

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.020

# 高压静电场对水培番茄生理指标与产量的影响\*

李美清<sup>1</sup> 吴沿友<sup>1,2</sup> 李青林<sup>1</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

**摘要:** 为探讨高压静电场对水培番茄生理生化指标与产量的影响规律, 阐明影响机理, 将番茄幼苗放入平行板电极的2个极板间并施加2.00、2.25、2.50 kV/cm 3种不同强度的高压静电场8 h, 然后将电场处理后的幼苗在温室采用无机基质和营养液模式培养, 同时对茎粗、鲜质量、叶绿素含量、根系形态特征、生长期、膜透性、离子浓度变化和果实最终产量进行测试分析, 结果表明: 与不加电场的对照相比, 营养液栽培高压静电场处理改变了番茄的生长特性, 且强度为2.25 kV/cm的电场对茎粗、鲜质量、叶绿素含量、根系形态的促进效果最优, 基质栽培中2.25 kV/cm的电场处理后产量提高了23%。

**关键词:** 高压静电场 番茄 生理指标 产量

**中图分类号:** O441.1; S129 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0145-06

## Influence of High Voltage Electrostatic Field on Physiological Indexes and Yield of Hydroponic Tomato

Li Meiqing<sup>1</sup> Wu Yanyou<sup>1,2</sup> Li Qinglin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agriculture Equipment and Techenology, Ministry of Education,

Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry,

Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** In this paper, high voltage electrostatic field (HVEF) was applied to agricultural production. The experimental equipment of HVEF was designed. To explore the effect of HVEF on physiological characteristics and yield of hydroponic tomato, illustrate the influence mechanism of HVEF on the tomato seedlings, tomato seedlings were cultivated in greenhouse. The seedlings with two true leaves and the same height were transplanted to experimental lab and gone on the treatment of HVEF. The seedlings were cultivated in nutrient solution mode. Three different high voltage electrostatic fields of 2.00, 2.25, 2.50 kV/cm were adjusted and the seedlings between the two parallel-electrode plates were treated under this condition for 8 h. After finishing the treatments of HVEF, some of the seedlings were continued to be cultured by using of inorganic matrix and nutrient solution culture in greenhouse. Then, the stem diameter, fresh weight, chlorophyll content and root morphological characteristics of tomato seedlings, as well as ultimate yield of tomato were studied. In addition, root activities and membrane permeability of other seedlings, and the changes of ion concentration of uptake solution as soon as HVEF treatment was finished, were analyzed. The results show that the high voltage electrostatic field, compared with the control (without electric field), changes the growth characteristics of tomato, and the electric field intensity of 2.25 kV/cm increases stem diameter, fresh weight and chlorophyll content, and promotes the effect of the optimal root morphology. As a result, the yield is increased by 23% in contrast with the control.

**Key words:** High voltage electrostatic field Tomato Physiological index Yield

收稿日期: 2015-07-10 修回日期: 2015-09-18

\* 国家自然科学基金资助项目(31401268)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号)

作者简介: 李美清, 讲师, 主要从事植物营养与检测技术研究, E-mail: lmqljy@163.com

## 引言

番茄是我国温室的主要经济作物之一,随着我国粮食丰产计划的推进,为确保蔬菜的优质、高效生产、提高投入产出比,推进传统农业向现代农业跨越,亟需用现代农业科技改造传统农业,积极探索和推广新的栽培模式。电栽培技术某种程度上能够促进作物生长、增产和提高作物品质<sup>[1]</sup>。作为电栽培技术之一的高压静电场(High voltage electrostatic field, HVEF)目前在促进种子发芽方面进行了大量研究,研究表明高压电场可促进种子的发芽率<sup>[2-5]</sup>。通过对油菜<sup>[6]</sup>、黄瓜<sup>[7]</sup>种子的处理,结果表明,HVEF可促进种子的发芽率,影响酶的活性;枣椰树种子研究结果表明随静电场强的增强和处理时间的延长,Ca、Mg、Mn、Fe、Na、K和Zn离子含量增加,而P含量降低<sup>[8]</sup>。

邓鸿模等<sup>[9]</sup>对番茄每天施加65 kV/m高压电场4 h,结果表明经电场处理的试验组比对照组的株高和茎粗分别增加12.5 cm和0.3 cm,开花率、座果率和产量分别提高38.9%、40.2%和21%,产量大幅度提高,但没有对其中涉及的生物学效应进行解释。温尚斌等<sup>[10]</sup>通过对水萝卜施加75 kV/cm的电场(每天4 h,共处理7 d)并测定静电场下放射性同位素<sup>32</sup>P和其它8种无机离子在植物体与生长环境中的分布,证明了静电场能促进植物生长,增强代谢活性并能促进根部对离子的吸收,静电场促进植物对离子的吸收与静电场作用下的离子移动有关。

关于电场对植物生物学效应的机理,大多集中在电场对酶活性的影响,特别是水解酶类和清除自由基的酶类<sup>[11]</sup>。

上述情况表明,高压电场在种子方面的研究较多且比较成熟,但高压静电场对幼苗生理指标及产量影响尚未得到一个完整的解释。为此,本文通过对水培番茄幼苗施加不同强度的高压静电场,并通过测定茎粗、鲜质量、叶绿素含量、根系形态特征和果实最终产量,结合电场对通道蛋白、膜透性和离子吸收的影响,旨在解析高压静电场对水培番茄生理指标及产量的影响机理,为电场幼苗处理技术在番茄高产栽培中的应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 测试幼苗培养

番茄种子选用上海长征粉果“合作908”,取大小一致的种子,用0.1%的HgCl<sub>2</sub>消毒30 min,将消毒后的种子排于铺有双层滤纸的培养皿并置于25℃的恒温培养箱内催芽32 h,然后将催芽后的种

子播于育苗盘内,采用珍珠岩和蛭石混合基质,28/20℃(昼/夜)、光照强度800~1 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s),光照时间每天14 h。待黄瓜出苗后,每隔2 d用1/2 Hoagland营养液浇灌1次。待长出2片真叶后,选择大小接近的幼苗,将根部携带的基质洗净后,转移到盛有山崎番茄营养液的烧杯在培养室培养。为确保培养期间,营养液pH值保持不变,每隔1 d对pH值进行调节,每2 d对营养液进行更换。将每10株幼苗放入一个烧杯并在杯口用海绵和带孔的泡沫塑料固定。

### 1.2 试验装置结构

高压静电场处理装置结构如图1所示。HVEF处理装置由BGG型直流高压发生器和HVEF处理室组成。高压发生器的输出电压可通过与其配套的数字控制器在0~100 kV之间连续可调。HVEF处理室为立方体,包括2个φ500×1.5的圆形不锈钢电极板、补光装置、反光装置、极板间距调节装置、绝缘板、放电棒及框架组成。不锈钢电极板中的上极板通过其中心焊接的螺母与极板间距调节装置连接,下极板通过绝缘支座固定在HVEF处理室的底部,用于放置待测试幼苗。极板间距调节装置由两端有内螺纹孔的高压绝缘棒、两端有外螺纹的螺杆和调节螺杆螺母结构组成,用于调节两极板间距,进而在不改变高压发生器输出电压情况下,调节电场强度,另外随着植物的生长或植株高度不同时,为了防止两极板与植物枝叶之间发生放电现象,需要不断调节两极板之间的距离。补光装置由可在竖直和水平方向调节的两排相对的植物生长灯组成,每排包括4个可单独开关的灯,以调节光强,满足番茄生长需要。为了提高光强,在两排灯的外侧设置有大小一致的镜面玻璃。为使作物生长时获得充足的空气,在HVEF处理室组成侧面的上部设置有通风窗。将高压发生器的输出电压加到2个电极板即可在电极板间形成一个连续可调、场强均匀的高压静电场。高压静电场实物装置如图2所示。

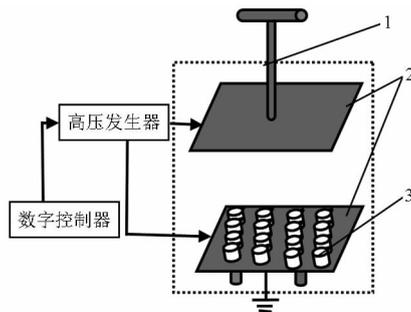


图1 试验装置结构示意图

Fig. 1 Diagram of experimental device

1. 极板间距调节装置 2. 电极板 3. 幼苗

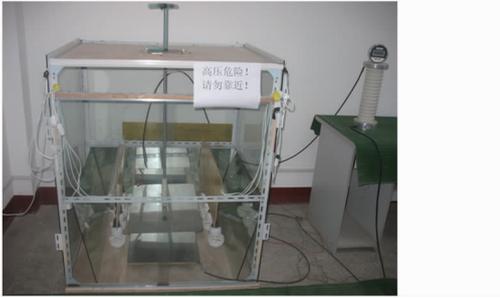


图 2 试验装置实物图

Fig. 2 Experimental device of HVEF

### 1.3 高压静电场处理

通过前期大量预备试验证明,在处理 8 h 内,高压静电场强过高(超过 2.5 kV/cm)抑制吸收,而过低(低于 2.0 kV/cm)不利于养分吸收。所以本试验在预备试验的基础上,设置 3 个合适吸收的电场处理组 T1、T2、T3 和对照组 CK,对应场强分别为 2.00、2.25、2.50 kV/cm 和 0 kV/cm,每个处理 10 株苗,重复 3 次。考虑养分吸收的关系,每个处理的时间选择为 8 h。

### 1.4 测定项目与方法

茎粗、株高用游标卡尺测量,冠根比、鲜质量和果实质量用精度为 0.01 g 的电子秤测量,叶绿素含量通过 SPAD502 型叶绿素测定仪测量。

## 2 结果与分析

将电场处理组和对照组处理后的番茄幼苗分别划分为 2 组,1 组用正常营养液继续培养 20 d,进行生理指标和机理的分析,另 1 组移栽到温室采用珍珠岩种植,旨在获得最终产量。

### 2.1 场强对茎粗、株高、鲜质量及冠根比的影响

HVEF 对番茄幼苗宏观指标的影响可以通过茎粗、株高、鲜质量及冠根比等指标来反映。

营养液继续培养 20 d 后,茎粗、株高的变化关系分别如图 3 和图 4 所示。

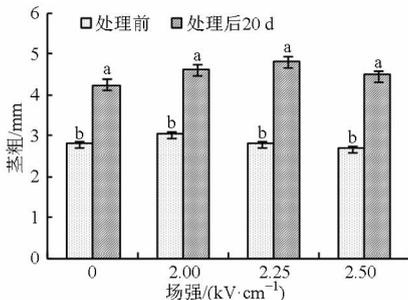


图 3 茎粗随场强的变化

Fig. 3 Influence of HVEF on diameter of stem

由图 3 可知,CK、T1、T2 和 T3 处理,茎粗分别增加了 51.7%、51.9%、73.1% 和 65.7% ( $P < 0.05$ )。这表明 2.00 kV/cm 场强对茎粗没有明显影

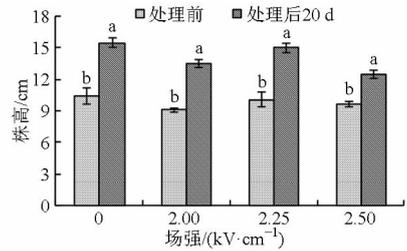


图 4 株高随场强的变化

Fig. 4 Influence of HVEF on plant height

响,2.25、2.50 kV/cm 的场强均促进了茎粗增长,且 2.25 kV/cm 的场强效果尤为明显。从图 4 可以看出,CK、T1、T2 和 T3 处理,株高分别增加了 48.4%、48.1%、48.3% 和 29.6% ( $P < 0.05$ ),T3 处理株高明显低于对照组 CK,这表明场强 2.50 kV/cm 处理对株高的增长有抑制作用。

处理后 20 d,冠根比随场强的变化如图 5 所示,随着场强的增强,冠根比呈下降趋势。这表明高压静电场对根部的影响明显高于冠层。

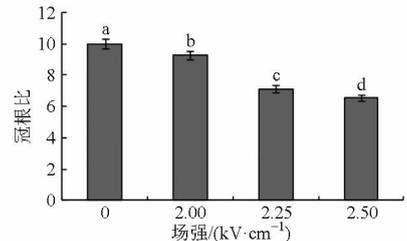


图 5 幼苗冠根比随场强的变化曲线

Fig. 5 Influence of HVEF on ratio of shoot to root

鲜质量随场强的变化如图 6 所示,经过 20 d 培养后,CK 的鲜质量增加了 7.23 g,T1、T2 处理鲜质量的增加分别为 CK 的 1.01 倍和 1.17 倍,然而,T3 处理的鲜质量增长量仅为 4.30 g,明显低于对照组。这表明适宜场强可促进鲜质量的增加,场强过高反而抑制鲜质量的增加。

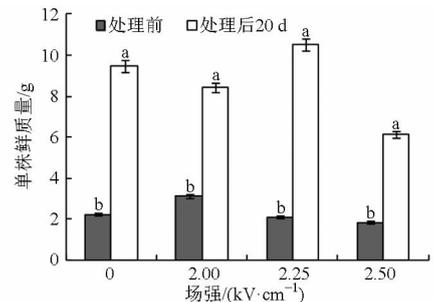


图 6 鲜质量随场强的变化

Fig. 6 Influence of HVEF pretreatment on fresh biomass of seedling

### 2.2 场强对叶绿素含量的影响

叶绿素是植物光合作用的反应中心,叶绿素含量的增加可提高叶片的光能转换率,总叶绿素含量和叶片展开度的增加有利于植物对光能的吸收和转

化,从而有利于光合作用,增加了植株光合产物的积累量,为番茄产量的提高奠定基础。叶绿素含量随场强的变化关系如图7所示。由图7可知,在20 d的培养中,和对照组相比,场强为2.25 kV/cm的电场在大部分时间(除第2天)大大提高了叶绿素含量,第14天叶绿素含量达到峰值,随后叶绿素含量逐渐降低。对于处理T1,7 d内叶绿素含量低于对照组,从第7天起,叶绿素含量缓慢上升并略高于CK。场强为2.50 kV/cm时,在20 d的培养过程中,和CK比较,叶绿素含量呈现先降低后上升的趋势。

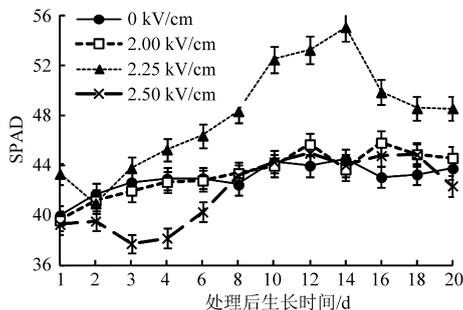


图7 不同场强的高压静电场对番茄幼苗叶绿素含量的影响

Fig.7 Influence of HVEF pretreatment on chlorophyll content of seedling

电场生物效应存在电场阈值和电场极限值,电场阈值是电场能否引起生物学效应的临界条件,而电场极限值是电场导致植物损伤的临界条件<sup>[12]</sup>。

表1 高压电场作用下番茄幼苗对氮的吸收

Tab.1 Kinetics equations and parameters of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$

| 场强<br>/(kV·cm <sup>-1</sup> ) | $\text{NH}_4^+$  |                                       | $\text{NO}_3^-$  |                                       |
|-------------------------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
|                               | $I_{\max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Fwt}^{-1})$ | $K_m/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$ | $I_{\max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Fwt}^{-1})$ | $K_m/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$ |
| 0                             | 9.09   | 2.36                                  | 6.48   | 2.14                                  |
| 2.00                          | 15.72  | 2.60                                  | 12.56  | 3.18                                  |
| 2.25                          | 23.15  | 1.95                                  | 11.47  | 3.19                                  |
| 2.50                          | 8.88   | 0.23                                  | 6.93   | 1.63                                  |

表1中,动力学参数 $K_m$ 和 $I_{\max}$ 通过Michaelis-Menten方程获得<sup>[13]</sup>

$$\frac{1}{I_n} = \frac{K_m}{I_{\max}} \frac{1}{C} + \frac{1}{I_{\max}} \quad (1)$$

式中  $I_n$ ——吸收速率

$C$ ——吸收液浓度

$I_{\max}$ 意味着幼苗的运输蛋白和吸收潜力; $\frac{1}{K_m}$ 表征根对离子的束缚能力,值越大说明根的束缚能力越强。

## 2.4 场强对根系活力的影响

高压静电场对幼苗根系活力的影响如图8所示。从图8a可以看出,在8 h暴露时间内,幼苗的

由上可断定,场强为2.25 kV/cm的静电场有助于壮苗、增加鲜质量和提高叶绿素含量,而场强为2.00、2.50 kV/cm的电场对株高和叶绿素含量作用不明显。这可能是2.00 kV/cm尚未达到电场阈值,不能促进幼苗的生长,而2.50 kV/cm的电场达到了电场生物效应的电场极限值,对酶产生了钝化,从而抑制了对养分的吸收。

## 2.3 场强对养分吸收的影响

为了查明高压静电场对茎粗、鲜质量、叶绿素含量的影响,本文从养分吸收角度对其影响机理进行了研究。这是因为养分是一切生理代谢和作物生长的基础。 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{NO}_3^-$ 吸收动力学参数如表1所示。表1表明,对于T1和T2处理, $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{NO}_3^-$ 的最大吸收速率均高于对照,另外,T3处理下的 $\text{NO}_3^-$ 的最大吸收速率 $I_{\max}$ 也高于对照。T2和T3处理,2种离子的亲和性 $\frac{1}{K_m}$ 明显高于对照(T2处理下 $\text{NO}_3^-$ 除外),T1处理下,2种离子亲和性接近于对照组。通过比较相同场强下 $\text{NH}_4^+$ 吸收和 $\text{NO}_3^-$ 吸收的亲和性发现,HVEF对 $\text{NH}_4^+$ 吸收亲和性的增加更快。这个结果表明,T1和T2处理有助于 $\text{NH}_4^+$ 吸收的转运蛋白和吸收潜力。综合以上分析,T2处理由于高的 $I_{\max}$ 和 $\frac{1}{K_m}$ 值,为促进 $\text{NH}_4^+$ 最强处理。T3为促进 $\text{NO}_3^-$ 吸收的最强处理。

根系活力(以应生成物三苯基甲(TTF)计,含量越高,说明根系活力越强)有明显变化。与对照相比, $\text{NH}_4^+$ 吸收时,处理T1和T2的根系活力分别增加了72.9%和109.4% ( $P < 0.05$ ),而处理T3的根系活力明显低于对照组。图8b表明, $\text{NO}_3^-$ 吸收时,T1、T2和T3的根系活力分别增加了14.3%、12.2%和15.3% ( $P < 0.05$ )。这可能是由于场强适宜的电场通过激活根部脱氢酶使得根系活力增大,场强过高造成了细胞膜的损伤,导致细胞液外渗,这样使得高压静电场对幼苗氮吸收的动力学参数发生了变化。

## 2.5 场强对膜透性的影响

细胞膜透性的变化常反映作物对外界因素的抵抗能力。如图9所示,随着场强的增强,膜透性逐渐

增加。这表明,适宜场强的 HVEF 可激活通道蛋白,而场强过高会使镶嵌在细胞膜上的通道蛋白受损,从而引起细胞液向外渗漏,导致氮吸收下降。

胞液相对外渗率大于 18% (T3) 时,幼苗的氮吸收下降。

图 10 为不同场强下,幼苗的根系形态变化。

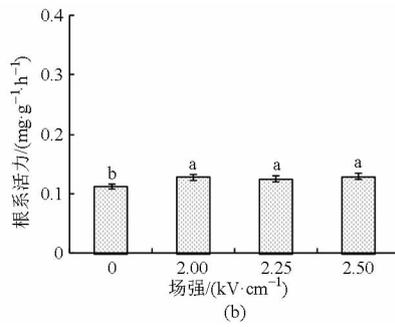
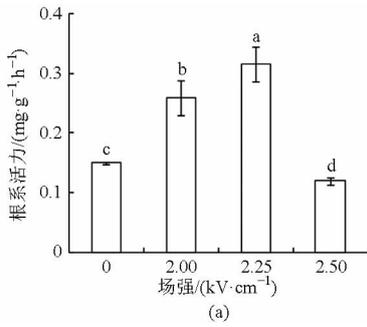


图 8 高压静电场对幼苗根系活力的影响

Fig. 8 Influence of HVEF on root activity

(a) NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (b) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

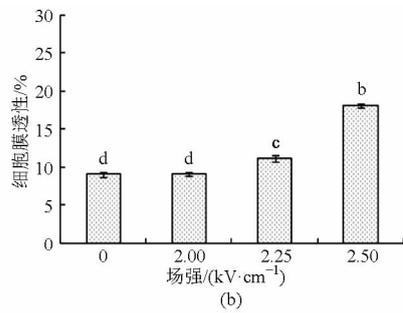
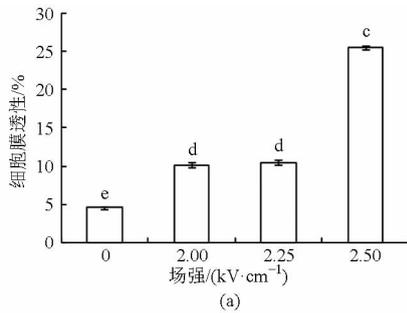


图 9 高压静电场对膜透性的影响

Fig. 9 Effect of HVEF on membrane permeability

(a) NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (b) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>



图 10 不同场强的高压静电场对番茄幼苗根系形态变化的影响

Fig. 10 Influence of HVEF pretreatment on chlorophyll content of seedling

(a) 0 kV/cm (b) 2.00 kV/cm (c) 2.25 kV/cm (d) 2.50 kV/cm

由图 10 可知,和对照及其他场强下的处理比较,经 2.25 kV/cm 电场处理的幼苗根毛数量多且苗壮,根毛区是植物吸收养分最活跃的区域,从而为作物养分吸收奠定了基础,由此可断定,场强为 2.25 kV/cm 的电场是提高根质量的最佳场强。

### 2.6 高压静电场对番茄产量的影响

产量是作物生产的最关键的目标,产量的高低往往反映了作物生产的好坏。番茄温室生产中常用基质栽培。如表 2 所示,在基质栽培中,场强 T1 对番茄产量并没有起到促进作用,而 T2 和 T3 处理对番茄产量有明显促进作用,但处理 T2 的产量增加效

果更明显,产量相比较于对照增加了 23%。

表 2 静电场对番茄产量的影响

Tab. 2 Influence of HVEF on tomato yield ( $P < 0.05$ )

| 场强<br>/(kV·cm <sup>-1</sup> ) | 0                        | 2.00                     | 2.25                     | 2.50                     |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 产量<br>/(kg·株 <sup>-1</sup> )  | 2.14 ± 0.23 <sup>a</sup> | 1.97 ± 0.19 <sup>a</sup> | 3.63 ± 0.31 <sup>a</sup> | 2.45 ± 0.27 <sup>b</sup> |

### 3 讨论

总结研究结果可见,无论从宏观指标还是生理指标来看,HVEF 对番茄植株生长的影响有很大不

同,对植株的生长存在阈值效应。植物的生长发育大部分依赖于植物细胞的营养成分吸收,而细胞膜作为细胞与周围生理环境进行物质交换的重要通道,具有极其关键的作用<sup>[12]</sup>。

由细胞膜电位的离子学说基础可知<sup>[13]</sup>,细胞膜是一种具有离子通道的半透性膜。镶嵌在膜上的通道蛋白质是细胞内部与外界环境间联系的通道。部分通道处于常开状态,离子能随时出入,不受外因控制,但部分通道一般均呈关闭状态,只有在电压、化学和机械力等外因诱导下,才处于开放状态。通道蛋白质的开放与关闭称为门控,故膜上通道有被动非门控与主动门控两类,前者总处于常开状态,后者可开可闭,其开放的概率与外界诱因有关。如图3所示,2.00 kV/cm处理下,茎粗变化幅度和对照基本相同,2.25 kV/cm处理下茎粗增加幅度较对照大幅度增加,这表明场强为2.00 kV/cm时,尚未达到常闭通道蛋白的门控值,这部分蛋白仍处于常闭状态;随着场强增加到2.25 kV/cm时,达到了主动门控蛋白的门控值,诱导主动门控蛋白开放,从而增加了细胞和外界养分交换的通道,促进了养分吸收,使得茎粗发生显著变化。然而,随着场强进一步增加,2.50 kV/cm处理下茎粗增加幅度反而低于2.25 kV/cm处理,但仍高于对照,这是由于电场对幼苗的双重作用引起的,一方面,在场强为2.50 kV/cm的电场作用下,诱导主动门控蛋白开放,促进养分吸收,另一方面,电场对细胞膜产生了损伤,不利于养分吸收。由图9可知,场强为2.50 kV/cm时细胞膜透

性大大提高,表明此时对细胞膜确实有损伤作用。同样地,基于上述分析,鲜质量随场强的变化也可得到解释。

由表1可知,场强适宜的静电场可促进植物对养分的吸收,但这种对养分促进作用的原因是否是静电场对主动门控通道蛋白的诱导。为了验证这一思想,通过对幼苗施加静电场的同时,分别向不同的电场处理组加入 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 通道蛋白抑制剂,结果表明,电场对养分吸收促进作用确实是由于电场触发下,使常闭的通道蛋白开启从而增加了离子交换通道所引起的(相关结果另文发表)。

## 4 结论

(1) HVEF处理对番茄幼苗的茎粗、株高、鲜质量、叶绿素含量、根系活力、膜透性都有显著的促进作用( $P < 0.05$ )。

(2) HVEF处理对番茄幼苗的养分吸收有显著影响,场强适宜的电场可促进番茄对养分的吸收,这是由于在电场触发下,开启了原处于常闭状态的通道蛋白,增加了细胞外养分与细胞内液进行交换的通道。

(3) 强度为2.25 kV/cm的电场对茎粗、鲜质量、叶绿素含量、根系形态的促进效果最优。

(4) 通过给作物施加合适的电激励信号诱导主动门控,进而控制该类蛋白的开闭时间来控制作物对养分的定时定量吸收,使作物按照各生育期的养分需求规律和需要量吸收养分,对作物优质、高效、高产具有重要现实意义。

## 参 考 文 献

- Robert A, Nelson. Electro-culture (the electrical tickle) [EB/OL]. <http://www.thebirdman.org/Index/Others/Others-Doc-Environment&Ecology/+Doc-Environment&Ecology-FoodMatters/StimulatingPlantGrowthwithElectricity&Magnetism&Sound.htm>.
- Jae-Duk Moon, Hwa-Sook Chung. Acceleration of germination of tomato seed by applying AC electric and magnetic field[J]. *Journal of Electrostatics*, 2000, 48(2): 103-114.
- 殷涌光,迟燕平,李婷婷. 高压脉冲电场对辣椒陈种子萌发的影响[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(3): 82-85.  
Yin Yongguang, Chi Yanping, Li Tingting. Effect of high intensity pulsed electric field on germination of old pepper seeds[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(3): 82-85. (in Chinese)
- Evelina Costanzo. The influence of an electric field on the growth of soy seedlings[J]. *Journal of Electrostatics*, 2008, 66(7-8): 417-420.
- 习岗,刘锴,徐永奎,等. 极低频脉冲电场与高压静电场对作物种子萌发影响的差异[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 265-271.  
Xi Gang, Liu Kai, Xu Yongkui, et al. Effects comparison of seeds germinating treated by extremely low frequency PEF and HVEF [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(1): 265-271. (in Chinese)
- 侯建华,杨体强,那日,等. 电场处理油葵种子在干旱胁迫下萌发及酶活性的变化[J]. *中国油料作物学报*, 2003, 25(1): 40-44.  
Hou Jianhua, Yang Tiqiang, Na Ri, et al. Effects of electric field treatment on seed germination and enzyme activities under drought stress in oil sunflower seeds[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2003, 25(1): 40-44. (in Chinese)
- 曹学成,李永庚,原所佳,等. 高压静电场(HVEF)处理黄瓜种子生理生化效应分析[J]. *种子*, 2006, 25(8): 51-54.
- Dhawi F, Al-Khayri J M, Essam H. Static magnetic field influence on elements composition in date palm[J]. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2009, 5(2): 161-166.

- spatial resolution climate change scenarios[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D6): 6623–6646.
- 15 Marsal J, Johnson S, Casadesus J, et al. Fraction of canopy intercepted radiation relates differently with crop coefficient depending on the season and the fruit tree species [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184: 1–11.
- 16 Heilman J L, Heilman W E, Moore D G. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(6): 967–971.
- 17 李贺丽, 罗毅, 赵春江, 等. 基于冠层光谱植被指数的冬小麦作物系数估算[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 118–127.  
Li Heli, Luo Yi, Zhao Chunjiang, et al. Estimating crop coefficients of winter wheat based on canopy spectral vegetation indices [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(20): 118–127. (in Chinese)
- 18 宋戈, 曾季才, 王燕, 等. 基于 NDVI 估算华北平原冬小麦需水量[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(6): 1–5.  
Song Ge, Zeng Jicai, Wang Yan, et al. Estimation of winter wheat water requirement based on NDVI in the North China Plain [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(6): 1–5. (in Chinese)
- 19 苏涛, 王鹏新, 杨博, 等. 基于生物量的区域土壤水分供给量的反演方法研究[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 52–58.  
Su Tao, Wang Pengxin, Yang Bo, et al. Retrieval of regional soil water changes based on remote sensing biomass products[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 52–58. (in Chinese)
- 20 康绍忠, 张富仓, 刘晓明. 作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法[J]. *水科学进展*, 1995, 6(4): 285–289.  
Kang Shaozhong, Zhang Fucang, Liu Xiaoming. Calculation method of the ratio between crop leaf transpiration and soil evaporation from farmland [J]. *Advances in Water Science*, 1995, 6(4): 285–289. (in Chinese)
- 21 刘海军, 康跃虎. 冬小麦拔节抽穗期作物系数的研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 52–56.  
Liu Haijun, Kang Yuehu. Calculation of crop coefficient of winter wheat at elongation-heading stages [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(10): 52–56. (in Chinese)
- 22 Kang S, Gu B, Du T, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 59(3): 239–254.
- 23 梁文清, 蔡焕杰, 王健. 冬小麦田间蒸发蒸腾与棵间蒸发规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 30(6): 93–96.  
Liang Wenqing, Cai Huanjie, Wang Jian. Research of evapotranspiration and evaporation for winter wheat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 30(6): 93–96. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 150 页)

- 9 邓鸿模, 虞锦岚, 周艾民. 高压静电场促进植物生长技术的研究[J]. *物理*, 2000(9): 550–552.  
Deng Hongmo, Yu Jinlan, Zhou Aimin. The promotion of plant growth by a high-voltage electrostatic field [J]. *Physics*, 2000(9): 550–552. (in Chinese)
- 10 温尚斌, 马福荣, 许守民, 等. 高压静电场促进植物吸收离子机理的初步探讨[J]. *生物化学与生物物理进展*, 1995, 22(4): 377–379.  
Wen Shangbin, Ma Furong, Xu Shoumin, et al. The mechanism of ion absorption stimulated by the high voltage electrostatic field [J]. *Prog. Biochem. Biophys*, 1995, 22(4): 377–379. (in Chinese)
- 11 高伟娜, 顾小清. 高压静电场对植物生物学效应的研究进展[J]. *现代生物医学进展*, 2006, 6(7): 60–62.  
Gao Weina, Gu Xiaoqing. The biological effects of high voltage electrostatic field on plants [J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2006, 6(7): 60–62. (in Chinese)
- 12 那日, 冯璐. 我国静电生物学效应机理研究新进展[J]. *物理*, 2003, 32(2): 87–93.  
Na Ri, Feng Lu. Mechanism of the biological effects of electrostatics [J]. *Physics*, 2003, 32(2): 87–93. (in Chinese)
- 13 Michealis L, Menten M L. The kinetics of inverting action [J]. *Biochemistry*, 1913, 49: 333–369.
- 14 蒋耀庭, 赵云, 赵航. 高压静电场诱导植物生长的机理研究[J]. *天津农业科学*, 2014, 20(3): 100–104.  
Jiang Yaoting, Zhao Yun, Zhao Hang. Research on the mechanism of high-voltage static electricity field inducing vegetative growth [J]. *Tianjin Agriculture Sciences*, 2014, 20(3): 100–104. (in Chinese)
- 15 孙一源, 余登苑. *农业生物力学与农业生物电磁学* [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.