值±标准差,同行同一指标数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Mean±sd. Different letters in the same line indicate significant difference at $P < 0.05$.

表 4 蒸腾抑制剂、品种及两者交互对番茄养分吸收的影响/($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)

Table 4 The effect of spraying transpiration inhibitor, cultivar and their interaction on nutrient uptake of tomato/($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$)

处理 Treatment	地上部 Shoot			总量 Total			
	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	
蒸腾 Transpiration	对照 (CK)	24.01a	228.8a	194.4a	25.84a	254.6a	199.0a
	喷抑制剂 (VG) Spraying transpiration inhibitor	19.89b	199.4b	108.2b	21.41b	221.6b	111.3b
品种 Cultivar	中杂 9 号 (ZZ) Zhongza No.9	22.62a	222.9a	153.4a	23.86a	247.1a	156.9a
	改良毛粉 (MF) Gailiangmaofen	21.29a	205.3b	149.2a	23.89a	229.1b	153.4a
交互 F 值 Interaction F -value	0.702	0.011 *	0.159	0.677	0.049 *	0.304	

注:同列同一因素后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), * 表示达显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$), * indicates significant difference at 5% level.

3 讨论

3.1 蒸腾与番茄生长及生物量的关系

本研究当蒸腾被抑制时番茄生长明显受抑、生物量减少。这是由于植物水分蒸腾主要通过气孔以气体形式散失,气孔是植物叶片与外界气体交换的主要通道^[14-15],本研究中喷施的蒸腾抑制剂属膜型蒸腾抑制剂,喷施后叶片表面部分气孔被封闭,因此叶片蒸腾量会减少,同时气孔也是 CO₂ 进出的通道,由于气孔封闭气体交换量相应减少,本研究中当蒸腾量减少 47.5% 时,气孔导度也减少 62%,气体交换量减少引起番茄 CO₂ 同化速率的下降,有机物形成量减少^[16],因此番茄株高、茎粗及生物量均有下降。其次,蒸腾间接影响番茄生长。当植物蒸腾被抑制时,植物对钙的吸收量显著减少,植物生长点能够到达的钙就会减少,缺钙致使细胞壁形成减缓,细胞分裂受限,严重者可导致生长点死亡^[17],因此番茄生长会延缓。在其它研究中喷施蒸腾抑制剂后,番茄^[18-19]、秋海棠^[20]、毛枣^[21]等蒸腾明显受到抑制,而光合速率、生物量、产量等参数均有不同程度提高。本研究结果与此完全不同,原因在于这些研究是在干旱条件下,植物体内蒸腾量远大于水分吸收量,植物处于缺水或脱水状态,当喷施蒸腾抑制剂后,蒸腾量明显降低,植物体内水分处于平衡状态,植物由缺水胁迫转入正常生长状态,因此除蒸腾外其它生长参数均有显著提高。而本研究是在水培条件下,番茄体内水分充足,吸水与蒸腾达平衡状态,当抑制蒸腾后,减缓了植物的代谢过程,因此各生长参数降低。

3.2 蒸腾对番茄植株养分吸收的影响

本研究通过喷施蒸腾抑制剂后镁、钾、钙吸收量均显著减少。矿质养分在木质部运输的主要动力是蒸腾作用,因此蒸腾速率降低的同时矿质养分吸收量也会减少,但不同矿质离子减少的程度不同。在本研究中当蒸腾减少 47.5% 时,镁吸收量减少 17.1%,而钾、钙分别减少 12.9% 和 44.1%。镁随蒸腾流进入植物体并向地上部运输过程中,既受根部跨膜过程中载体特性的影响,同时在木质部上行过程中也会在筛管周围薄壁细胞处发生吸附解析作用^[22]。钾与镁吸收、运输途径相似,但钾因其较小的水合半径,在跨膜吸收和木质部运输中具有较大的优势,因此抑制蒸腾对钾吸收的影响小于镁。

钙吸收、运输与镁不同,钙在植物体内移动性较差,植物对钙的吸收属被动过程,吸收量的多少很大程度上决定于蒸腾,因此在本研究抑制蒸腾后对钙吸收的抑制程度最大^[23]。钾、镁同属移动性较强的元素,当蒸腾受抑时,蒸腾引起木质部运输量的减少将通过韧皮部的大量运输得到补充^[24],因此钾、镁受蒸腾抑制程度小于钙。

本研究表明了在营生长期番茄植株蒸腾受到抑制后,由于生长必需的营养元素钾、钙、镁吸收量减少,导致番茄代谢过程减缓,各生长参数显著降低。尽管试验未培养到生殖生长阶段,但由于前期植株体内养分储备不足、代谢缓慢,必然影响番茄后期花蕾形成、果实膨大,因此蒸腾受抑将会导致果实产量、品质降低。因此在日光温室生产中,尤其在秋冬茬栽培时,低温、雾霾、温室内空气湿度过大等影响蒸腾的因素均会影响作物生长及作物对养分的吸收。

4 结论

蒸腾是养分在植物体内运输的主要驱动力,本研究通过喷施蒸腾抑制剂抑制蒸腾后,发现番茄对镁、钾、钙等养分的吸收量显著减少,不同养分离子受蒸腾抑制程度不同,钙钾镁受蒸腾影响的程度为钙>镁>钾。因此,北方日光温室冬茬栽培番茄营养失调与温室内高湿、寡照等不良环境因素有关。

参考文献:

- [1] 张萍,刘林德,柏新富,等.不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系[J].生态学报,2012,32(11):3432-3439.
- [2] 李霞.设施蔬菜蒸腾调控机理与方法的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [3] Marschner H. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. London: Academic press,2011.
- [4] Rehm G W, Sorensen R C. Effects of potassium and magnesium applied for corn grown on an irrigated sandy soil[J]. Soil Science Society of America Journal,1985,49:1446-1450.
- [5] 李文卿,陈顺辉,谢昌发,等.烟田土壤养分迁移规律研究II中微量元素迁移规律[J].中国烟草学报,2004,10:17-21.
- [6] Bradbury I K, Malcolm D C. The effect of phosphorus and potassium on transpiration, leaf diffusive resistance and water-use efficiency in Sitka spruce (*Picea sitchensis*) seedlings[J]. Journal of Applied Ecology,1977,14:631-641.
- [7] Morgan M A, Jackson W A. Calcium and magnesium in ryegrass some differences in accumulation by roots and in translocation to shoots[J]. Plant and Soil,1976,44:623-637.
- [8] Xiloyannis C, Celano G, Montanaro G, et al. Water relations, calcium and potassium concentration in fruits and leaves during annual growth

- in mature kiwifruit plants[J]. *Acta Horticulturae*,2001,564:129-134.
- [9] Gardner RC. Genes for magnesium transport[J]. *Current Opinion in Plant Biology*,2003,6:263-267.
- [10] Matimati I, Verboom G A, Cramer M D. Nitrogen regulation of transpiration controls mass-flow acquisition of nutrients[J]. *Journal of experimental botany*,2013,65:159-168.
- [11] 马建军,张立彬,刘玉艳,等.野生欧李生长期组织器官中不同形态钙含量的变化及其相关性[J].*园艺学报*,2008,35:631-636.
- [12] 丁双双,李燕婷,袁亮,等.小分子有机物螯合钙肥对樱桃番茄产量、品质和养分吸收的影响[J].*中国土壤与肥料*,2015,05:61-66.
- [13] White P J. The pathways of calcium movement to the xylem[J]. *Journal of Experimental Botany*,2001,52:891-899.
- [14] Lawson T, Blatt M R. Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency[J]. *Plant Physiology*,2014,164:1556-1570.
- [15] Buckley T N. Stomatal responses to humidity: has the 'black box' finally been opened? [J]. *Plant, cell & environment*, 2016, 39: 482-484.
- [16] Engineer C B, Hashimoto-Sugimoto M, Negi J, et al. CO₂ sensing and CO₂ regulation of stomatal conductance: advances and open questions[J]. *Trends in Plant Science*,2016,21:16-30.
- [17] Suzuki M, Umeda H, Matsuo S, et al. Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production[J]. *Scientia Horticulturae*,2015,187:44-49.
- [18] 李亚灵,Cecilia Stanghellini. 温室蒸腾控制对高盐分下番茄生产的影响[J].*农业工程学报*,2001,17:85-89.
- [19] 苏淑芳,陈彦伟.湿度对蔬菜生长的影响及调节措施[J].*河南农业*,2013,3:40-40.
- [20] 李景秀,管开云,李宏哲.湿度对变色秋海棠植株生长的调节作用[J].*广西植物*,2005,25:161-163.
- [21] 姚全胜,雷新涛,苏俊波,等.喷施蒸腾抑制剂对毛叶枣叶片光合参数的影响[J].*热带作物学报*,2009,30:131-134.
- [22] Tromp J, Vuure J. Accumulation of calcium, potassium and magnesium in apple fruits under various conditions of humidity [J]. *Physiologia Plantarum*,1993,89:149-156.
- [23] Karley A J, White P J. Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium [J]. *Current Opinion in Plant Biology*,2009,12:291-298.
- [24] Cakmak I, Hengeler C, Marschner H. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants [J]. *Journal of Experimental Botany*,1994,45:1251-1257.

(上接第 110 页)

- [4] Tucker S P, Millson M B, Dollberg D D. Determination of polyacrylate super absorbent polymers in air[J]. *Analytical Letters*, 1993, 26(5): 965-980.
- [5] Rezashateri M, Khajeddin S J, Abedi-koupai J, et al. Growth characteristics of *Artemisia sieberi* influenced by super absorbent polymers in texturally different soils under water stress condition [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*,2016,63(7):984-997.
- [6] E1-Asmar J, Jaafar H, Bashour I, et al. Hydrogel banding improves plant growth, survival, and water use efficiency in two calcareous soils [J]. *GLEAN-Soil, Air, Water*,2016,45(7):1700251.
- [7] Yang L X, Yang Y, Chen Z, et al. Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering [J]. *Ecological Engineering*,2014, 62: 27-32.
- [8] Cao Y B, Wang B T, Guo H Y, et al. The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the Loess Plateau [J]. *Ecological Engineering*,2017,102:270-279.
- [9] Xiang X J, Li Q. Study on drought resistance engineering with certain engineering materials and improved information diffusion [J]. *Advanced Materials Research*,2013,2250(648):373-375.
- [10] Krauth D M, Bouldin J L, Green V S, et al. Evaluation of a polyacrylamide soil additive to reduce agricultural-associated contamination [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*,2008, 81(2):116-123.
- [11] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 I:入渗[J].*土壤学报*,2003,(2):178-185.
- [12] 黄震,黄占斌,李文颖,等.不同保水剂对土壤水分和氮素保持的比较研究[J].*中国生态农业学报*,2010,18(2):245-249.
- [13] 罗在波,魏世强,滕玲玲.聚丙烯酰胺对紫色土氮素淋溶特征的影响[J].*土壤通报*,2009,40(3):585-589.
- [14] 雷廷武,唐泽军,张晴雯,等.聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究II:侵蚀[J].*土壤学报*,2003,40(3):401-406.
- [15] 杜建军,苟春林,崔英德,等.保水剂对氮肥挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J].*农业环境科学学报*,2007,26(4):1296-1301.
- [16] 李虎军,王全九,陶汪海,等.不同改良剂对黄土坡耕豆地水土及氮磷流失的影响[J].*中国水土保持科学*,2017,15(6):117-125.
- [17] 王辉,王全九,邵明安.PAM对黄土坡地水分养分迁移特性影响的室内模拟试验[J].*农业工程学报*,2008,24(6):85-88.