

陈文胜, 出佳范, 吕再辉, 等. 酸雨胁迫对番茄叶片细胞膜透性的影响 [J]. 福建农业学报, 2017, 32 (4): 376—381.

CHEN W-S, CHU J-F, LÜ Z-H, et al. Effect of Simulated Acid Rain on Permeability of Tomato Cell Membrane [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 32 (4): 376—381.

酸雨胁迫对番茄叶片细胞膜透性的影响

陈文胜^{1,2}, 出佳范², 吕再辉², 黄晓松², 徐冰莹², 邱栋梁^{2*}

(1. 福建农业职业技术学院园艺园林系, 福建 福州 350119; 2. 福建农林大学园艺学院, 福建 福州 350002)

摘要: 采用番茄品种‘倍盈’为材料, 运用人工模拟酸雨研究不同强度酸雨(pH3.0、pH3.5、pH5.6) 胁迫对‘倍盈’叶片细胞质膜透性的影响。结果表明: 酸雨处理使番茄叶片超氧化物歧化酶(SOD)的活性、丙二醛(MDA)的含量及细胞质膜透性显著上升, 可溶性蛋白的含量显著下降。胁迫停止后SOD的活性逐渐下降, 停止胁迫后20 d, pH3.0与pH3.5处理均显著低于pH5.6(CK); 可溶性蛋白的含量pH3.0与pH3.5多呈现波动性的上升, 至停止胁迫后15 d, pH3.0、pH3.5与pH5.6处理之间无显著差异。丙二醛的含量则呈现波动式上升, 停止胁迫后20 d, pH3.5与pH5.6差异不显著, 而pH3.0显著高于pH5.6; 细胞质膜透性pH3.5表现先上升后下降的现象, pH3.0表现下降趋势的现象, 但至停止胁迫后20 d, pH3.0、pH3.5与pH5.6之间无显著差异; pH值3.0和pH值3.5的叶片伤害率均随时间的延长而呈现下降的趋势, 至停止胁迫后10 d以后基本处于一个较稳定的水平; 从番茄植株的外部形态来看, pH3.0酸雨处理在胁迫停止后20 d, 仍呈现叶片黄化、枯萎状态, 说明pH3.0酸雨胁迫产生不可逆的伤害; 而pH3.5酸雨胁迫处理下‘倍盈’表现出较好的自我修复能力。

关键词: 酸雨胁迫; 番茄; 细胞质膜透性; SOD; 丙二醛

中图分类号: S 641

文献标识码: A

文章编号: 1008—0384 (2017) 04—376—06

Effect of Simulated Acid Rain on Permeability of Tomato Cell Membrane

CHEN Wen-sheng^{1,2}, CHU Jia-fan², LV Zai-hui², HUANG Xiao-song²,
XU Bing-ying², QIU Dong-liang^{2*}

(1. Department of Horticulture and Gardening, Fujian Vocational College of Agricultural College,
Fuzhou, Fujian 350119, China; 2. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry
University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Effects of simulated acid rain (SiAR) at pH 3.0 and 3.5, along with pH 5.6 (CK), on the membrane permeability of cells in leaves of Brothin tomato were investigated. The results showed that the SOD activity, malondialdehyde (MDA) content, and cell membrane permeability of the tomato leaves increased significantly after SiAR treatments. But, the soluble protein decreased significantly due to the treatments. SOD activity in the leaves declined gradually once the stress was stopped. It became significantly lower than that of control, 20ds after the cessation. MDA content in the leaves treated by pH3.5 SiAR fluctuated with a slight upward trend that was not significantly different from that of control. On the other hand, the pH3.0 treatment produced a significant difference between them after 20ds of removal of the stress. The pH 3.5 treatment caused an initial rise on the membrane permeability and followed by a decline, while pH3.0 gave a continual downward trend. However, 20ds after stress stopping, there were no significant differences on the permeability between either of them and control. The soluble protein content in the leaves had an up-and-down insignificant increasing tendency by SiAR treatments in 15 days after the treatment. The injuries on the leaves caused by SiAR declined following the treatments, and reached a constant level 10ds after the stress ceased. Judging by the appearance of the tomato plants, the leaf yellowing and withering persisted 20ds after cessation of the pH3.0 treatment, indicating that an irreversible damage

收稿日期: 2016—11—15 初稿; 2017—02—09 修改稿

作者简介: 陈文胜 (1970—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事园艺植物生产与推广 (E-mail: 466563802@qq.com)

*通讯作者: 邱栋梁 (1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事园艺植物抗性生理 (E-mail: qiu dongliang@aliyun.com)

基金项目: 福建省教育厅访问学者资助项目 (闽教人〔2013〕60号); 福建农林大学科技创新专项基金项目 (CXZX2016107)

had occurred to the plants by SiAR. In contrast, the tomato plants seemed capable of self-rejuvenation after a SiAR stress at pH3.5.

Key words: acid rain stress; tomato; cell membrane permeability; superoxide dismutase; malondialdehyde

酸雨问题是当今世界的三大环境问题之一，是指 $\text{pH} < 5.6$ 的雨水、冻雨、雪、雹、露等大气降水^[1]。伴随着我国工业化和城市化的高速发展，酸雨的危害越来越严重，已然成为我国生态环境中存在的一一个主要问题，我国也继欧洲、北美之后成为世界第三大酸雨区^[2]。近年来东南沿海地区酸雨污染趋于严重，以南京、上海、杭州、福州和厦门为代表的地区也逐渐成为我国的主要酸雨区^[3]。

当酸雨的酸度达到一定强度时，就会导致作物细胞内的结构受损及叶片中的叶绿素含量减少等现象发生，从而影响作物的正常生长发育，导致作物产量低下、产品质量下降等。酸雨胁迫对植物的生长发育会产生严重的不利影响，导致植物膜系统损伤，引起生理代谢紊乱等^[4]。有关酸雨对植物生长的影响，国内外已有许多研究与报道。酸雨对蔬菜造成危害，主要是通过改变蔬菜种植土壤的理化性质和影响蔬菜土壤中微生物群的数量，进而对蔬菜造成直接伤害和间接伤害，从而影响蔬菜的品质和产量。酸雨对蔬菜的伤害分为急性伤害和慢性伤害，急性伤害是指强度高的酸雨与蔬菜接触，短时间内使叶片细胞死亡，致使叶片枯萎、枯株等现象。慢性伤害是指强度弱的酸雨长时间与蔬菜接触，使叶片失绿或叶色发生改变，影响蔬菜的生理生长，致使细胞出现死亡或过早落叶等症状。番茄在我国各地普遍栽培，是蔬菜栽培中的大宗产品，栽培面积很大。‘倍盈’是近年来从瑞士引入的一个优良番茄品种，目前在中国，特别是长江以南，已成了许多地方番茄栽培中的主要栽培品种。有关酸雨对番茄生长的影响，国内外已有许多研究^[5-9]，但对番茄生理指标的研究还不多。

本试验主要通过人工模拟酸雨降雨处理‘倍盈’番茄植株，探讨在酸雨胁迫下番茄叶片质膜透性、丙二醛（MDA）、超氧化物歧化酶（SOD）、可溶性蛋白等生理指标的影响情况，检测其抗酸雨的能力，为提高番茄产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以我国南方目前生产上的主栽番茄品种‘倍盈’为材料，由福建省科学研究院作物研究所提供，在福建农林大学园艺学院设施工程系的薄膜温

室中进行。2015年12月1日播种，采用泥炭土：珍珠岩：蛭石为7:2:1作为基质进行穴盘育苗。12月25日当番茄幼苗长至3片真叶时定植于规格为23 cm×18 cm的黑色PE塑料营养钵中。

定植成活后每4 d浇1次水，15 d采用0.5%尿素或N:P:K为15:15:15的复合肥结合浇水轮流浇施；当植株高35 cm左右时及时采用小竹竿进行绑蔓固定，以防止植株倒伏；采用单杆整枝方式，即仅留第1花序下的侧枝，其余侧枝均于5 cm时及时抹除，其他管理同大田栽培。

1.2 试验处理

根据我国南方自然降雨现状按摩尔比M(SO_4^{2-}):M(NO_3^-)=5:1配制成模拟酸雨母液，再借助精密酸度计用蒸馏水稀释成pH3.0、pH3.5、pH5.6的酸雨溶液，在温室里划分3个处理区域，分别为pH3.0、pH3.5、pH5.6(CK)，模拟酸雨胁迫。选取高度及生长状况较为一致的健壮植株，对其进行喷酸雨喷布，喷布前后进行番茄外部的观察和各指标的测定。待番茄植株地上部生长到40~50 cm，第一花序快开花时开始进行酸雨处理。于每天10:00、16:00左右对实验区进行叶面喷淋，处理方式是利用手持式塑料喷壶调整喷口口径让酸雨以雾状的形式均匀的喷施在番茄植株的叶片上，每次喷至叶面滴液为适度，直至喷布pH为3.0的植株出现叶片皱缩、黄化、焦枯等明显的危害症状出现时停止喷布酸雨。每种胁迫设置3个重复，每个重复3株。症状出现的当天(0 d)及出现后5、10、15、20 d进行取样，再进行各指标测定。取样均先取植株上第一花序下的第1~2张叶片，样品取样后马上液氮速冻，立即放入-80℃的冰箱中保存备用。

1.3 测定方法

1.3.1 SOD活性 番茄叶片的SOD含量用采用氮蓝四唑（NBT）法测定，参照王学奎等^[10]的方法，抑制NBT光化还原的50%为1个酶活性单位，结果以($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)表示。

1.3.2 可溶性蛋白含量 番茄叶片的可溶性蛋白采用考马斯亮蓝G-250法(Bradford法)，参照王学奎等^[10]的方法测定。

1.3.3 丙二醛（MDA）含量 采用硫代巴比妥酸法^[10]在600、532、450 nm的波长下分别进行吸光

度 (A) 的测定, 然后根据公式: $C (\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}) = 6.45 (A_{532} - A_{600}) - 0.56 A_{450}$ ^[10] 计算出丙二醛 (MDA) 含量。

1.3.4 电导率 电导仪法进行电导率的测定, 测定方法及计算参照王学奎等^[10]的方法进行。

1.3.5 细胞质膜相对透性及伤害率 根据电导率的测定结果参照王学奎等^[10]的方法进行细胞质膜相对透性及伤害率的计算。

1.4 统计方法

采用 SPSS 数据处理软件运用多重比较进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 酸雨胁迫对番茄叶片的可见伤害

酸雨对番茄的影响首先表现在叶片上, 叶片症状是环境胁迫对植物影响最为明显的现象。由图 1 可见, 不同强度的酸雨处理下的叶片表现出的伤害程度也是不同的, 其中 pH 3.0 处理组的番茄叶片出现大面积黄褐色的可见性伤害斑点, 而且伤害斑点大多出现在叶脉和叶缘处, 说明在这一浓度的酸雨胁迫下, 番茄叶片的细胞结构已经严重遭受破坏, 功能严重丧失, 导致叶片直接枯死; pH3.5 处理组的叶片叶脉和叶缘产生了较小的淡黄色的伤害斑点, 但叶片损伤程度和损伤的面积和 pH3.0 处理组相比较小, 说明番茄叶片在遭到酸雨的胁迫时, 其内部环境已经发生变化, 细胞结构受到破坏, 细胞内外离子浓度有所失衡, 影响叶片正常光合作用; 而 pH5.6 处理组的番茄叶片翠绿且生长旺盛。由此可知, 当番茄叶片受到的酸雨胁迫越强, 所受到的伤害就越重, 叶片受损程度为 pH3.0 > pH3.5 > pH5.6。

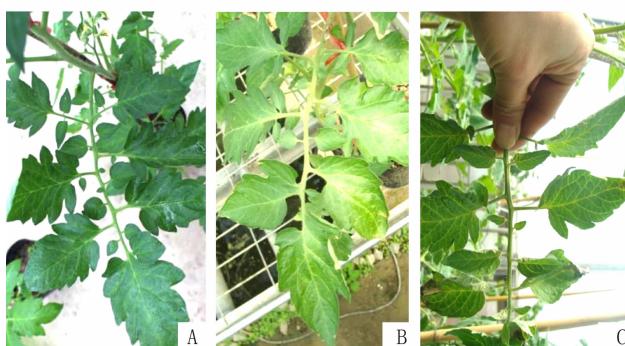


图 1 酸雨处理番茄出现症状时的外部形态特征

Fig. 1 Characteristic symptoms on tomato leaves under SiAR stress

注: A 为 pH5.6, B 为 pH3.5, C 为 pH3.0, 图 2 同。

图 2 表明, 酸雨胁迫解除后 20 d, pH5.6 (CK) 处理的叶片依旧翠绿且生长旺盛; pH3.5 处理的叶片虽可见到少量伤斑的痕迹, 但整体植株生长还是比较旺盛的; pH3.0 处理的叶片出现变黄脱落, 呈现枯萎状态。说明番茄在受到 pH3.5 酸雨胁迫, 随着时间延长, 植株还是具有一定恢复能力, 但在受到 pH3.0 酸雨胁迫, 随时间延长, 叶片细胞结构已经出现损坏, 植株出现了不可逆的伤害。

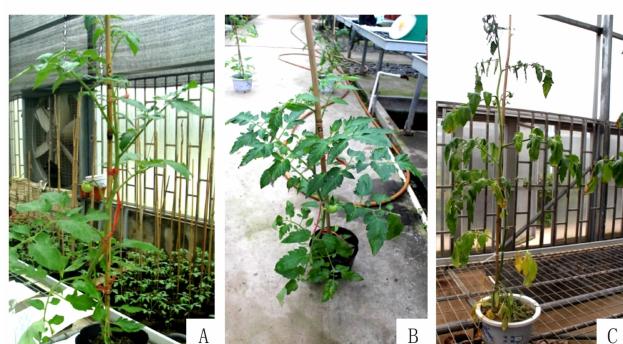


图 2 模拟酸雨胁迫后 20 d 番茄叶片生长情况

Fig. 2 Injuries on tomato leaves 20ds after SiAR treatments

2.2 酸雨胁迫对番茄 SOD 活性的影响

由表 1 可知, 在 pH3.5 和 pH3.0 的酸雨处理后, 番茄叶片 SOD 的活性在停止胁迫时 (出现症状的当天) 高于 pH5.6 (CK), 但随后就逐渐下降, 且均低于 pH5.6 (CK)。停止胁迫后, pH3.5 和 pH3.0 处理的 SOD 活性显著低于 pH5.6 (CK) 处理。停止胁迫 20 d 后, pH3.5 和 pH3.0 处理的 SOD 活性仍与对照差异达显著水平, pH3.5 和 pH3.0 处理之间差异不显著。以上说明, 当番茄受到酸雨胁迫时, 会对番茄的生长代谢造成影响, 番茄叶片细胞内的自由基代谢平衡遭到破坏, 膜脂过氧化作用增强, 细胞膜系统受到了伤害, 且随着酸性越强, 其伤害的程度越厉害。

2.3 酸雨胁迫对番茄可溶性蛋白的影响

从表 2 中可以看出, 酸雨处理的番茄叶片可溶性蛋白含量显著低于对照。停止胁迫后, pH3.5 和 pH3.0 处理的可溶性蛋白含量呈现上升趋势。停止胁迫后 15 d, pH3.5 和 pH3.0 可溶性蛋白与 pH5.6 (CK) 差异不显著。说明在受到酸雨胁迫时, 在 $3.5 < \text{pH} < 5.6$ 的范围内, 可溶性蛋白还是能恢复至对照水平, 与李迪等报道, 酸雨胁迫能促进水稻萌发种子可溶性蛋白的降解, 当胁迫解除后, 种子可溶性蛋白逐渐恢复 pH5.6 (CK) 水平的结果一致^[12]。

表 1 模拟酸雨胁迫对番茄叶片 SOD 活性的影响
Table 1 Effect of SiAR on SOD activity of tomato leaves

酸雨 pH 值	SOD 活性/(U · g ⁻¹ · min ⁻¹)				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
5.6(CK)	65.22±0.87c	60.479±5.923a	54.151±2.980a	58.904±2.540a	59.854±3.451a
3.5	81.985±0.96b	54.191±1.714b	52.636±2.356a	48.925±2.884b	42.420±1.380b
3.0	85.141±1.07a	50.039±6.901c	47.273±1.152c	44.002±1.977c	41.441±2.071b

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 下同。

表 2 模拟酸雨胁迫对番茄叶片可溶性蛋白含量的影响
Table 2 Effect of SiAR on soluble protein content of tomato leaves

酸雨 pH 值	可溶性蛋白含量/(μg · mL ⁻¹)			
	0 d	5 d	10 d	15 d
5.6(CK)	40.81±4.23a	39.21±4.28a	31.94±1.38b	42.23±0.03a
3.5	26.05±3.08b	38.68±4.64a	36.47±2.66a	40.66±2.16a
3.0	36.30±2.36ab	39.63±6.15a	26.01±2.23c	40.62±5.72a

2.4 酸雨胁迫对番茄丙二醛含量的影响

从表 3 分析可知, pH3.5 和 pH3.0 酸雨处理的番茄叶片 MDA 含量显著高于 pH5.6 (CK), 其含量依次为 pH3.0>pH3.5>pH5.6。停止胁迫后, pH3.5 和 pH3.0 处理的 MDA 含量出现先上升再下降到最后上升的变化。停止胁迫后 20 d, pH3.0 处理的 MDA 含量仍显著高于 pH3.5 和 pH5.6, pH3.5 和 pH5.6 处理差异不显著。说明受到 pH3.5 的酸雨胁迫后的番茄叶片随时间延长, 其 MDA 含量会缓慢恢复至对照水平, 而 pH3.0 的酸雨胁迫对番茄产生不可逆伤害, 导致 MDA 含量不能恢复至对照水平。

2.5 酸雨胁迫对番茄叶片细胞质膜相对透性的影 响及其伤害率变化

由表 4 分析可知, 酸雨胁迫使番茄叶片细胞膜的相对透性显著高于对照, pH3.0 处理的细胞膜透性极显著高于对照, 显著高于 pH3.5 处理。停止胁迫后 5 d, pH3.0 处理仍显著高于对照。停止胁迫后 20 d, 3 个处理间差异不显著。酸雨胁迫会对番茄的正常生长造成影响, 并损伤番茄叶片细胞的结构, 导致细胞内部离子外渗, 提高相对电导率, 增加细胞膜的相对透性。

表 3 模拟酸雨胁迫对番茄叶片 MDA 含量的影响
Table 3 Effect of SiAR on MDA content of tomato leaves

酸雨 pH 值	MDA 含量/(μmol · L ⁻¹)				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
5.6(CK)	0.39±0.20b	2.29±0.33a	1.33±0.33b	0.92±0.19b	1.48±0.21b
3.5	1.35±0.20a	2.50±0.53a	1.90±0.38a	1.18±0.93b	1.56±0.61b
3.0	1.74±0.86a	2.51±0.16a	2.24±0.34a	2.17±0.86a	2.31±0.53a

表 4 模拟酸雨胁迫对番茄叶片细胞膜的相对透性
Table 4 Effect of SiAR on cell membrane permeability of tomato leaves

酸雨 pH 值	细胞膜的相对透性/%				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
5.6(CK)	0.69±0.08	0.88±0.02	0.844±0.06	0.90±0.05	0.84±0.04
3.5	0.87±0.09*	0.91±0.01	0.88±0.04	0.91±0.01	0.87±0.05
3.0	0.94±0.04**	0.93±0.01*	0.89±0.05	0.93±0.01	0.88±0.03

注: * 表示差异达到显著性水平($P<0.05$), ** 表示差异达到极显著水平($P<0.01$)。

一般来说,当植物遭受外界逆境的胁迫时能通过自身的新陈代谢、各种离子产生等方法来协调逆境对自身的伤害,并随着时间的延长能对这一逆境胁迫产生一定的抗逆性。从图 3 可以看出‘倍盈’番茄叶片在遭受酸雨胁迫后不管是 pH 值在 3.0 还是 pH 值在 3.5,其叶片伤害率都随着时间的延长而呈现下降的趋势直到最后几乎趋于一个稳定水平。说明番茄植株在逆境情况下能通过自身调节作用提高对不良条件的抵抗。

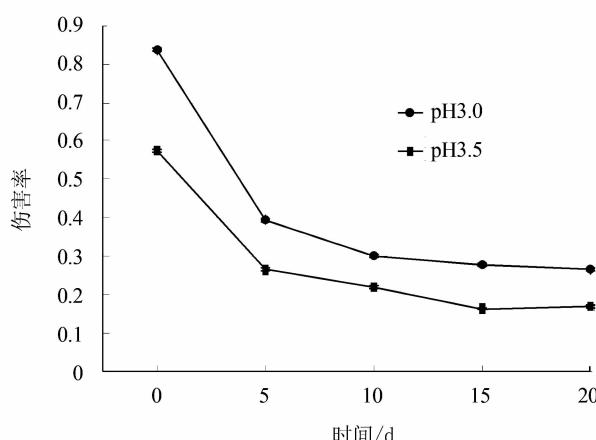


图 3 模拟酸雨胁迫对番茄伤害率的影响

Fig. 3 Effect of SiAR on injury rate of tomato leaves

3 讨论与结论

通过试验发现,在酸雨胁迫的情况下,不同浓度的酸雨胁迫都会对番茄叶片的细胞结构造成破坏,使番茄叶片出现枯斑、坏死,并伴着酸雨强度的增加,番茄叶片出现枯斑症状愈发明显,伤害愈发严重。

本试验结果表明,受到酸雨胁迫使番茄叶片的 SOD 活性显著上升,但胁迫停止后随着时间延长则逐渐下降,其中 pH3.0 的 SOD 活性比 pH3.5 的 SOD 活性下降幅度更大。SOD 具有清除植物体内过剩的自由基,使植物体内自由基维持正常的动态平衡,提高植物抗逆性的作用,番茄叶片受到酸雨胁迫后,必须迅速提高其活性以抵制不良环境。停止胁迫后,SOD 活性下降的幅度与酸雨胁迫的强度有关,与严重玲等^[13]报道的结果一致。MDA 含量在胁迫停止后随着 pH 值降低出现增加的变化,且随时间延长,丙二醛含量呈现波动式上升。MDA 是膜脂过氧化的最终分解产物,其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度。侯麟对酸雨胁迫白兰花的研究中也获得类似结果^[14]。

在受到 pH3.5 的酸雨胁迫后,随时间延长,

可溶性蛋白含量多呈现波动式上升,最后基本恢复至对照水平。在受到 pH3.0 处理时,随时间延长,可溶性蛋白含量显著低于 pH5.6 (CK) 水平,王涛等也报道过类似的结果^[15]。pH3.5 酸雨胁迫后番茄叶片的细胞质膜透性表现先上升后下降的现象,停止胁迫后 20 d, pH3.0、pH3.5 与 pH5.6 之间无显著差异。胁迫停止后 SOD 活性下降及丙二醛含量的波动式上升的现象均可说明植物遭受逆境伤害的程度,而且随着酸雨胁迫的强度增强而加强,因而造成了细胞质膜透性表现先上升后下降的现象。

试验表明至停止胁迫后 20 d, pH3.5 酸雨处理组,番茄叶片除了 SOD 的活性未能恢复至对照水平,可溶性蛋白含量、细胞质膜透性、丙二醛含量等基本能够恢复至对照水平;而 pH3.0 酸雨处理组,番茄叶片除了细胞质膜透性基本恢复至对照水平,SOD 的活性、丙二醛含量等未能恢复至对照水平。说明番茄在 pH3.5 时,番茄具有一定恢复能力,对酸雨有一定的适应性。从叶片伤害率来看,在停止胁迫后的 10 d 内,特别是 5 d 内不论是 pH 值在 3.0 还是 pH 值 3.5 均出现了急剧下降的现象,但至停止胁迫后 10 d 后,基本处于一个较稳定的水平,说明了番茄植株在逆境情况下能通过自身调节作用提高对不良条件的抵抗。

番茄受酸雨胁迫后即做出反应进行调整,通过调整 SOD 活性、可溶性蛋白含量、细胞质膜透性、丙二醛含量等来抵御酸雨的伤害,但番茄膜系统受到过氧化酶和渗透调节物质的保护有一定限度,当超过这个限度会打破番茄自身调整机制,会对番茄造成不可逆的伤害。本试验结果表明,番茄在受到 $3.5 \leqslant \text{pH} \leqslant 5.6$ 的酸雨胁迫时,能够适应酸雨带来的影响,并能做出调整。在受到 $\text{pH} \leqslant 3.0$ 的酸雨胁迫时,番茄将会出现损伤,与形态观察结果基本一致。

参考文献:

- [1] 许新辉, 郜洪文. 中国南方酸雨的分布特征及其成因分析 [J]. 四川环境, 2011, 30 (4): 135—139.
- [2] 王文兴, 丁国安. 中国降水酸度和离子浓度的时空分布 [J]. 环境科学研究, 1997, 10 (2): 1—7.
- [3] 万玉山, 王皖蒙. 中国酸雨污染现状成因分析及防治措施 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (34): 19420—19421, 19425.
- [4] 齐泽民, 王玄德, 宋光煜. 酸雨对植物影响的研究进展 [J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26 (2): 36—41.
- [5] 杨学春, 牟树森. 酸雨和降尘对植物产量及汞含量的研究 [J]. 西南农业大学学报, 1998, 20 (2): 165—169.
- [6] 刘婷婷. 模拟酸雨胁迫下番茄叶片的基因差异表达研究 [D].

- 福州: 福建农林大学, 2010.
- [7] 商桑, 田丽波, 黄绵佳, 等. 模拟酸雨对茄科3种蔬菜种子萌发的影响 [J]. 植物研究, 2007, 27(4): 494—499.
- [8] BISESSAR S, 孔再德. 模拟酸雨对番茄细菌病斑的影响 [J]. 农业环境与发展, 1987, (12): 50.
- [9] 杨志敏, 华筠, 王萍. 模拟酸雨对若干种蔬菜生长和生理特性影响的研究 [J]. 农业环境保护, 1994, (5): 213—216, 241.
- [10] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 5.
- [11] 徐利利, 陈焱山, 张士权, 等. ABA对木樨科植物抗冻性影响的研究 [J]. 现代农业科技, 2007, (15): 8—9.
- [12] 李迪, 唐璐, 周青. 水稻种子萌发时酸雨对可溶性蛋白与脯氨酸含量的影响 [J]. 安全与环境学报, 2008, (5): 12—15.
- [13] 严重玲, 洪业汤, 杨先科, 等. 酸雨胁迫下稀土元素对小麦的生物学效应 [J]. 中国农业科学, 1998, (3): 89—91.
- [14] 侯麟. 酸雨胁迫对白兰花生理特性的影响 [D]. 成都: 四川农业大学, 2010.
- [15] 王涛, 张珊珊, 谢寅峰, 等. 模拟酸雨胁迫对菲白竹生理特性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2014, (11): 17—21.

(责任编辑: 张梅)