

四种常见杂草根系及根边缘细胞对铝胁迫的响应

周楠, 刘鹏*, 徐根娣, 汪晔, 孙芳华, 陈文荣

(浙江师范大学植物学实验室, 金华 321004)

摘要:以 2 种禾本科杂草(升马唐、稗草)和 2 种菊科杂草(旱莲草、野茼蒿)为实验材料,通过砂培法研究不同科属杂草根部对铝胁迫的响应。结果表明:4 种杂草根边缘细胞活性均随着铝胁迫浓度和时间呈显著下降的趋势,但禾本科杂草根系边缘细胞的活性高于菊科杂草,且活性的降低幅度较小;4 种杂草根相对伸长率均随铝浓度和处理时间的增加呈递减趋势,但铝对旱莲草和野茼蒿根生长的抑制程度要明显高于升马唐和稗草;根系的铝含量、游离脯氨酸含量、MDA 含量和质膜透性均随铝处理浓度和处理时间的增加而增大,且在高铝浓度($1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时达到最大值,但升马唐和稗草根系的铝含量、游离脯氨酸含量、MDA 含量和质膜透性均显著低于旱莲草和野茼蒿,且随着铝浓度的增加,禾本科杂草根系的游离脯氨酸含量及 MDA 含量的变化没有达到显著水平($P>0.05$)。由此说明,铝毒对杂草造成的伤害随着浓度增加和时间延长而加重;升马唐和稗草的根系通过较高的根边缘细胞活性和根相对伸长率及较低的铝含量、游离脯氨酸含量、MDA 含量和质膜透性来增加其对铝的耐性;2 种禾本科杂草(升马唐、稗草)的耐铝性高于 2 种菊科杂草(旱莲草、野茼蒿)。

关键词:铝胁迫;杂草;根系;边缘细胞;耐性

文章编号:1000-0933(2009)12-6512-07 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Response to aluminum toxicity of four common weeds roots and border cells

ZHOU Nan, LIU Peng*, XU Gen-Di, WANG Ye, SUN Fang-Hua, CHEN Wen-Rong

Laboratory of Biological Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6512 ~ 6518.

Abstract: Four herbaceous plants, gramineae weeds (*Digitaria ciliaris*, *Echinochloa crusgali*) and composite weeds (*Eclipta prostrata*, *Crassocephalum crepidioides*) distributed in the red soils of the South China, were used to examine activity of root border cells, root relative elongation, levels of aluminum, proline, malondialdehyde (MDA), and membrane permeability (MP) in the Al-treated roots. It was found that activity of root border cells was significantly decreased with increasing Al^{3+} concentrations or treatment time in these four weeds. The decreasing magnitude was higher in composite weeds than in gramineae weeds, while the contents of aluminum, proline and MDA, and membrane permeability were increased in the roots. Further analysis showed that root growth was more markedly inhibited by Al in *Eclipta prostrata* and *Crassocephalum crepidioides* than in *Digitaria ciliaris* and *Echinochloa crusgali* under the same conditions. The contents of aluminum, proline and MDA, and membrane permeability in these four weeds roots reached a maximum at $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Al^{3+} concentrations, while the increase in *Digitaria ciliaris* and *Echinochloa crusgali* were less than in *Eclipta prostrata* and *Crassocephalum crepidioides*. No significant increase was observed on contents of proline and MDA in gramineae weeds roots among the different exterior Al^{3+} levels ($P>0.05$). These findings suggested that the damage levels of aluminum to these four weeds were enhanced with increasing Al concentrations and exposure time; However, the relatively higher activity of the root border cells, longer root relative elongation, lower levels of aluminum, proline, MDA and MP improved the tolerance to Al stress in *Digitaria ciliaris* and *Echinochloa crusgali*. Gramineae weeds (*Digitaria ciliaris*, *Echinochloa crusgali*) were more resistant to Al toxicity than composite weeds (*Eclipta prostrata*,

基金项目:浙江省重点科技攻关计划资助项目(2005C24011);浙江省自然科学基金资助项目(405135, 303461);浙江省分析测试基金资助项目(03091)

收稿日期:2008-09-01; 修订日期:2009-08-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sky79@zjnu.cn

Crassocephalum crepidioides).

Key Words: aluminium stress; weed; root; border cell; endurance

近年来,随着环境酸化问题的日益严重,尤其是大气污染引起的酸沉降和生理酸性肥料的大量施用,土壤酸化加剧,造成土壤中可溶性铝的含量明显增加^[1]。铝的毒害是酸性土壤限制作物产量的主要因子之一^[2]。根尖是受铝毒害的最初部位^[3]。大多数植物的根尖每天都要代谢产生大量的边缘细胞(border cell,简称BC),包裹在根冠外围形成一套完整的“套膜结构”。研究表明,边缘细胞在调节根部生态环境,中和根际周围一些有毒化学物质(如铝毒等),抵抗各种环境胁迫造成的根尖伤害中起着多种防御和保护功能^[4,5]。而根的伸长和根摄取铝的差异可以估算不同基因型作物在耐性间的差异^[6]。有许多证据表明,铝对植物细胞的胁迫最初表现在细胞膜上,因而铝胁迫下膜脂氧化的程度与抗铝能力密切相关^[7~10]。植物在逆境胁迫下或衰老过程中,质膜都会受到不同程度的损伤,主要是由于质膜中的不饱和脂肪酸发生过氧化作用,产生MDA,损伤质膜,使其选择透过功能减弱,质膜透性增大。因此,植物体中的MDA含量和质膜透性是植物抗性研究中的重要生理指标。脯氨酸是在广泛高等植物中经常大量积累的氨基酸,用来响应环境胁迫,包括铝胁迫^[11]。有人认为脯氨酸除了扮演渗透调节的角色外,它有助于在胁迫条件下稳定亚细胞结构(如膜蛋白),清除自由基,并缓冲细胞氧化还原电位^[12]。

不同植物种类或同一植物不同品种(基因型)耐铝的特性不同,表现不同基因型差异^[13],研究植物的耐铝机制,选育耐铝性强的品种是解决酸性土壤铝毒问题的重要途径^[14]。目前,有关植物的耐铝实验主要集中在农作物方面,如大豆(*Glycine max*)、小麦(*Triticum aestivum*)、水稻(*Oryza sativa*)、荞麦(*Fagopyrum esculentum*)等,而在杂草方面的研究较少。通过筛选和利用耐铝性强、生物量大的草本植物,可对这些酸性土壤地区的铝毒污染进行高效、无污染的生物治理,从而为作物生产提供良好的生存基础。因而,比较研究不同种类的杂草根系对铝胁迫的响应,将丰富植物耐铝机理,为铝毒的防治提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选择南方酸性红壤地区生长良好的10种杂草进行耐铝性筛选。从中选取耐性较强且为杂草中常见的禾本科杂草升马唐(*Digitaria ciliaris*),稗草(*Echinochloa crusgali*);菊科杂草旱莲草(*Eclipta prostrata*),野茼蒿(*Crassocephalum crepidioides*)为实验材料。

1.2 实验设计

(1)根边缘细胞 采用纯琼脂培养基悬空气法^[15]培养露白种子,于25℃黑暗条件下培养。当根长至2~3 mm时,每隔1 h向根喷洒1次铝液,铝以分析纯 AlCl_3 的形式加入,浓度分别为:0, 25, 50, 100, 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH4.5,在培养了12 h和24 h后,统计边缘细胞活性。

(2)生理指标 采用砂培实验,挑选饱满匀称的杂草种子,浸泡24 h后于25℃恒温培养箱中催芽。将已发芽的种子播于装有细砂的塑料盆中,幼苗生长1个月后选择长势一致的植株,移栽于装有0.5 kg细砂的塑料盆中,每盆6~8株,保持适当的株间距。视细砂含水量不定时浇灌蒸馏水,以保持细砂含水量不低于野外持水量的80%,且每周定时浇1次1/2Hoagland营养液。1周后进行铝处理,铝以分析纯 AlCl_3 的形式加入,浓度分别为0, 250, 500, 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH4.5,处理10 d、20 d后取植物根系进行各项指标的测定。各实验重复3次。

1.3 测定方法

根边缘细胞的测定采用FDA-PI荧光染色法^[16],BC活性=活细胞数/细胞总数;根长的测定采用直接测量法,根相对伸长率=有铝处理的根伸长量/无铝处理的根伸长量;铝含量的测定采用羊毛铬菁R法^[17];游离脯氨酸含量、质膜透性、丙二醛含量测定都采用中国科学院上海植物生理研究所的方法^[18]。

1.4 数据分析

根据 3 次独立实验所得数据计算平均值和标准偏差 (STDEV), 利用 SPSS13.0 分析软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 铝对杂草根系边缘细胞活性的影响

表 1 表明, 同一时间内随铝液浓度的增加, 边缘细胞存活率有依次递减的趋势, 说明铝浓度的升高对边缘细胞的伤害作用增强。随着铝处理时间的延长, 在同一铝液浓度下, 存活率也依次递减, 说明铝胁迫时间也会明显影响边缘细胞的活性, 胁迫时间的增加会加大植物根边缘细胞所受到的抑制作用。虽然 4 种杂草的根系边缘细胞活性都随着处理时间和浓度的增加呈依次递减的趋势, 但禾本科杂草边缘细胞的活性高于菊科杂草, 且变化幅度低于菊科杂草, 说明不同物种之间对铝的耐性存在着差异性。

表 1 4 种杂草根边缘细胞活性对铝胁迫的响应 (平均值 $\pm$ 标准偏差)

Table 1 Effect of Al^{3+} on the activity of root border cells of four weeds (Means $\pm$ SD)

物种 Species	Al^{3+} 处理时间 (h) Time of Al treatment	Al^{3+} 处理浓度 Treatment concentration of Al^{3+} ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)				
		0	25	50	100	200
升马唐	12	0.77 $\pm$ 0.01a	0.69 $\pm$ 0.001b	0.68 $\pm$ 0.02b	0.67 $\pm$ 0.05b	0.56 $\pm$ 0.04c
<i>Digitaria ciliaris</i>	24	0.68 $\pm$ 0.08a	0.63 $\pm$ 0.002b	0.64 $\pm$ 0.09b	0.51 $\pm$ 0.02c	0.48 $\pm$ 0.03d
稗草	12	0.72 $\pm$ 0.03a	0.63 $\pm$ 0.06b	0.62 $\pm$ 0.04b	0.52 $\pm$ 0.01c	0.45 $\pm$ 0.03d
<i>Echinochloa crusgali</i>	24	0.65 $\pm$ 0.01a	0.59 $\pm$ 0.01b	0.61 $\pm$ 0.03b	0.54 $\pm$ 0.03c	0.39 $\pm$ 0.01d
早莲草	12	0.61 $\pm$ 0.05a	0.51 $\pm$ 0.02b	0.46 $\pm$ 0.01c	0.29 $\pm$ 0.02d	0.15 $\pm$ 0.04e
<i>Eclipta prostrata</i>	24	0.46 $\pm$ 0.01a	0.42 $\pm$ 0.03b	0.29 $\pm$ 0.02c	0.17 $\pm$ 0.02d	0.08 $\pm$ 0.01e
野苘蒿 <i>Crassocephalum</i>	12	0.63 $\pm$ 0.04a	0.55 $\pm$ 0.01b	0.52 $\pm$ 0.03c	0.40 $\pm$ 0.01d	0.21 $\pm$ 0.02e
<i>crepidioides</i>	24	0.51 $\pm$ 0.02a	0.47 $\pm$ 0.03b	0.39 $\pm$ 0.09c	0.25 $\pm$ 0.08d	0.06 $\pm$ 0.01e

用 LSD 法检验差异性, 表中同一行含有相同字母的表示没有显著性差异 ($P > 0.05$), 下同 The same letter within a row indicates no significant at 95% probability using LSD test, the same below

2.2 铝对杂草根生长的影响

从表 2 可以看出, 随着处理时间和铝浓度的增加, 4 种杂草根相对伸长率呈依次递减的趋势, 铝对早莲草和野苘蒿根生长的抑制程度要明显高于升马唐和稗草。铝处理 10 d 后, 升马唐和稗草在 $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铝浓度处理下, 其根的生长并没有受到明显抑制, 反而比对照有所增长, 但增长程度有所下降; 在铝处理浓度为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 升马唐根的生长受到了抑制, 且达到显著水平, 但稗草的根长仍比对照有所增加; 而早莲草和野苘蒿却随着铝浓度的增加, 其根的生长受到了显著抑制, 且呈递增趋势。在铝处理 20 d 后, 4 种杂草的根相对伸长率均随处理浓度的升高呈现下降趋势并达到显著水平, 且在最高铝处理浓度 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下根相对伸长率达到最小值。

表 2 铝对 4 种杂草根相对伸长率的影响 (平均值 $\pm$ 标准偏差)

Table 2 Effect of Al^{3+} on the root relative elongation of four weeds (Means $\pm$ SD)

种 Species	Al^{3+} 处理时间 (d) Time of Al treatment	Al^{3+} 处理浓度 Treatment concentration of Al^{3+} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		
		250	500	1000
升马唐 <i>Digitaria ciliaris</i>	10	1.12 $\pm$ 0.08a	1.06 $\pm$ 0.06a	0.80 $\pm$ 0.01b
	20	0.77 $\pm$ 0.04a	0.73 $\pm$ 0.13a	0.46 $\pm$ 0.11b
稗草 <i>Echinochloa crusgali</i>	10	1.86 $\pm$ 0.01a	1.85 $\pm$ 0.01a	1.60 $\pm$ 0.12b
	20	0.89 $\pm$ 0.02a	0.62 $\pm$ 0.03b	0.42 $\pm$ 0.06c
早莲草 <i>Eclipta prostrata</i>	10	0.50 $\pm$ 0.13a	0.24 $\pm$ 0.07b	0.12 $\pm$ 0.09c
	20	0.43 $\pm$ 0.08a	0.23 $\pm$ 0.04b	0.11 $\pm$ 0.07c
野苘蒿 <i>Crassocephalum crepidioides</i>	10	0.61 $\pm$ 0.06a	0.49 $\pm$ 0.03b	0.028 $\pm$ 0.03c
	20	0.40 $\pm$ 0.09a	0.33 $\pm$ 0.08b	0.025 $\pm$ 0.04c

2.3 杂草根部铝的积累

从表 3 可以看出,4 种杂草即使在最低的铝浓度处理下,其根系中的铝含量与对照相比均有显著增加。4 种杂草根系积累的铝均随铝处理浓度的升高而显著增加,且在 1000 mg·L⁻¹ 铝浓度下根系铝含量达到最高值。此外,4 种杂草在铝处理 20 d 后的根系铝含量均高于处理 10 d,并且在相同铝浓度处理下,菊科 2 种杂草根系的铝含量均高于禾本科杂草。从表 3 还可以看出,没有经过铝处理的植株中也含有一些铝,这可能与在砂培过程中浇灌的溶液有关。

表 3 铝胁迫下 4 种杂草根系铝的积累(平均值 ± 标准偏差)

Table 3 Al accumulation in roots of four weeds under Al³⁺ stress(mg·g⁻¹ DW) (Means ± SD)

物种 Species	Al ³⁺ 处理时间(d) Time of Al treatment	Al ³⁺ 处理浓度 Treatment concentration of Al ³⁺ (mg·L ⁻¹)			
		0	250	500	1000
升马唐	10	1.18 ± 0.22d	4.63 ± 0.33c	8.60 ± 0.28b	10.08 ± 0.22a
<i>Digitaria ciliaris</i>	20	1.68 ± 0.40d	7.72 ± 0.36c	9.11 ± 0.50b	15.80 ± 0.56a
稗草	10	1.39 ± 0.01d	4.72 ± 0.05c	9.07 ± 0.59b	11.23 ± 0.28a
<i>Echinochloa crusgali</i>	20	1.37 ± 0.03c	10.25 ± 0.87b	13.33 ± 0.43a	14.04 ± 0.50a
旱莲草	10	1.89 ± 0.02c	14.12 ± 0.23b	17.12 ± 0.19a	19.47 ± 0.51a
<i>Eclipta prostrata</i>	20	1.18 ± 0.49d	17.63 ± 0.24c	19.87 ± 0.51b	25.03 ± 0.08a
野苘蒿	10	1.81 ± 0.08c	15.46 ± 0.17b	17.09 ± 0.42a	18.98 ± 0.17a
<i>Crassocephalum crepidioides</i>	20	1.55 ± 0.19c	18.44 ± 0.24b	19.53 ± 0.19b	22.83 ± 1.02a

2.4 铝对杂草生理指标的影响

2.4.1 铝对杂草根系游离脯氨酸含量的影响

在铝处理期间,游离脯氨酸在 4 种杂草根系中的积累如图 1 所示。在铝胁迫下,菊科杂草(旱莲草和野苘蒿)根系游离脯氨酸含量的变化比禾本科杂草(升马唐和稗草)显著。经 10 d 铝处理,升马唐和稗草根系中游离脯氨酸含量与对照相比有少量增加,但并没有达到显著性水平,而旱莲草和野苘蒿根系游离脯氨酸的含量随着处理浓度的升高呈上升趋势,且在 1000 mg·L⁻¹ 铝处理下二者根系脯氨酸的含量达到峰值,分别是对照的 1.7 倍和 2.5 倍;铝处理 20 d 后,4 种杂草根系中游离脯氨酸的含量与对照相比变化不大,但与处理 10 d 相比,升马唐和稗草的根系脯氨酸含量略有升高,而旱莲草和野苘蒿的根系脯氨酸含量却呈现显著下降的趋势。

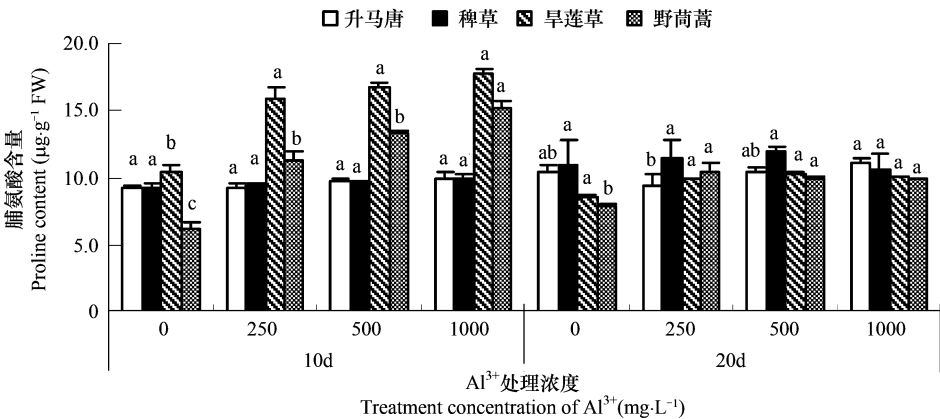


图 1 铝对 4 种杂草根系脯氨酸含量的影响

Fig. 1 The effect of Al³⁺ on the proline content of four weeds in roots

2.4.2 铝对杂草根系丙二醛含量的影响

丙二醛是植物细胞膜脂过氧化产物,是氧化伤害的生理指标。从图 2 可以看出,铝处理 10 d 后,随着处

理浓度的增加升马唐和稗草的 MDA 含量始终与对照保持在同一水平,而旱莲草和野苘蒿的 MDA 含量却有显著上升的趋势,且均在 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理下 MDA 含量达到最大值,分别为对照的 15.9 倍和 7.6 倍;经 20 d 铝处理后,4 种杂草根系的 MDA 含量均随着处理浓度的升高而升高。如图 2 所示,处理 20 d 后 MDA 含量在根系中大量积累,4 种杂草根系的 MDA 含量均高于处理 10 d,但禾本科杂草根系的 MDA 含量的变化趋势没有菊科杂草显著。

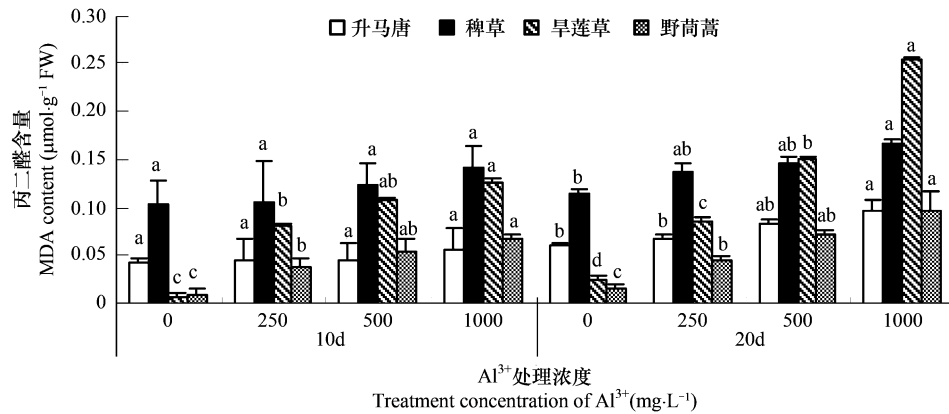


图2 铝对4种杂草根系丙二醛含量的影响

Fig. 2 The effect of Al^{3+} on the MDA content of four weeds in roots

2.4.3 铝对杂草根系质膜透性的影响

不同浓度的铝处理使杂草根系细胞质膜透性有所增大。从图3可以看出,随着铝处理浓度的增加,4种杂草根系的质膜透性均逐渐增大,但在低浓度处理下($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的质膜透性相对于对照的变化要比中高铝浓度(500 、 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理下小,说明低浓度的铝处理对杂草根系细胞影响较小,而中高浓度铝处理对根系细胞造成胁迫,对细胞质膜结构有一定的破坏作用,导致膜结构及其稳定性破坏,使其通透性增加,质膜透性增大。从不同处理时间来看,随着处理时间的延长,杂草根系的质膜透性呈增大趋势,这可能是由铝毒害积累所引起的。4种杂草在铝处理下质膜透性的变化趋势相同,但菊科杂草的变化幅度比禾本科杂草要大。

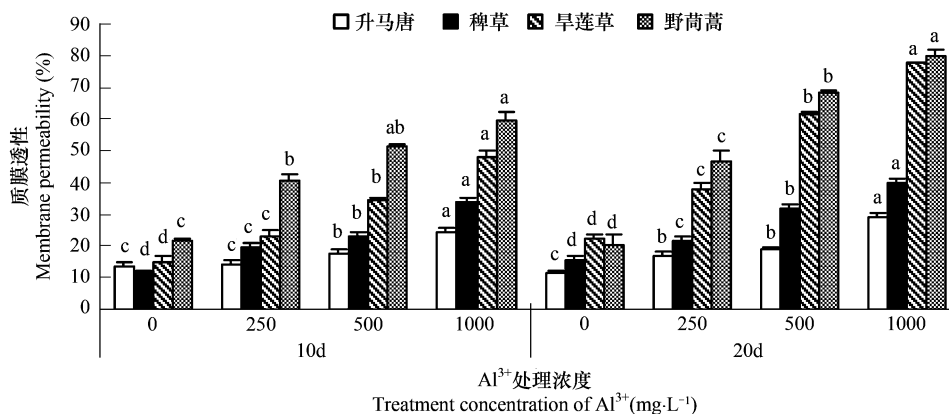


图3 铝对4种杂草根系质膜透性的影响

Fig. 3 The effect of Al^{3+} on the membrane permeability (MP) of four weeds in roots

3 讨论

外部排斥是植物抗铝机理之一,是指植物根系将大量铝毒拒之于根表以外而免除其危害。植物对铝毒的外部排斥机制中,根边缘细胞是植物抗铝毒胁迫的一个重要机制。边缘细胞主要分布于根尖、根冠分裂组织周围,不仅减少根系生长过程中与土壤的磨擦作用,而且可以减少铝进入根尖和根冠分裂组织以保护植物根

系免受铝毒伤害^[5]。不同铝浓度及胁迫时间下,4种杂草根边缘细胞活性均依次递减,说明铝浓度及胁迫时间的增大均会对边缘细胞产生伤害,且伤害程度依次加强。

植物根系对周围环境的反应是最快速、最直接的,很多研究结果表明,铝毒最容易识别的部位就是根系,其最明显的症状就是根系生长的抑制。虽然铝对植物来说是非必需元素,但在先前的实验中发现,一定浓度的铝可以促进植物的生长,可能是一定浓度铝会维持细胞膜的稳定性,减少细胞内的外渗物而对植物的生长有利^[19]。本实验表明,在 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝浓度短期处理时,不仅没有抑制禾本科2种杂草根的生长,反而对根生长起促进作用,但却对菊科杂草根的伸长起到了抑制作用;而长期的铝处理对4种杂草根的生长均起到了抑制的作用,这就说明铝对植物的毒害存在一个浓度临界值的问题,在临界值之下,铝可以促进或刺激植物的生长,浓度超过了临界值,铝就会对植物产生伤害,不同的植物,铝的临界值是不相同的。从本实验结果可以看出,升马唐和稗草的浓度临界值要高于早莲草和野苘蒿。

有报道证明,铝胁迫下铝含量主要集中在根部^[6]。研究结果表明,禾本科(升马唐和稗草)和菊科(早莲草和野苘蒿)杂草根系铝含量对铝毒的反应有着明显的差异。不同铝浓度和处理时间下,早莲草和野苘蒿的根系铝含量总体上高于升马唐和稗草,这可能是升马唐和稗草通过较高的根边缘细胞活性来实现对铝的排斥作用,从而也使其根的生长受到一定的保护。对比前人关于作物根系铝含量的研究结果还发现,本次实验的4种杂草根系含铝量显著高于玉米^[20]等农作物。可见,选择耐铝杂草对治理酸性土壤的铝毒具有十分巨大的意义。

一般认为,低胁迫下抗逆性强的植物能够积累较多的脯氨酸,脯氨酸可作为植物抗逆性强弱的一个指标,而高强度胁迫对植物产生毒害时脯氨酸积累量的多少可以看作是植物体受环境胁迫的大小和受损伤的程度。因此,脯氨酸的积累既有一定的保护作用,又是一种伤害指标^[21]。本实验结果也表明,铝处理10d后,随着铝处理浓度的增加,2种菊科杂草根系的脯氨酸含量也大量积累,表明铝处理对早莲草和野苘蒿根系生长造成了一种胁迫,根系启动自身的保护机制,积累大量的游离脯氨酸以维持根系细胞的压力势,以保证细胞膜的正常功能。随着处理时间的延长,20d铝处理下早莲草和野苘蒿根系积累的脯氨酸含量与10d铝处理相比显著下降,可以认为这可能是由于其根系极度损伤,细胞大量死亡,生理代谢已无法维持,保护机制不能正常启动,使脯氨酸合成受到影响。而升马唐和稗草根系的游离脯氨酸含量与对照相比略有增加,但始终保持在一个稳定水平,且铝处理20d后的根系脯氨酸含量与10d相比有所增加,但并没有达到显著水平,说明铝胁迫并没有对这两种禾本科杂草根系造成很大伤害。

MDA是膜脂氧化的主要产物之一,是有细胞毒性的物质,能够引起细胞膜功能紊乱。植物在逆境胁迫下或衰老过程中,质膜都会受到不同程度的损伤,主要是由于质膜中的不饱和脂肪酸发生过氧化作用,产生MDA,损伤质膜,使其选择透过功能减弱,质膜透性增大,从而使细胞内电解质外渗。因此,植物体中的MDA含量在某种意义上可反映细胞质膜过氧化作用的强弱,细胞外渗液的电导率则可表示质膜伤害或变性程度,两者均是植物抗性研究中的重要生理指标。实验结果表明,相比于对照(无铝处理),10d下菊科2种杂草根系积累的丙二醛含量随着处理浓度的升高而增加,而禾本科2种杂草根系的丙二醛含量却与对照保持在同一水平。而随着胁迫时间的延长,4种杂草根系的丙二醛含量均随铝浓度而增长;同时本实验中,铝胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长均提高了4种杂草根系的质膜透性,但禾本科的升马唐和稗草根系丙二醛含量及质膜透性的变化幅度均小于菊科的早莲草和野苘蒿,说明不同浓度铝处理对升马唐和稗草根系质膜影响较小,膜脂过氧化作用较弱,根系细胞能够维持正常的选择透过性。但早莲草和野苘蒿却随着铝处理浓度的增大,根系质膜受到损伤加大,膜脂发生过氧化作用,产生大量的丙二醛,又对质膜重复伤害,使其透性增加,根系电导率也显著增加。

综合以上结果表明,禾本科杂草升马唐和稗草通过较高的边缘细胞活性使铝禁锢于根尖表面,并使铝丧失对植物根尖的毒害作用,同时通过内部解毒机理使游离脯氨酸含量、MDA含量和质膜透性维持在较低水平,这样通过内部解毒和外部排斥两大耐铝机理来实现对铝的抵抗。禾本科的升马唐和稗草比菊科的早莲草

和野苘蒿更加耐铝,这将丰富耐铝的植物品种,尤其是野生杂草,也可为将来对酸性土壤铝毒的治理奠定一定的理论基础,提供必要的物质保证。

References:

- [1] Von Uexkull H R. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant Soil*, 1995, 171: 1—15.
- [2] Tian R S, Liu H T. Aluminum in acidic soils and its phytotoxicity. *Environmental Science*, 1989, 11(6): 41—45.
- [3] Kochian L V, Pineros M A, Hoekenga O A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant Soil*, 2005, 274: 175—195.
- [4] Hawes M C, Brigham L A, Wen F, *et al.* Function of root border cells in plant health: pioneers in the rhizosphere. *Annual Review of Phytopathology*, 1998, 36: 311—327.
- [5] Pan J W, Zhu M Y, Chen H, *et al.* Inhibition of cell growth caused by aluminum toxicity results from aluminum-induced cell death in barley suspension cells. *Plant Nutrition*, 2002, 25(5): 1063—1073.
- [6] Delhaize E, Ryan P R, Randall P J. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) II. Aluminum-stimulated excretion of malic acid from root apices. *Plant Physiology*, 1993, 103: 695—702.
- [7] Ahn S J, Rengel Z, Matsumoto H. Aluminum-induced plasma membrane surface potential and H⁺-ATPase activity in nearisogenic wheat lines differing in tolerance to aluminium. *New Phytologist*, 2004, 162: 71—79.
- [8] Oteiza P I. A mechanism for the stimulatory effect of aluminium on iron-induced lipid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1994, 308: 374—379.
- [9] Zhang G, Slaski J J, Archambault D J, *et al.* Aluminium-induced alterations in lipid composition of microsomal membranes from an aluminium-resistant and an aluminium sensitive cultivar of triticum aestivum. *Physiologia Plantarum*, 1996, 96: 683—691.
- [10] Yamamoto Y, Kobayashi Y, Matsumoto H. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots. *Plant Physiology*, 2001, 125: 199—208.
- [11] Khan A A, McNeilly T, Collins C. Accumulation of aminoacids, proline, and carbohydrates in response to aluminum and manganese stress in maize. *Plant Nutrition*, 2000, 23: 1303—1314.
- [12] Ashraf M, Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59: 206—216.
- [13] Zhang F S. *Plant nutrition ecophysiology and genetics*. Beijing Chinese Science and Technology Press, 1993. 205.
- [14] Li Y, Luo L T, Yang G X, *et al.* Comparative study of aluminum tolerance in different wheat cultivars. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, (5): 89—93.
- [15] Sun D L, Cui J C, Xu G D, *et al.* Biological characteristics of border cell of tomato and effect of aluminum on its viability. *Subtropical Plant Science*, 2006, 35(2): 1—4.
- [16] Pan J W, Zhu M Y, Chen H. Aluminum-induced cell death in root tips of barley. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 46: 71—79.
- [17] Qiu G K, Pang S W. Spectrophotometric determination of activated aluminum in soil using eriochrome cyanine R. *Journal of Instrumental Analysis*, 1989, 8(4): 68—71.
- [18] Institute of Plant Physiology of Shanghai, Chinese Academy of Sciences. *Guide to modern plant physiological experiments*. Beijing: Science Press, 1999. 303—305.
- [19] Liu P, Xu G D, Jiang X M, *et al.* The effect of aluminum on germination of soybean seed. *Seed*, 2003, (1): 30—32.
- [20] Anastasia Giannakoula, Michael Moustakas, Photini Mylona, *et al.* Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline, and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(4): 385—396.
- [21] Zong H, Liu E E, Guo Z F, *et al.* Effects of LaCl₃ and CP₂ on proline accumulation of rice seedling under drought and salt stresses. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(2): 173—177.

参考文献:

- [2] 田仁生, 刘厚田. 酸化土壤中铝及其植物毒性. *环境科学*, 1989, 11(6): 41~45.
- [13] 张福锁. *植物营养生态生理学和遗传学*. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 205.
- [14] 李洋, 罗立廷, 杨广笑, 等. 不同小麦品种耐铝性差异的比较研究. *麦类作物学报*, 2006, (5): 89—93.
- [15] 孙达丽, 崔洁晨, 徐根娣, 等. 番茄根边缘细胞生物学特性及铝对其活性的影响. *亚热带植物科学*, 2006, 35(2): 1~4.
- [17] 邱光葵, 庞叔薇. 羊毛铬菁 R 分光光度法测定土壤中的活性铝. *分析测试学报*, 1989, 8(4): 68~71.
- [18] 中国科学院上海植物生理研究所. *现代植物生理学实验指南*. 北京: 科学出版社, 1999. 303~305.
- [19] 刘鹏, 徐根娣, 姜雪梅, 等. 铝对大豆种子萌发的影响. *种子*, 2003, (1): 30~32.
- [21] 宗会, 刘娥娥, 郭振飞, 等. 干旱、盐胁迫下 LaCl₃ 和 CP₂ 对稻苗脯氨酸积累的影响. *作物学报*, 2001, 27(2): 173~177.