

铝胁迫对西瓜幼苗生长及生理特性的影响

贾松涛, 郑阳霞*, 邱爽, 张伟伟

(四川农业大学园艺学院, 四川 雅安 625014)

摘要:以超甜地雷王(DL)、早佳 84-24(ZJ)、早蜜王(ZM)、早春红玉(HY)4个西瓜品种为供试材料,研究了不同浓度铝(0、250、500、1000、1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理对西瓜幼苗生长及生理特性的影响。结果表明,铝处理使 ZM 根长、根系活力及干重下降最为明显,对 HY 影响不显著或有一定促进作用,ZJ、DL 所受影响介于二者之间,HY 耐铝性较强,ZM 对铝敏感。进一步分析比较铝处理下耐铝性差异较大的两个西瓜品种 ZM 和 HY 生理特性的变化可知:铝处理均可使 ZM、HY 两个西瓜品种叶片质膜透性增大,丙二醛含量增加,其中 HY 在 $\text{Al}^{3+}\leq 1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下随处理时间的延长膜系统伤害可以得到一定程度的恢复,MDA 含量有所下降;HY 叶片 Pro 含量和 SOD、POD 酶活性均增加,在高浓度、长时间的铝处理下此三指标的变化均优于 ZM;CAT 活性变化均较小。由试验结果可以看出,ZM 和 HY 对铝胁迫的生理反应存在一定的差异性,HY 内部响应铝胁迫的生理机制较 ZM 更加完善,其中 Pro 含量及 SOD、POD 活性与西瓜耐铝能力关系密切。

关键词:铝胁迫;西瓜;幼苗生长;生理特性

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)08-1485-08 doi:10.11654/jaes.2014.08.004

Effects of Aluminum Stress on Growth and Physiological Characteristics of Watermelon Seedlings

JIA Song-tao, ZHENG Yang-xia*, QIU Shuang, ZHANG Wei-wei

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Aluminum (Al) phytotoxicity is an important factor influencing plant production in acid soils. In the present study, seedlings of four watermelon varieties, chaotian dilei wang (DL), zaojia 84-24 (ZJ), zaomi wang (ZM) and zaochun hongyu (HY), were used to investigate their growth and physiological characteristics under different Al concentrations (0, 250, 500, 1000, 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). The inhibitory effects of Al on root length, root vigor and dry weight were greatest for ZM, followed by ZJ and DL, and the least for HY, in which no influences were observed. Thus ZM was more sensitive to Al than HY. Aluminum stress increased the plasma membrane permeability and MDA content in ZM and HY leaves. At $\text{Al}^{3+}\leq 1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, the breakage of HY membrane system was recovered at a certain level with extension of the treatment time. In addition, Pro content, SOD and POD activities were also increased; while CAT activity was almost not affected by Al. These results show that Al-resistant HY has a better physiological mechanism to respond to Al stress than ZM does, and the Pro content and SOD and POD activities are closely related to Al-tolerant ability of watermelon.

Keywords: aluminum stress; watermelon; seedling growth; physiological characteristics

我国酸性土壤总面积约占全国总面积的 21%,主要分布在南方 15 个省区。包括砖红壤、砖红壤性红壤、红壤和黄壤 4 类酸性矿质土壤,pH 在 4.5~5.5 之间^[1]。土壤酸化会导致活性铝的释放,活性铝 $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ 、

$\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 的含量常被作为衡量铝毒性大小的尺度,现今大多数学者认为 $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ (又称 Al^{3+})是造成酸性土壤中植物毒害的主要铝形态^[2-4]。铝毒害现已成为酸性土壤中制约作物生产的重要障碍因子,影响作物生长,造成作物减产^[5]。西瓜(*Citrullus lanatus*)是葫芦科植物,是我国南北方重要的水果作物之一,全国各地栽培广泛。随着设施园艺的发展,西瓜设施栽培面积增长迅速。而土壤酸化是设施土壤退化的主要特征之一,西瓜的连作障碍问题也被证明

收稿日期:2013-12-06

基金项目:四川省教育厅重点项目(11ZA075)

作者简介:贾松涛(1989—),男,硕士研究生,从事蔬菜作物的逆境生理生态研究。E-mail:18227559598@163.com

* 通信作者:郑阳霞 E-mail:zhengyangxia@163.com

和土壤酸化有着密切的关系^[6-7],可见土壤酸化后引起的活性铝增加与影响西瓜产量、品质的一系列问题存在密切的关系。因此,进行西瓜铝毒害的研究具有重要的理论及生产意义。

目前在西瓜受低温、盐、干旱等非生物胁迫方面已有很多研究,诸多研究表明非生物胁迫下会导致西瓜膜脂伤害加重,渗透调节物质含量、抗氧化酶活性发生变化,并可通过这些生理指标间接鉴定植物耐受性^[8-10]。而对于铝胁迫条件下西瓜相关生理指标变化的研究还未见报道,因此本试验采用水培的方法,先根据铝胁迫下西瓜幼苗根的生长、根系活力、生物量的变化对4种不同基因型西瓜的耐铝性进行比较,在此基础上进一步对其中耐铝性差异明显的2种不同基因型西瓜的生理指标进行对比分析,以期铝胁迫下西瓜生理生化机制的阐明奠定理论基础,为认识铝毒害与连作障碍之间的关系、选育西瓜耐铝品种等提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试西瓜品种为市售超甜地雷王(DL)、早佳84-24(ZJ)、早蜜王(ZM)、早春红玉(HY)。

供试试剂为十八水合硫酸铝[分子式 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$],分析纯。

1.2 试验设计

挑选大小均匀、健康饱满的西瓜种子,55℃热水浸种,自然冷却后继续浸种6h,将种子用湿纱布包好在恒温箱内(28℃,湿度90%)催芽至露白,然后播种在装有珍珠岩的育苗盘里。待各品种幼苗第一片真叶完全展开后分别选长势一致的幼苗移栽到装有珍珠岩的塑料盆里,每盆3株,用1/3 Hoagland 营养液浇灌。幼苗进入五叶期后将各品种幼苗分成5个处理组,每8盆为一个处理,每个处理3次重复。以1/3 Hoagland 营养液为母液,用硫酸铝 $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$,分析纯]配制铝浓度为0、250、500、1000、1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理液,用 H_2SO_4 和NaOH调节溶液 $\text{pH}=4.5 \pm 0.3$ (模拟酸性土壤pH条件,使添加铝主要以 Al^{3+} 形态存在)。用各浓度的处理液分别浇灌各组西瓜幼苗,每日一次,每次每盆浇灌150 mL。铝处理后第5、10、15 d分别进行各项指标测定,根据铝处理第15 d所测4种不同基因型西瓜根长、干重、根系活力指标,筛选耐铝性差异明显的2种不同基因型的西瓜,对比分析此2种不同基因型西瓜随铝处理浓度升高、时间延

长其膜脂伤害及渗透调节相关指标和抗氧化酶指标的变化规律。

1.3 测定项目及方法

根长用直尺测量;将地下部与地上部分开后在105℃烘箱中杀青30 min后转入80℃下烘干至恒重,分别称地上部和地下部干重;根系活力用TTC法测定^[11];脯氨酸(Pro)含量用酸性茚三酮法测定^[11];丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸法测定^[11];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[11],520 nm波长下测定吸光度;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[11],以单位质量新鲜样品1 min吸光度变化值表示酶活性大小,单位为 $\Delta_{470} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$;用分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[12],以 $\Delta_{240}=0.1$ 为一个活力单位(U),以新鲜样品每分钟活力变化表示CAT活性,单位为 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.4 数据统计

采用SPSS进行单因素方差分析,选择最小显著性差异法(LSD法)进行均值多重比较,用Excel作图。

2 结果与分析

2.1 西瓜不同品种耐铝性差异的筛选

表1是4个西瓜品种在铝处理后15 d的生长情况。随 Al^{3+} 浓度升高,DL、ZJ、ZM、HY 4个西瓜品种的根长都呈先增后减的趋势。DL在1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铝处理下根长显著低于对照,ZM在 $\text{Al}^{3+} \geq 500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根长显著低于对照,而ZJ和HY各处理组根长与对照差异不显著。从根长来看,4个西瓜品种的耐铝性依次为 $\text{HY} \approx \text{ZJ} > \text{DL} > \text{ZM}$ 。铝处理对4个西瓜品种地下部和地上部的干重影响不同:铝处理后HY地下部和地上部干重均增加,而且各处理均显著高于对照;各浓度铝处理下ZM的生物量显著减小,可见铝抑制了ZM生长;铝浓度为500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时DL、ZJ生物量较对照均增加,高浓度的铝(1000~1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)处理DL、ZJ地下部以及ZJ地上部干重均减小,仅DL地上部干重略有增加,但与对照差异不显著。

从生物量来看,耐铝性依次为 $\text{HY} > \text{DL} \approx \text{ZJ} > \text{ZM}$ 。250 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理下4个西瓜品种的根系活力均有所降低,其中ZM根系活力与对照达显著水平。铝浓度为1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,DL、ZJ、ZM的根系活力均低于对照,其中ZJ、ZM与对照差异显著,而HY根系活力升高并显著高于对照和其他各浓度处理。从根系活力来看,耐铝性依次为 $\text{HY} > \text{DL} \approx \text{ZJ} > \text{ZM}$ 。综合根长、干重、根系活力来看,ZM对铝最敏感,HY耐铝性

表 1 不同浓度铝处理对西瓜根长、干重及根系活力的影响

Table 1 Influences of root length, dry weight and root vigor of watermelon seedlings by different Al³⁺ concentrations

品种 Varieties	铝浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al concentrations	根长/cm Root length	地下部干重/g Root dry weight	地上部干重/g Aerial part dry weight	根系活力/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ Root vigor
超甜地雷王(DL)	CK	23.2±1.0ab	0.045±0.001b	0.41±0.02b	24.5±1.9b
	250	23.6±1.7ab	0.048±0.003b	0.46±0.02b	22.5±1.8b
	500	24.0±1.7a	0.066±0.004a	0.54±0.03a	47.2±4.9a
	1000	20.4±0.1bc	0.031±0.001c	0.42±0.02b	52.5±3.7a
	1500	18.5±1.5c	0.037±0.001c	0.42±0.02b	20.3±0.9b
早佳 84-24(ZJ)	CK	22.6±1.0ab	0.034±0.001b	0.52±0.02a	22.7±1.8ab
	250	22.6±1.3ab	0.032±0.002bc	0.55±0.02a	18.3±1.5abc
	500	23.5±1.9a	0.049±0.001a	0.60±0.02a	23.5±2.7a
	1000	19.8±1.4b	0.029±0.003cd	0.39±0.06b	17.7±2.6bc
	1500	19.4±0.4b	0.029±0.001d	0.43±0.04b	16.5±2.5c
早蜜王(ZM)	CK	29.2±1.5a	0.058±0.005a	0.58±0.04a	51.0±2.6a
	250	31.6±1.5a	0.050±0.003b	0.57±0.02a	43.7±3.1b
	500	22.4±1.7b	0.045±0.003c	0.49±0.04b	38.9±4.7c
	1000	23.1±1.3b	0.043±0.002c	0.41±0.04c	37.0±2.6c
	1500	20.5±1.7b	0.045±0.004bc	0.45±0.02bc	26.0±3.0d
早春红玉(HY)	CK	20.5±1.8a	0.020±0.001e	0.25±0.03e	38.0±4.9b
	250	21.3±2.8a	0.026±0.002d	0.35±0.03c	34.7±2.6b
	500	22.3±0.9a	0.037±0.003b	0.52±0.03a	38.5±4.2b
	1000	22.4±1.2a	0.044±0.002a	0.44±0.01b	32.2±1.5b
	1500	19.5±0.4a	0.031±0.002c	0.31±0.02d	57.0±5.7a

注:同一品种不同处理间小写字母不同表示两者差异达显著水平($P<0.05$)。下同。
Note: Data with different small letters within the same variety are significantly different between treatments ($P<0.05$). The same below.

最强,DL、ZJ 介于二者之间。因此,以下选用西瓜品种 ZM、HY,对其叶片相关生理指标进行对比分析,探讨铝处理下此二者生理变化的差异。

2.2 耐铝性差异明显的 2 种基因型西瓜的生理指标对比分析

2.2.1 铝对西瓜叶片丙二醛含量的影响

由图 1(a)可知,ZM 叶片 MDA 含量仅在 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下、第 15 d 时低于对照,其余各处理下 MDA 含量均显著高于对照;Al³⁺≥500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下 MDA 含量为对照的 131.6%~171.1%,膜系统伤害严重。由图 1(b)可知,不同浓度铝处理同样导致 HY 叶片 MDA 含量的上升。Al³⁺≤1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下,HY 的 MDA 含量第 5 d 时为对照的 126.2%~152.3%,第 10 d 为对照的 93.2%~109%,第 15 d 为对照的 104.3%~128.7%,说明随着铝处理时间的延长 HY 膜系统伤害得到一定程度的恢复。1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下,HY 叶片 MDA 含量在第 5、10、15 d 均显著高于对照,说明此时膜系统伤害不可恢复,分别为对照的 162.1%、142.9%、140.1%。

2.2.2 铝对西瓜叶片脯氨酸含量的影响

由图 2(a)可知,ZM 叶片中 Pro 含量第 5、10、15 d 均在 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下达最大值且均显著高于对照。第 5 d 时,Al³⁺≥500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下各组 ZM 叶片 Pro 含量与对照差异均不显著;随时间延长,第 10 d 时在 500、1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的铝处理下显著高于对照,1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下显著低于对照;第 15 d 时在 Al³⁺≥500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下均显著低于对照。由图 2(b)可知,随铝浓度的升高,HY 叶片 Pro 含量在第 5 d 呈先升后降的趋势,仅在 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下较对照有所降低;第 10 d 也呈先升后降的趋势,第 15 d 时呈升高趋势,第 10、15 d 处理组 Pro 含量均显著高于对照。HY 处理组叶片 Pro 含量在第 5、10、15 d 分别为对照的 92.4%~115.9%、121.3%~176.4%、143.3%~165.4%。

2.3 铝对西瓜叶片抗氧化酶(SOD、POD、CAT)的影响

由图 3(a)可知,在 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下第 5、10 d 和 500、1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下第 10、15 d,ZM 叶片 SOD 活性显著高于对照,其中 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下第 15 d 增幅最大,为对照的 119.1%。1500

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下 ZM 叶片 SOD 活性在第 5、10、15 d 均显著低于对照。由图 3(b)可知, HY 叶片 SOD 活性随铝处理浓度的升高呈先升后降的趋势。随着时间的延长, 相对 SOD 活性呈先降后升的趋势, 第 5、15 d 时 HY 各处理组 SOD 活性均显著高于对照, 为对照的

108.8%~163%。

由图 4(a)可知, 随铝浓度的升高, ZM 叶片 POD 活性第 5、10 d 均呈先升后降的趋势, $250\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下达最大值; 第 15 d 呈下降趋势, 各铝浓度处理下均显著小于对照。由图 4(b)可知, 第 5 d 时, HY 叶

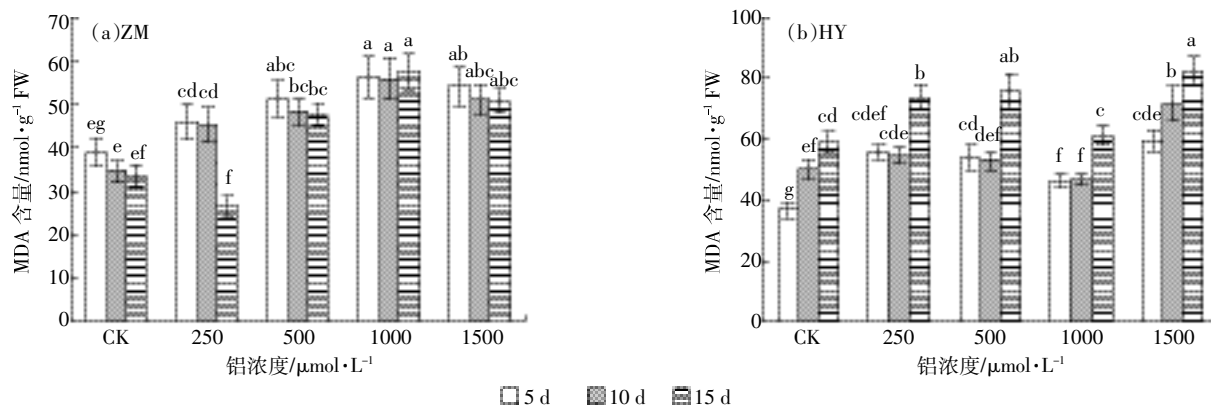


图1 铝处理对早蜜王(ZM)和早春红玉(HY)叶片丙二醛含量的影响

Figure 1 Effect of Al on MDA content in ZM and HY leaves

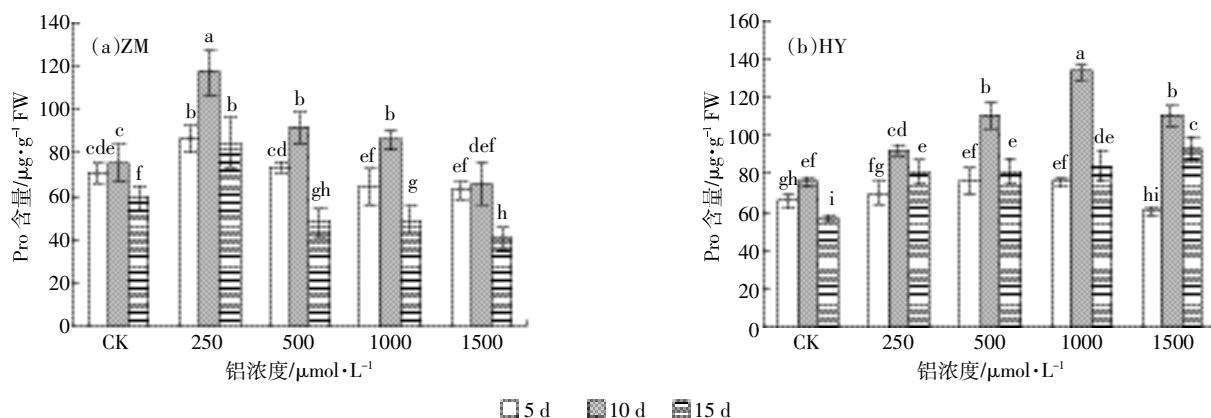


图2 铝处理对早蜜王(ZM)和早春红玉(HY)叶片脯氨酸含量的影响

Figure 2 Effect of Al on Pro content in ZM and HY leaves

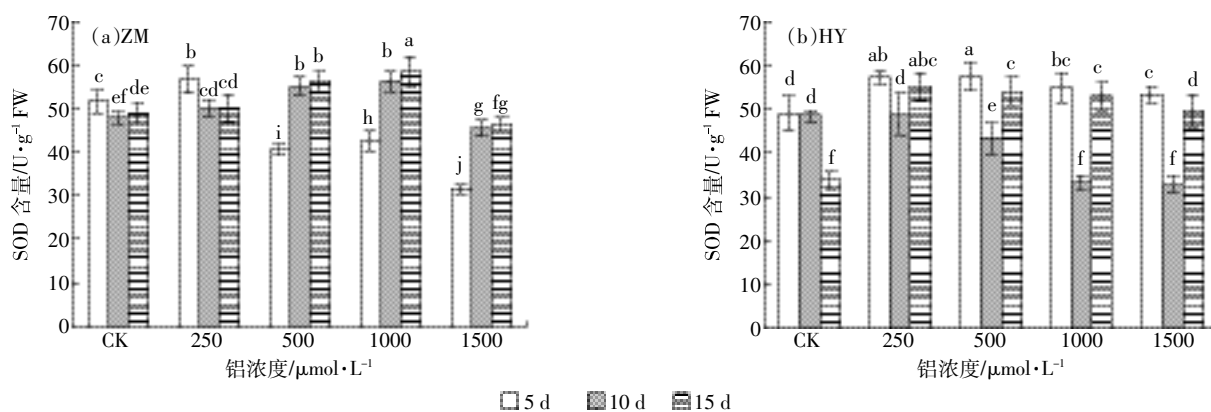


图3 铝处理对早蜜王(ZM)和早春红玉(HY)叶片超氧化物歧化酶活性的影响

Figure 3 Effect of Al on SOD activity in ZM and HY leaves

片 POD 活性随铝浓度的升高呈先升后降的趋势, $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝处理下达最大值; 第 10、15 d 时, 各处理组 POD 活性均显著高于对照。从升降幅度来看, 铝处理下 ZM 叶片 POD 活性升幅较小, 降幅较大, 为对照的 50.4%~136.6%; HY 叶片 POD 活性升幅较大, 降幅较小, 为对照的 89.7%~254.5%。

由图 5 可知, 不同浓度铝处理下 ZM 叶片 CAT 活性为对照的 93.5%~106.9%, HY 叶片 CAT 活性为对照的 70.7%~113.8%。HY 各浓度处理第 5、10 d 时 CAT 活性均小于对照, 且第 10 d $\text{Al}^{3+} \geq 500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下与对照达显著水平; 第 15 d 时, $\text{Al}^{3+} \leq 1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下 HY 叶片 CAT 活性高于对照, 且 250、500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下达显著水平。说明 HY 在低浓度的铝处理下随着时间的延长, CAT 活性得到恢复。

3 讨论

根尖是遭受铝毒害的最初部位, 根长测定是植物耐铝毒鉴定的通用方法^[13]。生物量是可以直观反应

植株生长状况、也是筛选植物耐铝品种的重要指标^[14]。国内外根据这些形态指标对小麦、油菜、大麦、大豆等的耐铝性都进行过多次筛选^[14-17]。本研究中, 从根长变化来看, HY 根长变化最小, ZM 根长生长受抑制最为严重; 从生物量变化来看, ZM 在 $\text{Al}^{3+} \geq 500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时地上部、地下部干重均显著低于对照; HY 地上部、地下部干重在铝处理下均表现为促进作用; DL、ZJ 根长、生物量变化介于二者之间。综合根长、生物量两个指标可以筛选出对铝敏感的西瓜品种 ZM 和耐铝性较强的西瓜品种 HY。根系活力可以客观反映植物根系生命活动的强弱, 也和植物耐铝性存在密切关系^[3, 18]。ZM 根系活力随铝浓度升高显著下降, 说明随铝处理浓度的升高所受胁迫不断加深。HY 在 $\text{Al}^{3+} \leq 1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的铝处理有很强的适应性, 根系活力变化不明显; 铝浓度升高至 $1500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时促使根系活力显著升高, 这与周媛等研究中高浓度 ($1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 铝处理下栝楼根系活力变化的研究结果相一致^[19], 可能是 HY 西瓜品种可通过提高代谢水

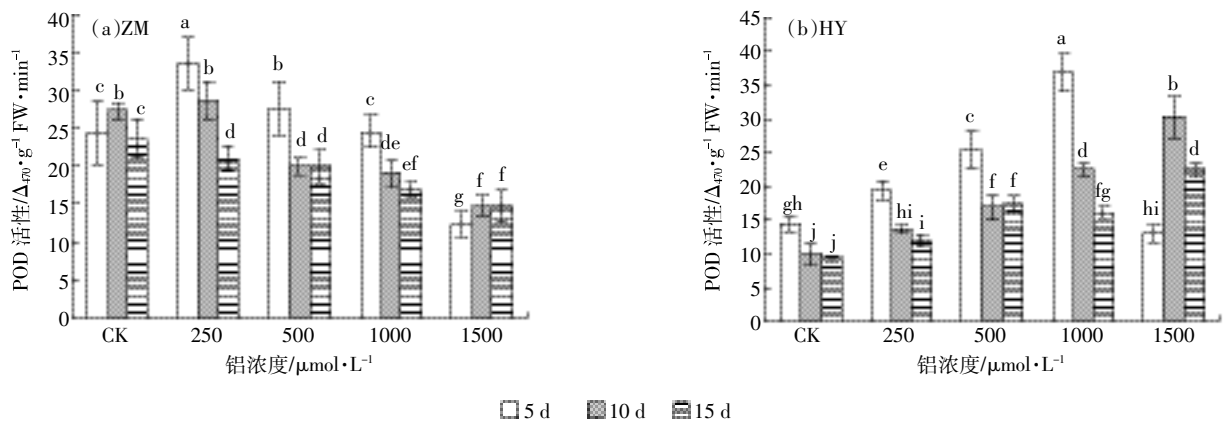


图 4 铝处理对早蜜王(ZM)和早春红玉(HY)叶片过氧化物酶活性的影响

Figure 4 Effect of Al on POD activity in ZM and HY leaves

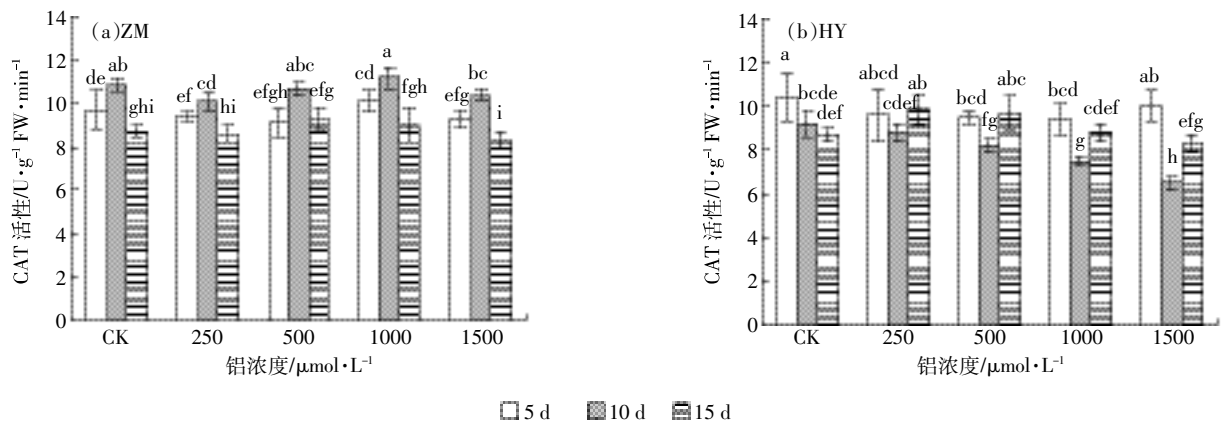


图 5 铝处理对早蜜王(ZM)和早春红玉(HY)叶片过氧化氢酶活性的影响

Figure 5 Effect of Al on CAT activity in ZM and HY leaves

平、增强根系活力,从而缓解铝胁迫。对比 ZM 和 HY 两个西瓜品种根系活力变化,可以说明根系 TTC 相对还原强度与植物的耐铝性有很好的一致性^[20],根系活力的分析结果再次说明 4 个西瓜品种中 ZM 对铝最为敏感, HY 耐铝性最强。本试验结果表明,通过根长和生物量对西瓜耐铝性进行筛选,然后再根据根系活力进行验证,可以对西瓜耐铝性进行有效的鉴定。

本试验还对铝敏感性西瓜 ZM 和耐铝性西瓜 HY 在铝胁迫下内部生理特性的变化进行了研究。铝胁迫会导致植物膜脂过氧化破坏膜结构,这是植物受铝毒害的重要原因之一^[21-23]。MDA 是膜脂过氧化的产物,可以反映膜脂过氧化程度和膜脂伤害程度。本试验表明,铝处理均提高了 ZM 和 HY 叶片内的 MDA 含量,已经对西瓜细胞膜结构的稳定性造成不利的影响。ZM 在 $\text{Al}^{3+} \geq 500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA 含量维持较高水平,细胞膜伤害严重且不可恢复,而 HY 在 $\text{Al}^{3+} \leq 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 下,随着处理时间的延长膜系统伤害可得到一定程度的恢复。说明在一定浓度和时间范围内,西瓜可通过自身调节使膜系统所受铝毒害得到一定程度恢复,且耐性品种 HY 对铝浓度的耐受范围大于铝敏感品种 ZM。因此,MDA 含量的变化可以作为判断不同基因型西瓜的耐铝程度的生理指标之一。

脯氨酸是重要的渗透调节物质和抗氧化物质,具有防御膜脂过氧化伤害的功能,与植物清除活性氧也有密切关系,因此脯氨酸常被作为反应植物耐铝性的一个重要生理指标^[24]。本研究中 ZM 在最低铝浓度 $250 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下积累 Pro 较多;在 $\text{Al}^{3+} \geq 500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理第 15 d 时 Pro 含量均显著小于对照。HY 在铝处理第 5、10、15 d 相比对照均有较多 Pro 积累,可见西瓜可通过提高 Pro 含量抵御铝胁迫,而 HY 即使在较高铝浓度处理下仍可维持较高 Pro 含量。综合 MDA、Pro 分析,铝胁迫下 HY 叶片 Pro 含量的升高与其在较高铝浓度下膜系统的维持有密切关系,推测脯氨酸积累是西瓜缓解铝毒害的生理原因之一。

活性氧自由基的产生是铝毒害的原因之一,非生物胁迫导致植物体内活性氧含量上升^[25]。活性氧升高会导致抗氧化酶活性升高,植物抗氧化酶系统对于及时清除细胞内活性氧自由基、保护细胞膜的结构稳定性具有重要意义。抗氧化酶系统中 SOD 专一清除 $\text{O}_2^{\cdot-}$,其产物 H_2O_2 则由 POD 和 CAT 清除^[26]。许多研究都表明铝胁迫可以激发植物 SOD 酶活性的升高^[27-28]。本研究中,铝处理下 ZM 叶片 SOD 活性增幅较小, HY 叶片 SOD 活性在铝处理 5、15 d 时均有较大增幅,可见

耐铝性西瓜品种 HY 在铝处理下对 SOD 酶活的激发强于铝敏感西瓜品种 ZM。一定浓度及时间的铝处理下, ZM、HY 叶片 POD 活性均可升高,对小麦、水稻等作物的诸多研究中也发现铝胁迫会导致 POD 活性上升^[29-31],而在长时间及高浓度的铝处理下 ZM 叶片 POD 活性较对照下降明显, HY 则在铝处理第 10、15 d 时各处理 POD 活性均显著高于对照,可见 ZM 和 HY 的 POD 酶活性在对铝的反应上存在差异。本研究中 ZM、HY 在铝处理下叶片 CAT 活性较对照变化均较小,可能在铝胁迫条件下西瓜活性氧清除体系中 CAT 作用相对较小。因此 CAT 不适合单独作为鉴定西瓜耐铝性指标。此外值得注意的是第 10 d 时,随铝处理浓度升高 HY 叶片 SOD、CAT 活性均有所降低,表现为负协同作用, POD 活性反而升高,可能是三种酶发挥效应的时间阶段不同,与韦冬萍对油菜铝胁迫研究的结果相一致^[32]。很多逆境胁迫的研究表明, SOD、CAT 在植物抵抗逆境中确实存在协同的作用^[33-34],已有研究通过转基因手段同时提高烟草 SOD、CAT 活性,从而使植物抵抗逆境胁迫能力增加^[35]。然而抗氧化酶的表达机制十分复杂,遗传信息、生长期及处理条件等内外因素的差异均会造成结果的差异,因此对于西瓜铝胁迫中抗氧化酶清除活性氧的机制有待进一步进行全面而深入的研究与探讨。

4 结论

不同基因型的西瓜在铝处理下的反应有一定的差异性,根据根长、地上部及地下部干重、根系活力可以从 4 个不同基因型西瓜中选出铝敏感品种 ZM 和耐铝品种 HY。随铝处理浓度、时间的变化,铝敏感品种 ZM 膜脂伤害指标 MDA 含量升高较 HY 更明显且膜脂伤害更难恢复;耐铝品种 HY 在铝处理下 Pro 可以维持在较高水平, SOD、POD 酶活性可受更大激发。因此,MDA、Pro、SOD、POD 是反映西瓜耐铝性的重要生理指标。此外, CAT 不适合单独作为西瓜耐铝指标。

参考文献:

- [1] 葛敏, 王华, 陶跃之. 水稻耐铝毒机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 78-81.
GE Min, WANG Hua, TAO Yue-zhi. Progress on the mechanism of aluminum tolerance in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(9): 78-81.
- [2] 张帆, 罗承德, 张健. 植物铝毒害胁迫发生机制及其内在缓解途径研究进展[J]. 四川环境, 2005, 24(3): 64-69.
ZHANG Fan, LUO Cheng-de, ZHANG Jian. Review on Al toxicity

- mechanism to plants in acid soil and tolerance and resistant mechanism of plants to Al toxicity[J]. *Sichuan Environment*, 2005, 24(3):64-69.
- [3] Ma J F, Furukawa J. Recent progress in the research of external Al detoxification in higher plants: A mini-review[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2003, 97:46-51.
- [4] Kochina L V, Pineors M A, Hoekenga O A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity[J]. *Plant and Soil*, 2005, 274:175-195.
- [5] 翁建华, 黄连芬, 刘晓茹, 等. 土壤酸化及天然土壤溶液中铝的形态[J]. *中国环境科学*, 2000, 20(6):501-505.
- WENG Jian-hua, HUANG Lian-fen, LIU Xiao-ru, et al. Acidification of soils and aluminum species in natural soil solution[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(6):501-505.
- [6] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:171-173.
- HUANG Chang-yong. *Pedology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:171-173.
- [7] 赵 萌, 李 敏, 王森焱, 等. 西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J]. *微生物学通报*, 2008, 35(8):1251-1254.
- ZHAO Meng, LI Min, WANG Miao-yan, et al. Effects of watermelon replanting on main microflora of rhizosphere and activities of soil enzymes[J]. *Microbiology China*, 2008, 35(8):1251-1254.
- [8] 张 娜, 曾红霞, 任 俭, 等. 低温胁迫下西瓜生理生化指标研究进展[J]. *长江蔬菜*, 2012(6):11-13.
- ZHANG Na, ZENG Hong-xia, REN Jian, et al. Correlation analysis between physiological characteristics and chilling injury index of watermelon seeding under cold-stress[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2012(6):11-13.
- [9] 韩志平, 郭世荣, 尤秀娜. 盐胁迫对西瓜幼苗活性氧代谢和渗透调节物质含量的影响[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(11):2210-2218.
- HAN Zhi-ping, GUO Shi-rong, YOU Xiu-na. Metabolism of reactive oxygen species and contents of osmotic substances in watermelon seedlings under salinity stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(11):2210-2218.
- [10] 孙军伟, 冀天会, 杨子光, 等. 玉米萌芽期抗旱性鉴定研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(3):104-107.
- SUN Jun-wei, JI Tian-hui, YANG Zi-guang, et al. Study on identification of the drought resistant in maize seedling emergence stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(3):104-107.
- [11] 刘家尧, 刘 新. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- LIU Jia-yao, LIU Xin. *Plant physiology experiments course*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [12] 张以顺, 黄 霞, 陈云凤. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- ZHANG Yi-shun, HUANG Xia, CHEN Yun-feng. *Plant physiology experiments course*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [13] Foy C D, Carter T E J R, Duke J A, et al. Correlation of shoot and root growth and its role in selecting for Al tolerance in soybean[J]. *Plant Nutr*, 1993, 16:305-325.
- [14] 林咸永, 章永松, 罗安程. 不同小麦基因型耐铝性的差异及筛选方法的研究[J]. *植物营养与肥科学报*, 2001, 7(1):64-70.
- LIN Xian-yong, ZHANG Yong-song, LUO An-cheng. Differences of aluminum tolerance on wheat genotypes and its screening techniques[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1):64-70.
- [15] 黄邦全, 薛小桥, 白景华. 不同油菜品种耐铝性比较研究[J]. *湖北大学学报*, 2001, 2(23):343-376.
- HUANG Bang-quan, XUE Xiao-qiao, BAI Jing-hua. Comparison of aluminum tolerance among different cultivars of *Brassica napus* L. [J]. *Journal of Hubei University*, 2001, 2(23):343-376.
- [16] Ma J F, Zheng S J, Li X F, et al. A rapid hydroponic screening for aluminum tolerance in barley[J]. *Plant Soil*, 1997, 191(1):133-137.
- [17] 刘德兴, 年 海, 杨存义, 等. 耐酸铝大豆品种资源的筛选与鉴定[J]. *大豆科学*, 2013, 32(1):46-49.
- LIU De-xing, NIAN Hai, YANG Cun-yi, et al. Screening and identifying soybean germplasm tolerant to acid aluminum[J]. *Soybean Science*, 2013, 32(1):46-49.
- [18] 王 芳, 刘 鹏, 徐根娣, 等. 铝对荞麦根系的影响[J]. *广西植物*, 2006, 26(3):321-324.
- WANG Fang, LIU Peng, XU Gen-di, et al. Effects of aluminum amount in soil on the root growth of buckwheat[J]. *Guihaia*, 2006, 26(3):321-324.
- [19] 周 媛, 徐根娣, 刘 鹏, 等. 酸铝胁迫对栝楼根系生长及铝积累的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12):2434-2439.
- ZHOU Yuan, XU Gen-di, LIU Peng, et al. Effects of acid aluminum stress on root growth and aluminum accumulation of *Trichosathes kirilowii* Maxim[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2434-2439.
- [20] 李德华, 贺立源, 刘武定. 玉米根系活力与耐铝性的关系[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(1):161-164.
- LI De-hua, HE Li-yuan, LIU Wu-ding. The correlation between Al tolerance and root activity in maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(1):161-164.
- [21] Matsumoto H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants[J]. *International Review of Cytology*, 2000:1-46.
- [22] Ryan P R, Dittomaso J M, Kochian L V. Aluminum toxicity in roots: An investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(2):437.
- [23] Foy C D. The physiology of plant adaptation to mineral stress[J]. *Iowa State J Res*, 1983, 57(4):355-391.
- [24] Floydra Nagy I. Formation of long-lived hydroxyl free radical adducts of proline and hydroxyproline in a fenton reaction[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1984, 790(1):94-97.
- [25] 任立民, 刘 鹏, 谢忠雷, 等. 植物对铝毒害的抗逆性研究进展[J]. *土壤通报*, 2008, 39(1):177-181.
- REN Li-min, LIU Peng, XIE Zhong-lei, et al. Research progress in plant adaptation to aluminum toxicity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1):177-181.
- [26] 尹永强, 胡建斌, 邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(1):105-110.
- YIN Yong-qiang, HU Jian-bin, DENG Ming-jun. Latest development of antioxidant system and responses to stress in plant leaves[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(1):105-110.

- [27] Pereira L B, de A Mazzanti C M, Cargnelutti D, et al. Differential responses of oat genotypes: Oxidative stress provoked by aluminum[J]. *BioMetals*, 2011, 24(1):73-83.
- [28] Ma B H, Gao L, Zhang H X, et al. Aluminum-induced oxidative stress and changes in antioxidant defenses in the roots of rice varieties differing in Al tolerance[J]. *Plant Cell Rep*, 2012, 31(4):687-696.
- [29] Hossain M A, Zakir Hossain A, Kihara T, et al. Aluminum-induced lipid peroxidation and lignin deposition are associated with an increase in H₂O₂ generation in wheat seedlings[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2005, 51(2):223-230.
- [30] Sharma P, Dubey R. Involvement of oxidative stress and role of antioxidant defense system in growing rice seedlings exposed to toxic concentrations of aluminum[J]. *Plant Cell Rep*, 2007, 26(11):2027-2038.
- [31] Achary V M, Jena S, Panda K K, et al. Aluminium induced oxidative stress and DNA damage in root cells of *Allium cepa* L.[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2008, 70(2):300-310.
- [32] 韦冬萍, 刘 鹏, 徐根娣, 等. Al胁迫下油菜生物量 Al 积累及保护酶系统的响应[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2351-2356.
- WEI Dong-ping, LIU Peng, XU Gen-di, et al. Response of biomass, Al-accumulation and protective enzyme system of oilseed rape to aluminum stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2351-2356.
- [33] 王俊刚, 陈国仓, 张承烈. 水分胁迫对 2 种生态型芦苇(*Phragmites communis*)的可溶性蛋白含量、SOD、POD、CAT 活性的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3):561-565.
- WANG Jun-gang, CHEN Guo-cang, ZHANG Cheng-lie. The effects of water stress on soluble protein content, the activity of SOD, POD and CAT of two ecotypes of reeds(*Phragmites communis*)[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(3):561-565.
- [34] 彭 艳, 李 洋, 杨广笑, 等. 铝胁迫对不同小麦 SOD、CAT、POD 活性和 MDA 含量的影响[J]. 生物技术, 2006, 16(3):38-42.
- PENG Yan, LI Yang, YANG Guang-xiao, et al. Effects of aluminum stress on the activities of SOD, POD, CAT and the contents of MDA in the seedlings of different wheat cultivars[J]. *Biotechnology*, 2006, 16(3):38-42.
- [35] 窦俊辉, 喻树迅, 范术丽, 等. SOD 与植物胁迫抗性[J]. 分子植物育种, 2010, 8(2):359-364.
- DOU Jun-hui, YU Shu-xun, FAN Shu-li, et al. SOD and plant stress resistance[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2010, 8(2):359-364.