

# 可降解螯合剂对草坪植物高羊茅发育及生理的影响

王思予, 多立安\*, 赵树兰\*

(天津师范大学生命科学学院, 天津市动植物抗性重点实验室, 天津 300387)

**摘要:** 以盆栽高羊茅为试验材料, 研究了土壤中添加不同浓度 (3、6、9、12 和 15 mmol · kg<sup>-1</sup>) 生物可降解螯合剂谷氨酸二乙酸四钠 (Glutamic acid N, N-diacetic acid tetra sodium salt, GLDA) 和亚氨基二琥珀酸四钠盐 (Iminodisuccinic acid sodium salt, IDS) 处理对种子萌发和幼苗发育及生理的影响。结果表明, GLDA 和 IDS 处理对高羊茅种子萌发有一定的抑制作用, 并且高浓度的抑制作用更强。对高羊茅地上生物量的影响表现为低浓度促进, 高浓度抑制, 6 mmol · kg<sup>-1</sup> 处理生物量达到最大; 而所有螯合剂处理均显著抑制了根系的生长。与对照相比, 低浓度的螯合剂 (3、6 和 9 mmol · kg<sup>-1</sup>) 对叶绿素和类胡萝卜素含量没有显著影响, 但高浓度处理显著降低了其含量。螯合剂对 SOD 和 CAT 活性的影响呈现先增加后降低的趋势, 而 POD 活性和 MDA 含量则随螯合剂浓度的增加而升高, 表明添加螯合剂对高羊茅构成了逆境胁迫。鉴于此, 在两种螯合剂应用于土壤重金属修复时, 以低浓度 (6 mmol · kg<sup>-1</sup>) 施加为宜, 并且可以考虑在植物收获前几天施加或分次加入。

**关键词:** 草坪植物; 可降解螯合剂; GLDA; IDS; 生理

**中图分类号:** S 68

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2017) 11-2186-09

## Effects of Biodegradable Chelator on Growth and Physiology of *Festuca arundinacea* Seedlings

WANG Siyu, DUO Li'an\*, and ZHAO Shulan\*

(College of Life Sciences, Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Pot experiment was conducted to investigate the effects of biodegradable chelators - Glutamic acid N, N-diacetic acid tetra sodium salt (GLDA) and iminodisuccinic acid sodium salt (IDS) added at different concentrations (3, 6, 9, 12 and 15 mmol · kg<sup>-1</sup>) on seed germination, growth and physiology of *Festuca arundinacea* Schreb. seedlings. The results showed that the addition of GLDA and IDS inhibited seed germination of *F. arundinacea*, especially at high concentrations. The addition of GLDA and IDS at low concentrations increased aboveground biomass, but reduced it at high concentrations. The highest aboveground biomass was found at the chelator treatment of 6 mmol · kg<sup>-1</sup>, which was significantly higher than those in the other chelator treatments. The addition of GLDA and IDS

**收稿日期:** 2017-08-23; **修回日期:** 2017-11-17

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (31470548)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: duolian\_tjnu@163.com; zhaosl\_tjnu@126.com)

inhibited root growth of *F. arundinacea*, especially at high concentrations. Compared with the control, chelators at low concentrations (3, 6 and 9 mmol · kg<sup>-1</sup>) had no significant effects on chlorophyll and carotenoid contents. However, chelators at high concentrations significantly decreased chlorophyll and carotenoid contents. The activities of SOD and CAT increased and then decreased with the increase in chelator concentration, while the POD activity and MDA content increased constantly with the increase in chelator dosage. The results indicated that the addition of GLDA and IDS may form stress for *F. arundinacea*, and the plants could develop resistance to the stress by increasing the activities of antioxidant enzymes. Thus, when GLDA and IDS are applied in remediation of soil polluted by heavy metals, they should be applied at a low concentration (6 mmol · kg<sup>-1</sup>) and should be added several days before plants are harvested or added at a low dosage in multiple times.

**Keywords:** turfgrass; biodegradable chelator; GLDA; IDS; physiology

土壤中重金属不能被微生物分解, 且可溶性差, 会不断积累, 影响土壤性质, 同时重金属具有明显的生物富集作用, 可通过食物链影响人类健康 (周建军 等, 2014)。因此, 重金属污染土壤的修复普遍受到人们的关注 (蔡美芳 等, 2014)。土壤修复技术包含物理修复、化学修复和生物修复, 其中, 生物修复中的植物修复技术, 即利用植物对重金属的富集作用, 通过收获植物地上生物量达到移除土壤重金属的目的。由于其成本低廉、绿色环保等优势, 近年来成为污染土壤修复领域关注的焦点 (李韵诗 等, 2015)。

螯合剂可用来活化土壤中的重金属, 提高其生物有效性, 促进植物的吸收及向地上部转移, 达到提高植物修复效率的目的 (Huang et al., 1997; Baker, 2006)。乙二胺四乙酸 (EDTA) 是一种常用的螯合剂, 对重金属的络合能力强, 并且浓度越高, 时间越长, 次数越多, 效果越好 (杨冰凡 等, 2013)。但 EDTA 难降解, 在环境中存留时间长, 被 EDTA 活化的重金属如果不能全部被植物吸收, 可能会污染深层土壤, 甚至会有污染地下水的风险 (郭晓方 等, 2015)。有研究表明, EDTA 施用量为 2 mmol · kg<sup>-1</sup> 时, 20 d 后降解率仅为 14% (Wen et al., 2009)。因此, 土壤重金属修复研究旨在寻找能替代 EDTA 的可生物降解的螯合剂。

谷氨酸二乙酸四钠 (GLDA), 容易生物降解, 与金属离子的螯合能力不低于 EDTA。另外, GLDA 溶于水后呈碱性, 降低淋洗液 pH 为 4 和 7 时, 可以提高 GLDA 对土壤淋洗去除率 (Begum et al., 2012)。研究表明, GLDA 可以去除污泥中的重金属 (Wu et al., 2015), 并且可以有效促进东南景天 (*Sedum alfredii* Hance) 提取污染土壤中的重金属 (卫泽斌 等, 2014, 2015)。亚氨基二琥珀酸四钠盐 (IDS), 是一种新型的氨基酸类螯合剂, 具有生物可降解性, 对金属离子有很强的螯合能力, 尤其对铁、铜金属离子的螯合能力极佳, IDS 可以作为一种潜在的有效螯合剂来去除电池工业污泥中的重金属 (Wu et al., 2014)。尽管 GLDA 和 IDS 应用于植物修复重金属的研究有一些报道, 但未见两者对植物生长影响的报道。另外, 植物在受到逆境胁迫时会产生活性氧类物质, 促使膜脂中不饱和脂肪酸过氧化产生丙二醛 (MDA), 引起膜脂的过氧化, 破坏膜系统的完整性。而植物体自身有抗氧化酶系统来消除或减少活性氧带来的伤害, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 是保护系统的主要酶 (孔繁翔 等, 2000)。

草坪植物在重金属污染土壤改良方面很有前途, 因为它不进入食物链。有研究表明草坪植物高羊茅对重金属具有一定的耐性 (徐佩贤, 2014)。本研究中选用高羊茅为试验材料, 通过在土壤中添加不同浓度 GLDA 和 IDS, 研究其对高羊茅种子萌发和幼苗发育及生理的影响, 为两种生物可降解

螯合剂应用于重金属污染土壤的植物修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及其处理

试验用土壤取自天津师范大学校园内 0 ~ 20 cm 的表层土, 自然风干, 碾碎, 过筛, 备用。土壤质地为砂质粘土, pH 7.44, 全钾 45.61%, 全氮 0.21%, 有效磷 22.03 mg · kg<sup>-1</sup>, 有机质 4.68%, 饱和含水量 56%, 容重 0.87 g · cm<sup>-3</sup>。IDS 购于中国河北省石家庄开发区德赛化工有限公司, 密度 1.32 ~ 1.35 g · cm<sup>-3</sup>, pH 10.3 ~ 11.4, 有效含量为 75%; GLDA 购于阿克苏诺贝尔 (Akzo Nobel) 化工有限公司, pH 10 ~ 11, 有效含量为 47.4%。

草坪植物选取中国北方常见的高羊茅 (*Festuca arundinacea* Schreb.)。选择籽粒饱满的高羊茅种子, 预先在黑暗条件下浸泡 24 h。选取直径为 6.8 cm、高为 7.8 cm 的塑料盆, 装入 150 g 土壤, 每盆播种 100 粒种子。播种后, 将两种螯合剂分别用蒸馏水按各处理所需浓度配制成溶液, 均匀地将 60 mL 溶液施加到土壤中, 使其在土壤中的浓度分别为 3、6、9、12 和 15 mmol · kg<sup>-1</sup>, 并以等量不添加螯合剂的蒸馏水为对照。每个处理 3 次重复 (3 盆), 共计 33 盆。植物培养期间室内温度 18 ~ 25 °C, 相对湿度为 35% ~ 65%, 光照为透入室内的自然光 (6 856 ~ 27 090 lx)。每天补充适量水分, 以保证植物正常生长。

### 1.2 测定指标与测定方法

种子萌发相关指标测定: 以胚根伸出种皮 2 mm 为萌发标准, 每天记录萌发的种子数。萌发 10 d 时, 测定发芽率、发芽势和发芽指数 (闫兴富 等, 2016)。发芽率  $Gr$  (%) = (发芽种子数/供试种子数) × 100; 发芽势 (%) = (萌发 4 d 内发芽种子数/供试种子数) × 100; 发芽指数  $GI = \sum (Gt/Dt)$ , 式中  $Gt$  为在  $t$  日的发芽种子数,  $Dt$  为相应的发芽天数。

植物生物量测定: 播种 30 d 后刈割, 地上部分 108 °C 下杀青 20 min, 80 °C 条件下烘干。地下部分用清水洗净, 用滤纸吸去根外部的水分, 80 °C 烘干。

叶绿素和类胡萝卜素的测定: 取 0.2 g 鲜叶片, 剪成 1 ~ 2 mm 碎片, 浸泡于 20 mL 丙酮 - 乙醇 (体积比 1:1) 溶液中, 避光浸泡 24 h 至叶片完全脱色, 浸泡液为待测液。用紫外可见分光光度计于波长 663、645 和 470 nm 下测量吸光值, 计算叶绿素和类胡萝卜素的含量 (张宪政, 1992)。

酶的测定: 取新鲜草样 0.5 g, 加入 3 mL 预冷的提取液 (50 mmol · L<sup>-1</sup> 的磷酸缓冲液, pH 7.0, 内含 1 mmol · L<sup>-1</sup> EDTA) 和少许石英砂, 冰浴条件下充分研磨, 转入离心管中, 再用 2 mL 提取液洗研钵, 合并提取液, 于 4 °C, 10 000 r · min<sup>-1</sup> 离心 20 min, 上清液在 4 °C 冰箱保存, 用于抗氧化酶活性的测定。POD 活性的测定采用愈创木酚法 (Omran, 1980), CAT 活性测定用紫外分光光度法 (Singh et al., 2010), POD 和 CAT 的活性单位 (U) 定义为: 每克鲜质量每分钟分别使 OD<sub>470</sub> 和 OD<sub>240</sub> 增加 0.1 的酶量为一个酶活性单位。SOD 活性的测定采用氯化硝基四氮唑蓝 (NBT) 光化还原法 (Wang et al., 2014), 以每克鲜质量抑制 NBT 光化还原 50% 为一个酶活性单位。

丙二醛 MDA 含量的测定: 采用硫代巴比妥酸氧化法 (Sundar et al., 2004)。取叶片 0.5 g, 剪碎, 加入 2 mL 10% TCA, 石英砂研磨, 再加入 8 mL TCA 研磨, 匀浆液 4 000 × g 离心 10 min。取 4 mL 上清液, 加 4 mL 0.6% TBA 混匀, 试管加塞, 在 100 °C 水浴煮沸 15 min, 迅速冷却后离心。对

照以 4 mL 去离子水代替提取液。用紫外分光光度计 (SHIMADZU UV-1700) 分别测定上清液 450、532 和 600 nm 处的吸光值, 计算 MDA 浓度, 折算成每克鲜质量组织 MDA 含量。

1.3 数据处理

数据采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 并采用 Tukey 法, 在  $P = 0.05$  水平进行数据差异显著性检验, 采用 Microsoft Excel 2007 作图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度螯合剂对高羊茅种子萌发的影响

播种后 3 d, 高羊茅种子开始萌发, 10 d 时达到萌发稳定。螯合剂 GLDA 和 IDS 对高羊茅的发芽势、发芽率以及发芽指数的影响总体趋势是随着处理浓度的增加呈现明显的抑制 (表 1)。发芽率除 6 mmol · kg<sup>-1</sup> GLDA 和 3 mmol · kg<sup>-1</sup> IDS 处理外均显著低于对照, 而发芽势和发芽指数均显著低于对照, 以 15 mmol · kg<sup>-1</sup> 处理最低。

表 1 不同浓度螯合剂对高羊茅种子萌发指标的影响  
Table 1 Effect of chelators with different concentrations on germination indices of *Festuca arundinacea*

螯合剂 Chelator	浓度/ (mmol · kg <sup>-1</sup> ) Concentration	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index
GLDA	0	91.67 ± 1.20 a	88.33 ± 0.88 a	56.38 ± 0.93 a
	3	65.00 ± 7.51 b	50.33 ± 7.51 b	28.60 ± 3.92 b
	6	70.33 ± 2.60 ab	59.67 ± 4.67 b	24.98 ± 0.92 b
	9	42.00 ± 6.51 c	19.00 ± 5.51 c	10.79 ± 2.40 c
	12	12.00 ± 5.03 d	3.67 ± 2.73 c	2.54 ± 1.22 cd
	15	1.67 ± 1.67 d	0.33 ± 0.33 c	0.30 ± 0.30 d
IDS	0	91.67 ± 1.20 a	88.33 ± 0.88 a	56.38 ± 0.93 a
	3	82.00 ± 5.69 ab	65.33 ± 7.17 b	37.03 ± 3.40 b
	6	71.33 ± 1.86 b	59.33 ± 4.41 b	29.59 ± 1.63 b
	9	45.67 ± 1.76 c	31.00 ± 2.52 c	15.31 ± 1.22 c
	12	7.67 ± 3.93 d	3.00 ± 2.52 d	1.71 ± 0.94 d
	15	3.00 ± 2.52 d	0 d	0.52 ± 0.42 d

注: 表中不同小写字母表示同一螯合剂不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Note: Different lowercase letters indicate statistically significant differences between different treatments with the same chelator at the 0.05 level.

2.2 不同浓度螯合剂对高羊茅生物量的影响

添加不同浓度的螯合剂对高羊茅地上和地下干质量的影响如图 1 所示。可以看出, 高羊茅地上生物量在低浓度的螯合剂处理下与对照无显著差异, 螯合剂浓度为 6 mmol · kg<sup>-1</sup> 的处理, 地上干质量达到最大, 但浓度再增加, 则地上干质量下降, 12 和 15 mmol · kg<sup>-1</sup> 的螯合剂处理显著低于对照。高羊茅地下根系的生长则受到各浓度螯合剂处理的显著抑制, 螯合剂浓度为 15 mmol · kg<sup>-1</sup> 的处理地下干质量为最小, 仅为对照的 0.13%。

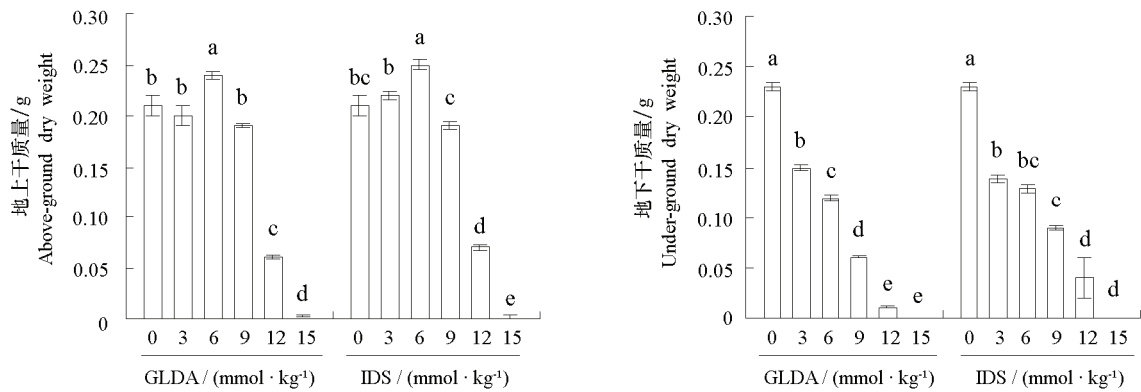


图 1 不同浓度螯合剂对高羊茅地上和地下干质量的影响

不同小写字母表示同一螯合剂不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Fig. 1 Effect of chelators with different concentrations on the aboveground and underground biomass of *Festuca arundinacea*

Different lowercase letters indicate statistically significant differences between different treatments with the same chelator at the 0.05 level.

### 2.3 不同浓度螯合剂对高羊茅叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

如表 2 所示, GLDA 和 IDS 低浓度 (3、6 和 9 mmol·kg<sup>-1</sup>) 处理对总叶绿素与类胡萝卜素含量的影响不显著; 而 12 和 15 mmol·kg<sup>-1</sup> 处理显著降低了叶绿素及类胡萝卜素含量, 15 mmol·kg<sup>-1</sup> 处理达到最低, 和对照相比, GLDA 处理总叶绿素及类胡萝卜素含量分别降低了 88%和 84%, IDS 处理总叶绿素及类胡萝卜素含量分别降低了 91%和 88%。

表 2 不同浓度螯合剂对高羊茅叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Table 2 Effect of chelators with different concentrations on the contents of chlorophyll and carotenoid of <i>Festuca arundinacea</i>					mg·g <sup>-1</sup>
螯合剂 Chelator	浓度/(mmol·kg <sup>-1</sup> ) Concentration	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoid
GLDA	0	4.36 ± 0.05 ab	1.87 ± 0.01 a	6.23 ± 0.06 a	0.68 ± 0.02 a
	3	4.49 ± 0.06 a	1.88 ± 0.03 a	6.37 ± 0.04 a	0.67 ± 0.01 a
	6	4.54 ± 0.05 a	1.88 ± 0.02 a	6.42 ± 0.06 a	0.69 ± 0.02 a
	9	4.21 ± 0.06 ab	1.38 ± 0.01 b	5.59 ± 0.07 a	0.55 ± 0.03 ab
	12	3.38 ± 0.01 b	0.56 ± 0.02 c	3.94 ± 0.02 b	0.42 ± 0.01 b
	15	0.56 ± 0.56 c	0.19 ± 0.19 d	0.75 ± 0.75 c	0.11 ± 0.11 c
IDS	0	4.36 ± 0.05 ab	1.87 ± 0.01 a	6.23 ± 0.06 a	0.68 ± 0.02 a
	3	4.50 ± 0.08 a	1.70 ± 0.11 a	6.21 ± 0.05 a	0.69 ± 0.04 a
	6	4.61 ± 0.02 a	1.89 ± 0.21 a	6.51 ± 0.20 a	0.69 ± 0.10 a
	9	4.34 ± 0.06 ab	1.82 ± 0.18 a	6.16 ± 0.11 a	0.67 ± 0.07 a
	12	2.14 ± 1.07 bc	0.35 ± 0.33 b	2.49 ± 1.26 b	0.41 ± 0.20 ab
	15	0.39 ± 0.39 c	0.14 ± 0.14 b	0.53 ± 0.53 b	0.08 ± 0.08 b

注: 表中不同小写字母表示同一螯合剂不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate statistically significant differences between different treatments with the same chelator at the 0.05 level.

### 2.4 不同浓度螯合剂对高羊茅保护酶活性和丙二醛含量的影响

在 12 和 15 mmol·kg<sup>-1</sup> 处理下, 植物生长受到强烈的抑制, 收获量很少, 不足以进行酶活性和 MDA 含量的测定, 因此氧化酶缺少 15 mmol·kg<sup>-1</sup> 处理的数据, 而 MDA 缺少 12 和 15 mmol·kg<sup>-1</sup>

处理的数据。

如图 2 所示, 两种螯合剂的  $\leq 9 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的浓度处理, POD 活性均与对照差异不显著。在  $12 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  时达到最大, GLDA 和 IDS 处理分别比对照增加了 70.04% 和 57.59%。

CAT 活性随两种螯合剂浓度的增加表现出先增加后降低趋势, GLDA 和 IDS 浓度为  $3 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的处理活性最高, 分别高出对照 5.18% 和 10.41%。SOD 活性当螯合剂浓度大于  $3 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 随螯合剂浓度的增加而降低, 在  $12 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  时达到最低。

MDA 含量随两种螯合剂浓度的增加先降低后增加。两种螯合剂浓度为  $9 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的处理丙二醛含量最高, GLDA 和 IDS 处理分别较对照增加了 22.50% 和 12.05%。

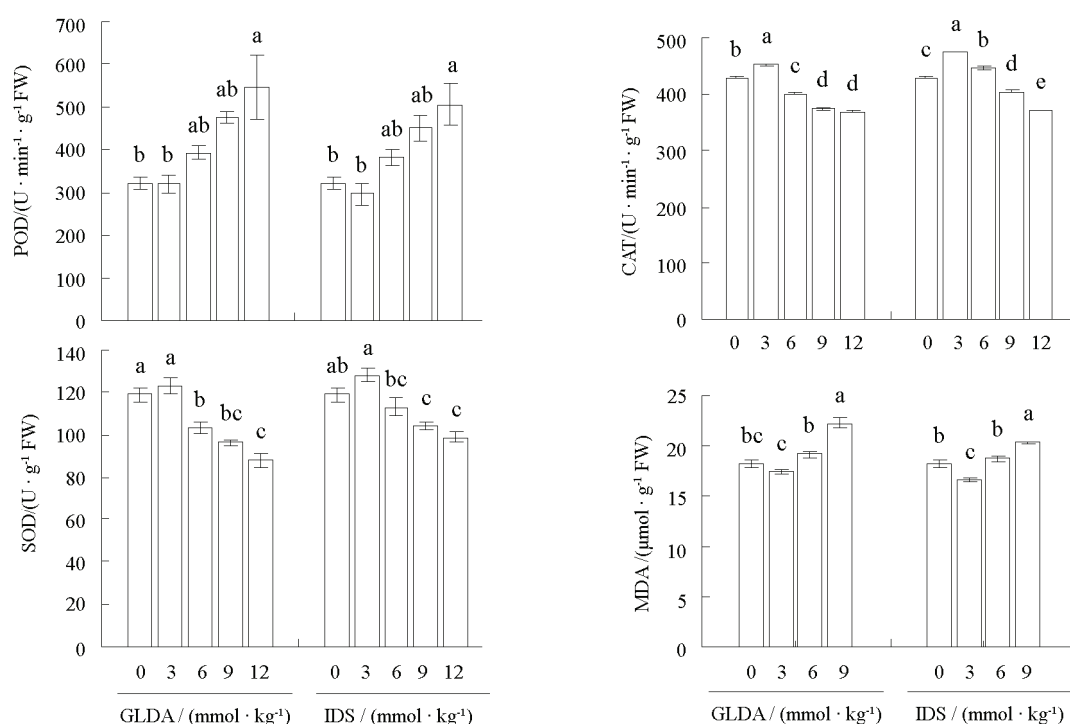


图 2 不同浓度螯合剂对高羊茅保护酶活性和丙二醛含量的影响

图中不同小写字母表示同一螯合剂不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Fig. 2 Effect of chelators with different concentrations on the activities of protective enzymes and MDA content of *Festuca arundinacea*

Different lowercase letters indicate statistically significant differences between different treatments with the same chelator at the 0.05 level.

### 3 讨论

本研究中发现, 螯合剂 GLDA 和 IDS 低浓度处理对高羊茅地上生物量影响不大或具有促进作用, 而高浓度显著抑制了地上生物量的增加。张灿灿等 (2013) 研究发现,  $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA 对高羊茅地上生长有明显促进作用, 认为与低浓度 EDTA 对土壤酶活性的明显激活作用有关。袁江等 (2016) 的研究也表明, 高浓度的 GLDA 不利于植物生长, 使植物产生中毒现象, 而低浓度的 GLDA 对植物的生物量有一定的促进作用。卫泽斌等 (2015) 在利用可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的试验中也得到了相同的结论。这些均与本试验的结果相一致。另外, 本研究中

还发现,各浓度的螯合剂均显著抑制了植物根系的生长。当植物遭受土壤污染物的逆境胁迫时,根系是最先直接受到逆境胁迫的器官,植物常常通过根系生长和代谢的相应调整以适应逆境胁迫(何俊瑜等,2011)。罗艳等(2014)认为,向镉污染土壤中施入螯合剂后,籽粒菟根系生长受到抑制是由于过高的镉胁迫导致细胞分裂减少,生长发育严重受阻。当螯合剂加入到土壤中,首先受到伤害的是植物根系,而对地上部的抑制会出现滞后现象,只有在高浓度的情况下才会明显地表现出来。

叶绿素含量的高低能反映光合作用水平的强弱,叶绿素含量的减少被认为是衡量叶片衰老的重要指标(白志英等,2009)。试验结果表明,低浓度的 GLDA 和 IDS 对叶绿素和类胡萝卜素含量没有显著影响,而高浓度却表现出明显的抑制作用,这与植物的地上生长结果相一致,说明高浓度的螯合剂对高羊茅幼苗的生长构成了逆境,使叶绿素的合成受阻,从而影响植物生长。有研究表明,逆境胁迫可破坏叶绿体和类囊体膜结构,降低叶绿素合成,抑制光合速率(谭伟等,2012)。张灿灿等(2013)的研究也发现,EDTA 对高羊茅的叶绿素含量具有低浓度促进、高浓度抑制的作用。

植物处于逆境胁迫下,活性氧与抗氧化系统之间的平衡被打破,活性氧含量随之上升,引起氧化胁迫和膜损伤(Srivastava et al., 2014),而 MDA 含量是反映膜质过氧化程度的重要指标。植物可以通过抗氧化酶系统(SOD、POD、CAT 等)有效清除体内的活性氧,使细胞免受损害(Elstner, 2003)。本研究结果表明,添加螯合剂后,POD 的活性增加,SOD 和 CAT 活性呈低浓度增加高浓度降低的趋势,MDA 含量在高浓度处理时显著增加,说明植物通过提高保护酶的活性来减轻活性氧带来的伤害,保护细胞膜的稳定性(彭燕等,2013)。杨明琰等(2014)研究发现,随着土壤铅含量的增加,SOD、POD、CAT 活性均表现出先升后降的趋势。有研究表明,POD 的作用具有双重性,一方面,可在逆境初期发挥作用,清除  $H_2O_2$ ; 另一方面,也可在逆境或衰老后期发挥作用,参与活性氧的生成、叶绿素的降解,并能引发膜脂过氧化作用(柯世省和杨敏文,2007)。高浓度的螯合剂显著增加了 MDA 的积累,使膜脂过氧化程度加重,与此同时,抗氧化酶 SOD、CAT 活性显著降低,表明对高羊茅幼苗构成了严重的逆境胁迫(王艳芳等,2015)。这一点也可从植物生物量指标得到体现,在 12 和 15  $mmol \cdot kg^{-1}$  浓度处理下,植物的生长受到严重的抑制。

综上所述,GLDA 和 IDS 施入土壤后,抑制了高羊茅的种子萌发,且随处理浓度的增加抑制作用更强;高浓度的螯合剂不利于植物生长和光合作用,MDA 含量显著增加,使氧化酶系统遭到破坏,导致 SOD 和 CAT 活性的降低。因此,在两种螯合剂应用于土壤重金属修复时,以低浓度( $6 mmol \cdot kg^{-1}$ )施加为宜,并且可以考虑在植物收获前几天施加或分次加入。

## References

- Bai Zhi-ying, Li Cun-dong, Sun Hong-chun, Wu Tong-yan. 2009. The effect and chromosomal control on chlorophyll content and corticoid content under drought stress in wheat. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 24 (1): 1 - 6. (in Chinese)
- 白志英, 李存东, 孙红春, 吴同燕. 2009. 干旱胁迫对小麦叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响及染色体调控. *华北农学报*, 24 (1): 1 - 6.
- Baker A J M. 2006. Enhanced phytoextraction of Pb and other metals from artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS. *Chemosphere*, 63 (10): 1773 - 1784.
- Begum Z A, Rahman I M M, Tate Y, Sawai H, Maki T, Hasegawa H. 2012. Remediation of toxic metal contaminated soil by washing with biodegradable aminopolycarboxylate chelants. *Chemosphere*, 87 (10): 1161 - 1170.
- Cai Mei-fang, Li Kai-ming, Xie Dan-ping, Wu Ren-ren. 2014. The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals. *Environmental Science & Technology*, 37 (120): 223 - 230. (in Chinese)
- 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 吴仁人. 2014. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究. *环境科学与技术*, 37 (120): 223 - 230.
- Elstner E F. 2003. Oxygen activation and oxygen toxicity. *Annual Review of Plant Physiology*, 33 (1): 73 - 96.

- Guo Xiao-fang, Wei Ze-bin, Wu Qi-tang. 2015. Degradation and residue of EDTA used for soil repair in heavy metal-contaminated soil. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31 (7): 272 - 278. (in Chinese)
- 郭晓方, 卫泽斌, 吴启堂. 2015. 乙二胺四乙酸在重金属污染土壤修复过程的降解及残留. 农业工程学报, 31 (7): 272 - 278.
- He Jun-yu, Ren Yan-fang, Wang Yang-yang, Li Zhao-jun. 2011. Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress. Acta Ecologica Sinica, 31 (2): 522 - 528. (in Chinese)
- 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 李兆君. 2011. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应. 生态学报, 31 (2): 522 - 528.
- Huang J W, Chen J J, William R B, Scott D C. 1997. Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction. Environmental Science and Technology, 31 (3): 800 - 805.
- Ke Shi-sheng, Yang Min-wen. 2007. Effects of water stress on antioxidant system and lipid peroxidation in leaves of *Rhododendron fortunei*. Acta Horticulturae Sinica, 34 (5): 1217 - 1222. (in Chinese)
- 柯世省, 杨敏文. 2007. 水分胁迫对云锦杜鹃抗氧化系统和脂类过氧化的影响. 园艺学报, 34 (5): 1217 - 1222.
- Kong Fan-xiang, Yin Da-qiang, Yan Guo-an. 2000. Environmental Biology. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 孔繁翔, 尹大强, 严国安. 2000. 环境生物学. 北京: 高等教育出版社.
- Li Yun-shi, Feng Chong-ling, Wu Xiao-fu, Shi Run. 2015. A review on the functions of microorganisms in the phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. Acta Ecologica Sinica, 35 (20): 6881 - 6890. (in Chinese)
- 李韵诗, 冯冲凌, 吴晓芙, 石润. 2015. 重金属污染土壤植物修复中的微生物功能研究进展. 生态学报, 35 (20): 6881 - 6890.
- Luo Yan, Zhang Shi-rong, Xu Xiao-xun, Jia Yong-xia. 2014. Effects of biodegradable chelants on the root morphology and physiological-biochemical characteristics of *Amaranthus hybridus* L. in cadmium contaminated soils. Acta Ecologica Sinica, 34 (20): 5774 - 5781. (in Chinese)
- 罗艳, 张世榕, 徐小逊, 贾永霞. 2014. 可降解螯合剂对镉胁迫下籽粒苋根系形态及生理生化特征的影响. 生态学报, 34 (20): 5774 - 5781.
- Omran R G. 1980. Peroxide levels and the activities of catalase, peroxidase, and indoleacetic acid oxidase during and after chilling cucumber seedlings. Plant Physiology, 65 (2): 407 - 408.
- Peng Yan, Huang Bing-ru, Xu Li-xin, Li Zhou. 2013. Heat stress effects on osmotic potential, membrane fatty acid composition and lipid peroxidation content of two Kentucky bluegrass cultivars differing in drought tolerance. Acta Horticulturae Sinica, 40 (5): 971 - 980. (in Chinese)
- 彭燕, 黄炳茹, 许立新, 李州. 2013. 高温胁迫对草地早熟禾渗透势、膜脂脂肪酸成分及膜脂过氧化产物的影响. 园艺学报, 40 (5): 971 - 980.
- Singh B, Sharma S, Singh B. 2010. Antioxidant enzymes in cabbage: Variability and inheritance of superoxide dismutase, peroxidase and catalase. Scientia Horticulturae, 124 (1): 9 - 13.
- Srivastava R K, Pandey P, Rajpoot R, Rani A, Dubey R S. 2014. Cadmium and lead interactive effects on oxidative stress and antioxidative responses in rice seedlings. Protoplasma, 251 (5): 1047 - 1065.
- Sundar D, Perianayaguy B, Reddy A R. 2004. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves. Plant Growth Regulation, 44 (2): 157 - 163.
- Tan Wei, Liang Ting, Zhai Heng. 2012. Effects of acetochlor on the photosynthetic and fluorescence characteristics and chloroplast structure of grape leaves. Chinese Journal of Applied Ecology, 23 (8): 2185 - 2190. (in Chinese)
- 谭伟, 梁婷, 翟衡. 2012. 乙草胺对葡萄叶片光合和叶绿素荧光特性及叶绿体结构的影响. 应用生态学报, 23 (8): 2185 - 2190.
- Wang Y F, Pan F B, Wang G S, Zhang G D, Wang Y L, Chen X S, Mao Z Q. 2014. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions. Scientia Horticulturae, 175 (1): 9 - 15.
- Wang Yan-fang, Pan Feng-bing, Fu Feng-yun, Xiang Li, Zhang Xian-fu, Chen Xue-sen, Shen Xiang, Mao Zhi-quan. 2015. Effects of chitin on growth, photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* seedlings under replant condition. Acta Horticulturae Sinica, 42 (1): 10 - 18. (in Chinese)
- 王艳芳, 潘凤兵, 付风云, 相立, 张先富, 陈学森, 沈向, 毛志泉. 2015. 甲壳素对连作平邑甜茶生长、光合及抗氧化酶的影响. 园艺学报, 42 (1): 10 - 18.



- Wei Ze-bin, Wu Qi-tang, Long Xin-xian, Chen Cheng, Chen Xiao-hong. 2014. Efficiency of biodegradable chelate GLDA and phosphorus activators on heavy metals phytoextraction with *Sedum alfredii* Hance. *Journal of Agro-Environment Science*, 33 (7): 1402 - 1404. (in Chinese)
- 卫泽斌, 吴启堂, 龙新宪, 陈 诚, 陈晓红. 2014. 可生物降解螯合剂 GLDA 和磷素活化剂促进东南景天提取土壤重金属的潜力. *农业环境科学学报*, 33 (7): 1402 - 1404.
- Wei Ze-bin, Chen Xiao-hong, Wu Qi-tang, Tan Meng. 2015. Enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils using *sedum alfredii* hance with biodegradable chelate GLDA. *Environmental Science*, 36 (5): 1864 - 1869. (in Chinese)
- 卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭 蒙. 2015. 可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究. *环境科学*, 36 (5): 1864 - 1869.
- Wen J, Stacey S P, McLaughlin M J, Kirby J K. 2009. Biodegradation of rhamnolipid, EDTA and citric acid in cadmium and zinc contaminated soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 41 (10): 2214 - 2221.
- Wu Q, Duan G, Cui Y, Sun J. 2014. Removal of heavy metal species from industrial sludge with the aid of biodegradable iminodisuccinic acid as the chelating ligand. *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (2): 1144 - 1150.
- Wu Q, Cui Y, Li Q, Sun J. 2015. Effective removal of heavy metals from industrial sludge with the aid of a biodegradable chelating ligand GLDA. *Journal of Hazardous Materials*, 283: 748 - 754.
- Xu Pei-xian. 2014. Studies on cadmium tolerance and detoxification in tall fescue and Kentucky bluegrass [Ph. D. Dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University. (in Chinese)
- 徐佩贤. 2014. 高羊茅和草地早熟禾对镉的耐受能力和解毒机制研究[博士论文]. 上海: 上海交通大学.
- Yan Xing-fu, Zhou Li-biao, Si Bin-bin, Sun Yi, Gao Yong-feng, Wang Rui-xia. 2016. Stress effects of simulated drought by polyethylene glycol on the germination of *Caragana korshinskii* Kom. seeds under different temperature conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 36 (7): 1989 - 1996. (in Chinese)
- 闫兴富, 周立彪, 思彬彬, 孙 毅, 高永峰, 王瑞霞. 2016. 不同温度下 PEG-6000 模拟干旱对柠条锦鸡儿种子萌发的胁迫效应. *生态学报*, 36 (7): 1989 - 1996.
- Yang Bing-fan, Hu Peng-jie, Li Zhu, Chen Li-ke, Wu Long-hua, Luo Yong-ming. 2013. Research on the wash condition using EDTA for a heavy metal severely contaminated agricultural soil, 45 (5): 928 - 932. (in Chinese)
- 杨冰凡, 胡鹏杰, 李 柱, 陈励科, 吴龙华, 骆永明. 2013. 重金属高污染农田土壤 EDTA 淋洗条件初探. *土壤*, 45 (5): 928 - 932.
- Yang Ming-yan, Liang Yu-yan, Zeng De-bang, Chen Tao, Chen Hua, Liu Tian-ran, Xing Jian-yu. 2014. Effects of lead stress on accumulation capacity and physiological metabolism of ryegrass. *Journal of Northwest A & F University (Nat Sci Ed)*, 42 (12): 97 - 101. (in Chinese)
- 杨明琰, 梁语燕, 曾德榜, 陈 涛, 陈 华, 柳天然, 邢建宇. 2014. 铅胁迫对黑麦草 Pb 富集特性及生理代谢的影响. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 42 (12): 97 - 101.
- Yuan Jiang, Li Ye, Xu Jian-chen, Yang Hong-gang. 2016. Enhanced phytoremediation of heavy metal polluted soil from contaminated soils using plant by biodegradable chelate GLDA in combination with plant hormones. *Journal of Wuhan University of Technology*, 38 (2): 82 - 86, 92. (in Chinese)
- 袁 江, 李 晔, 许剑臣, 杨红刚. 2016. 可生物降解螯合剂 GLDA 和植物激素共同诱导植物修复重金属污染土壤研究. *武汉理工大学学报*, 38 (2): 82 - 86, 92.
- Zhang Can-can, Duo Li-an, Zhao Shu-lan. 2013. Effect of EDTA on growth of *Festuca arundinacea*. and soil enzyme activities. *Chinese Journal of Grassland*, 35 (3): 116 - 120. (in Chinese)
- 张灿灿, 多立安, 赵树兰. 2013. EDTA 对高羊茅生长及其土壤中酶活性的影响. *中国草地学报*, 35 (3): 116 - 120.
- Zhang Xian-zheng. 1992. Research methods of crop physiology. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 张宪政. 1992. 作物生理研究法. 北京: 中国农业出版社.
- Zhou Jian-jun, Zhou Ju, Feng Ren-guo. 2014. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 29 (3): 315 - 320. (in Chinese)
- 周建军, 周 桔, 冯仁国. 2014. 我国土壤重金属污染现状及治理战略. *中国科学院院刊*, 29 (3): 315 - 320.