

EDTA对重金属胁迫下匍匐翦股颖种子萌发的影响

赵心笛,刘敏婷,刘容,李振华,张馨馨,路佳音,柴琦*

(兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室,兰州大学草地农业教育部工程研究中心,草地农业科技学院,甘肃 兰州 730020)

摘要:【目的】研究外源EDTA对重金属胁迫下匍匐翦股颖(*Agrostis stolonifera*)种子萌发的影响。【方法】以匍匐翦股颖品种潘威为试验材料,对不同浓度Cu、Cd、Pb胁迫下的匍匐翦股颖进行EDTA处理,并测定匍匐翦股颖种子发芽率、发芽势、发芽指数、幼苗叶片及根系相关指标。【结果】匍匐翦股颖对Pb的耐受能力最强,Cu次之,Cd最差。施加3 mmol/L EDTA对中、重度重金属胁迫下匍匐翦股颖的发芽指标、叶片指标和根系指标均较优,其中,中度Cu、轻度Cd、中度Pb胁迫下施用3 mmol/L EDTA的匍匐翦股颖种子的发芽率分别较对照增加了16.67%、3.36%、8.72%,叶片长度分别增加了30.99%、30.60%、1.63%,根系长度分别增加了35.93%、0.37%、29.80%。【结论】通过隶属函数法对各处理进行综合排序,发现施用3 mmol/L EDTA匍匐翦股颖对重金属胁迫的缓解效果最优,对3种重金属的缓解效果排序为Pb>Cu>Cd。

关键词: EDTA; 重金属胁迫; 匍匐翦股颖; 种子萌发

中图分类号: S688.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)02-0067-12

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2024.02.007



在草坪草生长过程中,土壤会供给草坪草生命活动所需的水分、养分和氧气,还对草坪草起到机械支撑和固定的作用^[1-3],土壤是草坪草生长发育的基础。然而,随着全球工业化、城市化飞速发展,近年来土壤中的重金属含量不断上升,重金属在土壤中的不断积累与富集也对环境造成严重危害^[4],其中,Cu、Cd、Pb是重金属污染土壤的主要成分。Cu是植物生长的必需微量元素之一,当土壤中的Cu含量超过植物生长所需时会导致植物根系生理作用紊乱,进而对植物产生毒害作用,甚至导致植物死亡^[5];Cd是毒性很强的一

种重金属,在植物体内积累容易导致植物叶片坏死,降低根系对水分和养分的吸收,限制根系生长,造成植物生长障碍而减少产量^[6];土壤中的Pb被植物吸收会导致植物的叶绿素含量下降,阻碍植物的呼吸及光合作用,从而阻碍植物生长发育,严重会引起植物死亡^[7]。因此,土壤重金属污染成为当前亟待解决的环境问题。在诸多治理土壤重金属污染的途径中,植物修复技术由于价廉、绿色、清洁、环保的特点^[8],被广泛应用。植物修复就是用绿色植物清除污染物^[9],植物对重金属污染土壤的修复速率取决于植物对重金属的萃取能力和植物自身的生物量,因此利用植物修复技术的关键是在保障植物正常生长的同时,提高植物对重金属的吸收和转移能力^[10-11]。外源添加螯合剂是当前如何保障植物在重金属污染土壤上正常生长发育的热门研究之一^[12]。

乙二胺四乙酸(Ethylene Diamine Tetraacetic Acid, EDTA)是一种常见的氨基螯合剂,可以与大部分金属离子形成稳定的水溶性络合物,同时EDTA在

收稿日期: 2023-04-09; **修回日期:** 2023-11-29

基金项目: 四川省甘孜州横向项目—CZ铁路生态脆弱地带高寒草甸恢复技术研究项目(CSCEC-2021-S-2)

作者简介: 赵心笛(1999-),女,河北邯郸人,硕士研究生。

E-mail: zhaoxd21@lzu.edu.cn

*通信作者。E-mail: chaiqi@lzu.edu.cn

自然环境中的生物降解性极低^[13],能够显著提高土壤中重金属的植物可利用性,促进植物对重金属的吸收和富集,但浓度过高时会导致植物吸收过度造成毒害植物的风险^[14]。

匍匐剪股颖(*Agrostis stolonifera*)是多年生直立冷季型草坪草,常用于高尔夫球场果岭、草地网球场、草地保龄球场等精细草坪建植,也可用于庭院、公园等养护水平较高的绿地^[15]。研究表明,匍匐剪股颖的适应性较强且抗逆性较好,可以耐受一定程度的重金属胁迫^[16]。

目前,应用在修复重金属污染土壤上的草坪草种类大多是假俭草(*Eremochloa ophiuroides*)、海滨雀稗(*Paspalum vaginatum*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)等^[17],而匍匐剪股颖应用较少。虽然近年来国内外关于EDTA对重金属胁迫下植物的研究不断发展前进,但是重金属胁迫下匍匐剪股颖种子萌发受EDTA影响的研究较少。因此,本研究对不同浓度CuSO₄、CdCl₂、Pb(NO)₃处理下的匍匐剪股颖进行EDTA处理,分析外源EDTA对Cu、Pb、Cd胁迫下匍匐剪股颖种子萌发和幼苗生长的影响,为螯合剂缓解土壤重金属污染方面的研究提供科学参考和理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

参试草种为匍匐剪股颖品种潘威,由北京克劳沃公司提供;分析纯Pb(NO)₃由天津市鼎盛鑫化工有限公司生产;分析纯CuSO₄·5H₂O由国药集团化学试剂有限公司生产;分析纯CdCl₂由上海中秦化学试剂有限公司生产;分析纯EDTA由生工生物工程(上海)有限公司生产。

1.2 试验方案

设置EDTA溶液浓度分别为1、3、5 mmol/L^[10],依次记为E1(低浓度)、E3(中浓度)、E5(高浓度)。

设置CuSO₄溶液浓度分别为12.5、25.0、50.0 mmol/L^[18],依次记为Cu12.5(轻度)、Cu25(中度)、Cu50(重度);

设置CdCl₂溶液浓度分别为18、36、54 mmol/L^[19],依次记为Cd18(轻度)、Cd36(中度)、Cd54(重度);

设置Pb(NO)₃溶液浓度分别为100、200、300 mmol/L^[20],依次记为Pb100(轻度)、Pb200(中度)、

Pb300(重度)。

采用培养皿纸上发芽法,根据《牧草种子检验规程—发芽试验》(GB/T 2930.4—2001)进行发芽试验。

将匍匐剪股颖种子用0.1%的HgCl₂溶液消毒10 min后用蒸馏水冲洗。分别将不同浓度CuSO₄、CdCl₂、Pb(NO)₃与不同浓度EDTA混合的处理液5 mL加入铺设两层滤纸、直径90 mm的培养皿中。无重金属胁迫处理以0 mmol/L EDTA溶液和0 mmol/L金属溶液配合处理作对照,金属溶液和EDTA配合处理时分别以0 mmol/L EDTA+12.5 mmol/L CuSO₄处理(0+Cu12.5)、0 mmol/L EDTA+25 mmol/L CuSO₄处理(0+Cu25)、0 mmol/L EDTA+50 mmol/L CuSO₄处理(0+Cu50)、0 mmol/L EDTA+18 mmol/L CdCl₂处理(0+Cd18)、0 mmol/L EDTA+36 mmol/L CdCl₂处理(0+Cd36)、0 mmol/L EDTA+54 mmol/L CdCl₂处理(0+Cd54)、0 mmol/L EDTA+100 mmol/L Pb(NO)₃处理(0+Pb100)、0 mmol/L EDTA+200 mmol/L Pb(NO)₃处理(0+Pb200)、0 mmol/L EDTA+300 mmol/L Pb(NO)₃处理(0+Pb300)作对照。然后将消毒后的种子放置在培养皿中,每皿放置50粒颗粒饱满的种子。各处理重复4次。以称重法每天补充散失水分^[21]。每日将培养皿按一定的空间顺序交换位置,保证各培养皿生长条件一致。将培养皿放入昼/夜温度为24℃/18℃,每天光周期12 h,相对湿度为75%的培养箱内培养^[22]。

1.3 指标测定

1.3.1 萌发指标测定 发芽后每隔24 h统计1次出苗数,7 d后统计种子发芽势,28 d后统计种子发芽率,发芽率、发芽指数和活力指数的计算公式如下^[23]:

发芽率(GR)=每次统计发芽种子数/供试种子数×100%

发芽势(GP)=规定天数内发芽种子数/供试种子数×100%

发芽指数(GI)= $\sum(Gt/Dt)$

活力指数(VI)= $S \times \sum(Gt/Dt)$

式中:Gt为不同时间发芽数,Dt为相应发芽天数,S为幼苗长度。

1.3.2 叶片和根系指标测定 发芽28 d后,每个处理选取10株具有代表性的幼苗,分离植株的叶片和根系,分别用电子分析天平称重并记录,再用0.075 mg/mL亚甲基蓝溶液浸泡根系10 min,然后用

Delta-TSCAN 根系分析系统扫描叶片和根系,测定叶片总面积、叶片长度、叶片宽度、根系长度、根系直径、根系表面积。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据统计与制图,采用 IBM SPSS Statistics 25.0 统计软件进行最小显著差异法(LSD)分析。

采用模糊数学隶属函数法^[24]计算重金属胁迫下外源 EDTA 对匍匐剪股颖种子萌发和幼苗生长的影响,其公式如下所示:

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: X_i 为某指标测定的值, $X_{\max}$ 为该指标的最大值, $X_{\min}$ 为该指标的最小值。如果某一指标与匍匐剪股颖的重金属耐受能力之间是正相关的关系,采用公式(1)进行计算,若该指标与匍匐剪股颖的重金属耐受能力之间是负相关的关系,则采用公式(2)计算隶属函数值。计算不同处理的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、叶片长度、叶片宽度、叶片表面积、根系长度、根系直径和根系总表面积的隶属函数值,然后计算这些指标的隶属函数值的平均值并进行排序。

2 结果与分析

2.1 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子发芽率的影响

Cu、Cd、Pb 胁迫均降低了匍匐剪股颖种子的发芽率,且其发芽率分别随 CuSO_4 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 CdCl_2 溶液浓

度升高而降低,其中轻度 Pb 胁迫对匍匐剪股颖发芽率的消极影响最小,而重度 Cd 胁迫下匍匐剪股颖发芽率最低,仅有 28.5%,较对照(85.50%)显著降低 66.67% ($P < 0.05$)。在无重金属胁迫下,添加 EDTA 会降低匍匐剪股颖种子的发芽率,且随 EDTA 浓度升高而呈现先升高后降低的趋势,其中, E3+0 处理的匍匐剪股颖发芽率最高,而 E1+0 处理(64.00%)最低,较对照降低了 25.15%(表 1)。

EDTA 添加可以在一定程度上减轻重金属对匍匐剪股颖种子的毒害作用: Cu 胁迫下, 1、3、5 mmol/L EDTA 均对中、重度胁迫有缓解作用,其中 1 mmol/L EDTA 对中度 Cu 胁迫的缓解效果最佳,发芽率为 78.00%,较 0+Cu25 处理(66.00%)提高了 18.18%; Cd 胁迫下, 1、3 mmol/L EDTA 对各浓度 Cd 胁迫处理的匍匐剪股颖发芽率均有提高作用, 5 mmol/L EDTA 对中、重度 Cd 胁迫的匍匐剪股颖发芽率有缓解作用,其中 E1+Cd18 处理(78.00%)的发芽率最高,较轻度 Cd 胁迫处理(74.50%)提高了 4.70%; Pb 胁迫下, EDTA 会使中、重度 Pb 胁迫处理的匍匐剪股颖发芽率升高,其中 3 mmol/L EDTA 缓解中度 Pb 胁迫所造成的发芽抑制的效果最佳,其发芽率为 81.00%,较 0+Pb200 处理(74.50%)上升了 8.72%(表 1)。

2.2 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子发芽势的影响

轻度重金属胁迫下匍匐剪股颖的发芽势较对照升高,其中轻度 Pb 处理(30.00%)的发芽势最大,显著升高了 53.85% ($P < 0.05$); 中度、重度重金属胁迫则

表 1 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖发芽率的影响

Table 1 Effects of exogenous EDTA on germination rate of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	发芽率/%				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	85.50	64.00	77.50	76.00	9.68
Cu12.5	74.50	68.00	71.00	72.50	11.66
Cu25	66.00	78.00	77.00	68.00	14.17
Cu50	30.00	54.00	67.50	57.50	10.35
Cd18	74.50	78.00	77.00	69.50	7.85
Cd36	51.50	66.00	70.00	68.50	18.53
Cd54	28.50	52.00	61.50	59.00	12.22
Pb100	83.00	77.00	68.50	72.00	8.09
Pb200	74.50	76.00	81.00	77.00	11.38
Pb300	54.50	74.00	76.50	57.50	11.49
LSD(5%)	9.67	8.07	6.28	9.41	

注: LSD(5%)指显著性水平为 0.05。在 0.05 显著性水平下,如果同行/列中两组数据差值大于此行/列的 LSD 值,表示差异显著,否则“不显著”,下同。

对匍匐剪股颖种子的发芽势有抑制作用,且抑制作用随浓度升高而增强。无重金属胁迫下,EDTA对匍匐剪股颖种子发芽势的影响与浓度有关,1 mmol/L EDTA会降低匍匐剪股颖种子的发芽势,但与对照差异不显著($P>0.05$);3、5 mmol/L EDTA则使发芽势升高,其中3 mmol/L EDTA的效果最好,其发芽势为29.50%,较对照显著增加了51.28%($P<0.05$)(表2)。

EDTA对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子发芽势的缓解作用与重金属种类和浓度有关:施加EDTA可以提高除E1+Cu50处理外的Cu胁迫下匍匐剪股颖种子的发芽势,其中3 mmol/L EDTA对中度Cu胁迫处理下的匍匐剪股颖种子发芽势最高,达到42.00%,较中度Cu胁迫处理(18.00%)和CK(19.50%)分别

提高了133.33%和115.38%;EDTA对Cd胁迫处理的匍匐剪股颖种子发芽势有促进作用,其中E3+Cd18处理(38.50%)的发芽势最大,比轻度Cd胁迫处理(21.50%)增加了79.07%,比CK上升了97.44%;施加EDTA对中、重度Pb胁迫下的匍匐剪股颖种子的发芽势有促进作用,而减小了100 mmol/L Pb(NO₃)₂溶液处理下的种子发芽势,其中最优处理(E3+Pb200处理)的发芽势为36.00%,较中度Pb胁迫(13.50%)、CK分别升高了166.67%、84.62%,效果最差的处理(E5+Pb100处理,发芽势为15.00%)则比轻度Pb胁迫(30.00%)显著下降了50.00%($P<0.05$)(表2)。

表2 外源EDTA对重金属胁迫下匍匐剪股颖发芽势的影响

Table 2 Effects of exogenous EDTA on germination potential of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	发芽势/%				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	19.50	15.00	29.50	24.50	10.00
Cu12.5	23.50	24.50	27.00	26.50	11.85
Cu25	18.00	23.00	42.00	23.00	11.17
Cu50	6.00	3.50	18.50	19.00	6.69
Cd18	21.50	30.50	38.50	31.00	13.33
Cd36	13.00	30.00	30.50	32.50	19.72
Cd54	7.50	13.50	20.00	14.00	9.50
Pb100	30.00	18.50	20.00	15.00	6.59
Pb200	13.50	31.50	36.00	25.50	7.82
Pb300	10.50	22.00	31.00	16.00	7.09

2.3 外源EDTA对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子发芽指数的影响

单一重金属胁迫处理中,轻度Pb胁迫可以提高匍匐剪股颖的发芽指数,但差异不显著($P>0.05$);而Cu、Cd胁迫和中、重度Pb胁迫均对匍匐剪股颖发芽指数存在抑制作用,且发芽指数随金属溶液浓度升高而降低。无重金属胁迫下,施用EDTA也会降低匍匐剪股颖的发芽指数,其中3 mmol/L EDTA对匍匐剪股颖发芽指数的影响最小(10.33),而1 mmol/L EDTA时发芽指数最低(8.00)(表3)。

而EDTA可以在一定程度上增大Cu、Cd、Pb处理下匍匐剪股颖的发芽指数,其中,1 mmol/L EDTA对中度Cu、Pb胁迫(6.87、8.57)效果最佳,发芽指数分别为7.02、9.20,分别上升了2.18%、7.35%;18 mmol/L CdCl₂胁迫下施加3 mmol/L EDTA的处理的匍匐剪股颖种子发芽指数相对最大,为7.09;5 mmol/

L EDTA对重度重金属胁迫下匍匐剪股颖的发芽指数有一定提升作用,但数值低于1、3 mmol/L EDTA。

2.4 外源EDTA对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子活力指数的影响

重金属胁迫下匍匐剪股颖种子的活力指数均随金属溶液浓度升高而显著降低($P<0.05$),其中,轻度Pb胁迫处理(449.12)活力指数最高,较对照(390.41)显著升高了15.04%($P<0.05$),其他单一重金属胁迫处理匍匐剪股颖种子的活力指数均显著低于对照($P<0.05$)。无重金属胁迫下,用EDTA处理匍匐剪股颖种子则会抑制种子活力指数,且活力指数随EDTA浓度升高呈现先降低后升高再降低的趋势,其中E3+0处理(319.79)的活力指数相对较高。

施加EDTA对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子的活力指数有一定程度的恢复作用:1 mmol/L EDTA对中度Pb胁迫(252.12)效果最佳,其活力指数为

表 3 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖发芽指数的影响

Table 3 Effects of exogenous EDTA on germination index of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	发芽指数				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	11.80	8.00	10.33	9.15	2.78
Cu12.5	8.72	6.57	6.41	6.53	1.12
Cu25	6.87	7.02	6.68	6.34	1.44
Cu50	2.65	5.37	6.08	5.17	1.06
Cd18	8.01	6.97	7.09	6.26	0.96
Cd36	5.14	5.83	5.92	5.90	1.87
Cd54	2.52	4.45	5.08	5.17	1.30
Pb100	13.09	9.16	6.84	6.90	2.46
Pb200	8.57	9.20	7.38	7.54	1.62
Pb300	5.07	7.03	7.27	5.32	1.12

252.64,较单独施加 200 mmol/L Pb(NO)₃溶液升高了 0.21%;添加 3 mmol/L EDTA 则使 25 mmol/L CuSO₄、18 mmol/L CdCl₂处理的匍匐剪股颖种子活力指数达到最高(190.52、207.81),较中度 Cu、轻度

Cd 处理(149.65、179.57)分别显著上升了 27.31%、15.73%($P<0.05$);5 mmol/L EDTA 能提高重度 Cu、Pb 胁迫以及中、重度 Cd 胁迫下匍匐剪股颖的活力指数。

表 4 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖活力指数的影响

Table 4 Effects of exogenous EDTA on the vigor index of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	390.41	210.37	319.79	210.68	79.64
Cu12.5	202.57	167.84	166.74	135.69	33.89
Cu25	149.65	170.12	190.52	138.91	32.72
Cu50	38.40	105.75	124.82	89.03	21.77
Cd18	179.57	185.51	207.81	127.75	26.60
Cd36	87.78	122.86	166.39	127.33	45.08
Cd54	25.00	51.43	122.86	101.69	19.63
Pb100	449.12	261.05	177.50	151.91	80.16
Pb200	252.12	252.64	221.08	192.13	49.84
Pb300	98.96	150.51	173.84	108.36	29.54

2.5 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖叶片长度的影响

单一 Cu、Cd、Pb 胁迫处理下,匍匐剪股颖的叶片长度随浓度升高而减短,除轻度 Pb 胁迫较对照不显著增加外($P>0.05$),其余处理的叶片长度均显著低于对照($P<0.05$)。EDTA 处理的匍匐剪股颖叶片长度在无重金属胁迫条件下随浓度升高而先升后降,其中 3 mmol/L EDTA 处理的匍匐剪股颖叶片最长,为 30.96 mm,5 mmol/L EDTA 处理的匍匐剪股颖叶片最短,为 23.08 mm(表 5)。

EDTA 在一定程度上可以缓解重金属胁迫对匍匐剪股颖叶片长度的抑制作用,叶片长度随 EDTA 浓度升高呈现先增加后降低的趋势:1 mmol/L EDTA 可以增加 Cu、Cd 和重度 Pb 胁迫下匍匐剪股颖的叶片长度;3 mmol/L EDTA 对中度 Cu 胁迫、轻度 Cd 胁迫、中

度 Pb 胁迫下匍匐剪股颖的叶片伸长效果最好,叶片长度分别为 28.53、29.32、29.93 mm,分别增加了 30.99%、30.60%、1.63%;EDTA 浓度为 5 mmol/L 时可以促进中度和重度 Cu、Cd 以及重度 Pb 胁迫处理的叶片伸长(表 5)。

2.6 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖叶片宽度的影响

单一重金属胁迫下,随着金属溶液浓度升高,匍匐剪股颖的叶片宽度减小,其中仅轻度 Pb 胁迫处理(0.59 mm)的叶片宽度较对照(0.56 mm)增加了 5.36%,其余处理的叶片宽度均小于对照。仅施加 EDTA 的匍匐剪股颖叶片宽度随 EDTA 浓度升高而先增后减,其中 3 mmol/L EDTA 处理的匍匐剪股颖叶片最宽,达 0.58 mm,较对照增加了 3.57%,差异不显著($P<0.05$)(表 6)。

表 5 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖叶片长度的影响

Table 5 Effects of exogenous EDTA on leaf length of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	叶片长度/mm				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	33.08	26.31	30.96	23.08	1.93
Cu12.5	23.25	25.55	25.97	20.78	2.93
Cu25	21.78	24.42	28.53	21.87	3.00
Cu50	14.61	19.72	20.54	17.24	2.92
Cd18	22.45	26.57	29.32	20.41	1.77
Cd36	16.92	21.03	28.13	21.56	2.03
Cd54	9.76	11.53	24.22	19.73	2.42
Pb100	34.32	28.51	25.90	22.02	1.82
Pb200	29.45	27.47	29.93	25.66	4.40
Pb300	19.50	21.39	23.99	20.42	3.95

在不同浓度 CuSO₄、CdCl₂、Pb(NO)₃ 溶液中添加不同浓度的 EDTA,对匍匐剪股颖的叶片宽度存在不同影响:Cu 胁迫下,1、3 mmol/L EDTA 可以缓解中、重度 Cu 胁迫对匍匐剪股颖叶片宽度的抑制作用,其中,EDTA 浓度为 3 mmol/L 时,中度 Cu 胁迫下的匍匐剪股颖叶片宽度达到最大值(0.57 mm),显著上升了 39.02%($P<0.05$);而 5 mmol/L EDTA 会使 Cu 胁迫下匍匐剪股颖叶片宽度减小。Cd 胁迫下,1 mmol/L EDTA 仅能缓解重度 Cd 胁迫对匍匐剪股颖叶片宽度的抑制作用,但效果不显著;3 mmol/L

EDTA 仅对轻度 Cd 处理有缓解作用,其叶片宽度达到最大值(0.58 mm),较对照增加了 7.41%;5 mmol/L EDTA 则会降低各程度 Cd 胁迫的叶片宽度。Pb 胁迫下,1 mmol/L EDTA 仅对重度 Pb 胁迫下的匍匐剪股颖叶片宽度有缓解效果,但不显著;3 mmol/L EDTA 对中度 Pb 处理的叶片宽度缓解作用最好,叶片宽度为 0.59 mm,较 0+Pb200 处理(0.50 mm)升高了 18.00%;5 mmol/L EDTA 则对 Pb 胁迫处理下匍匐剪股颖叶片宽度有显著抑制作用($P<0.05$)。

表 6 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖叶片宽度的影响

Table 6 Effect of exogenous EDTA on leaf width of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	叶片宽度/mm				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	0.56	0.40	0.58	0.21	0.11
Cu12.5	0.49	0.44	0.30	0.19	0.10
Cu25	0.41	0.47	0.57	0.18	0.11
Cu50	0.21	0.31	0.40	0.16	0.13
Cd18	0.54	0.52	0.58	0.24	0.12
Cd36	0.50	0.47	0.36	0.43	0.10
Cd54	0.40	0.41	0.32	0.35	0.12
Pb100	0.59	0.50	0.41	0.46	0.08
Pb200	0.50	0.45	0.59	0.31	0.10
Pb300	0.46	0.53	0.32	0.22	0.11

2.7 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖叶片表面积的影响

单一 Cu、Cd、Pb 胁迫处理的匍匐剪股颖的叶片表面积均显著低于对照($P<0.05$),且随金属溶液浓度升高而呈现下降趋势。无重金属胁迫下,EDTA 处理的匍匐剪股颖的叶片表面积则随 EDTA 浓度升高而先增加后减小,其中 3 mmol/L EDTA 叶片表面积最大,为 23.63 mm²(表 7)。

EDTA 可以在一定程度上缓解重金属处理对匍匐剪股颖的毒害作用,Cu 胁迫下,1、3 mmol/L EDTA 均可增加匍匐剪股颖叶片表面积,而 5 mmol/L EDTA 只能使中度 Cu 胁迫下的匍匐剪股颖叶片表面积增大,其中 E3+Cu25 处理(26.36 mm²)效果最好,较中度 Cu 处理(14.46 mm²)显著增加了 82.30%($P<0.05$);Cd 胁迫下,EDTA 对不同程度 Cd 胁迫下匍匐剪股颖的叶片表面积均有促进作用,其中对 18 mmol/L CdCl₂

添加 3 mmol/L EDTA 的处理的叶片表面积最大,为 27.80 mm²,较轻度 Cd 胁迫处理(10.07 mm²)显著增加了 176.07% ($P<0.05$); Pb 胁迫下, EDTA 可以促进中度和重度 Pb 处理的匍匐剪股颖叶片表面积增加,

其中 3 mmol/L EDTA 对 200 mmol/L Pb(NO)₃ 溶液处理下的匍匐剪股颖叶片表面积效果最佳,为 27.73 mm²,较中度 Pb 胁迫处理(19.07 mm²)增加了 45.41%,差异显著($P<0.05$)(表 7)。

表 7 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖叶片表面积的影响

Table 7 Effect of exogenous EDTA on leaf surface area of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	叶表面积/mm ²				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	38.39	17.78	23.63	17.77	7.50
Cu12.5	18.65	21.40	25.45	14.08	2.82
Cu25	14.46	19.31	26.36	18.41	2.68
Cu50	11.65	12.63	16.54	10.45	4.07
Cd18	10.07	25.38	27.80	22.87	2.44
Cd36	8.51	15.37	17.45	21.14	2.52
Cd54	6.28	10.39	16.88	17.50	2.02
Pb100	21.76	21.46	20.07	16.13	2.65
Pb200	19.07	20.07	27.73	21.94	2.38
Pb300	18.02	16.47	15.41	21.14	4.26

2.8 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖根系长度的影响

随金属处理液浓度的增加,匍匐剪股颖的根系长度显著减小($P<0.05$),且均显著低于对照($P<0.05$),其中轻度 Pb 胁迫处理的匍匐剪股颖根系长度显著大于对照($P<0.05$),而 50 mmol/L CuSO₄ 和 54 mmol/L CdCl₂ 处理的匍匐剪股颖均未长出根系,表明轻度 Pb 胁迫可以促进匍匐剪股颖根系伸长,而中、重度重金属胁迫会显著抑制根系长度($P<0.05$)。无重金属胁迫下, EDTA 处理的匍匐剪股颖根系长度则随 EDTA 浓度升高而呈先升高后降低趋势,低浓度和中浓度(3 mmol/L) EDTA 可以促进根系伸长,而高浓度 EDTA 对根系长度有抑制作用,其中,匍匐剪股颖根系长度在 EDTA 浓度为 3 mmol/L 时达到最大值(381.72 mm),较对照显著增大了 12.25%,差异显著

($P<0.05$)(表 8)。

施加 EDTA 可以一定程度缓解重金属胁迫对匍匐剪股颖的毒害作用,1 mmol/L EDTA 可以增加中度 Cu、Cd 胁迫处理的匍匐剪股颖的根系长度,使重度 Cu、Cd 胁迫处理的匍匐剪股颖长出根系;3 mmol/L EDTA 是缓解中度 Cu、Pb 胁迫及轻度 Cd 胁迫的最佳浓度, E3+Cu25、E3+Cd18、E3+Pb200 处理(288.16、319.18、226.19 mm)的匍匐剪股颖根系长度分别增加了 35.93%、0.37%、29.80%;5 mmol/L EDTA 则能增加中、重度 Cd 胁迫下匍匐剪股颖的根系长度(表 8)。

2.9 源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖根系直径的影响

单一重金属胁迫处理会抑制匍匐剪股颖的根系直径,且金属处理液浓度越高,抑制作用越强,与对照

表 8 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖根系长度的影响

Table 8 Effect of exogenous EDTA on root length of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	根系长度/mm				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	340.07	349.96	381.72	308.00	25.14
Cu12.5	285.51	268.73	258.87	179.66	21.75
Cu25	211.99	264.28	288.16	192.12	21.76
Cu50	0.00	0.00	209.07	0.00	14.73
Cd18	225.36	206.42	226.19	168.18	17.33
Cd36	179.42	181.31	172.47	216.50	13.82
Cd54	0.00	102.51	101.65	170.84	10.87
Pb100	361.98	199.84	210.91	156.21	27.78
Pb200	245.90	213.52	319.18	182.49	21.88
Pb300	194.03	161.92	233.57	0.00	19.35

的差异越显著($P<0.05$)。在无重金属胁迫条件下用 EDTA 处理匍匐剪股颖,根系直径随 EDTA 浓度升高而先上升后下降,其中 E3+0 处理(0.94 mm)的根系直径显著高于对照($P<0.05$),增加了 16.05%,而低浓度和高浓度 EDTA 均对匍匐剪股颖的根系直径存在抑制作用(表 9)。

添加 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖根系直径的影响如下:1 mmol/L EDTA 可以增大重度 Cd 胁迫处理和中、重度 Pb 胁迫处理的匍匐剪股颖的根系直

径,而对 Cu 胁迫、轻中度 Cd 胁迫以及轻度 Pb 胁迫的根系直径有抑制作用;EDTA 浓度为 3 mmol/L 时,中度 Cu、轻度 Cd 和中度 Pb 胁迫处理的根系直径达到最大值,分别为 0.77、0.76 和 0.82 mm,分别增大了 24.19%、0.00% 和 28.13%;5 mmol/L EDTA 会抑制 Cu 胁迫,轻、中度 Cd 胁迫以及轻、中度 Pb 胁迫下的匍匐剪股颖根系直径,会致使重度 Cu、Pb 胁迫下的匍匐剪股颖无法生根(表 9)。

表 9 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖根系直径的影响
Table 9 Effect of exogenous EDTA on root diameter of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	根系直径/mm				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	0.81	0.64	0.94	0.58	0.12
Cu12.5	0.73	0.61	0.60	0.42	0.13
Cu25	0.62	0.50	0.77	0.47	0.11
Cu50	0.00	0.00	0.41	0.00	0.04
Cd18	0.76	0.52	0.76	0.35	0.10
Cd36	0.57	0.42	0.62	0.51	0.13
Cd54	0.00	0.34	0.59	0.46	0.12
Pb100	0.79	0.70	0.43	0.51	0.09
Pb200	0.64	0.74	0.82	0.63	0.09
Pb300	0.46	0.51	0.56	0.00	0.10

2.10 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖根系总表面积的影响

单一重金属胁迫会使匍匐剪股颖根系总表面积减少,且根系总表面积随金属溶液浓度升高而减小。无重金属胁迫下,1、3 mmol/L EDTA 均可以增大匍匐剪股颖根系总表面积,且均显著高于对照($P<0.05$),其中 E3+0 处理的根系总表面积最大,为 346.47 mm²,较对照(246.13 mm²)增大了 40.77%;5 mmol/L EDTA 使匍匐剪股颖根系总表面积小于对照,但差异不显著($P>0.05$)(表 10)。

添加 EDTA 可以一定程度缓解重金属胁迫对匍匐剪股颖根系的毒害作用。EDTA 为 1 mmol/L 时,可以显著增加除重度 Cu 胁迫外的所有重金属胁迫处理的匍匐剪股颖根系总表面积($P<0.05$);EDTA 为 3 mmol/L 时,中度 Cu、轻度 Cd、中度 Pb 处理的匍匐剪股颖根系总表面积均达到最高值,分别为 236.25、240.05、294.42 mm²,分别上升了 28.07%、60.68%、120.56%,且差异均显著($P<0.05$);EDTA 为 5 mmol/L 时对中度 Cu、中、重度 Cd 及中度处理的匍匐剪股颖根系总表面积有增加作用(表 10)。

2.11 隶属函数综合评价

对匍匐剪股颖在重金属胁迫下施加 EDTA 的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、叶片长度、叶片宽度、叶片表面积、根系长度、根系直径和根系总表面积的结果用隶属函数法计算,得到不同处理的隶属函数平均值。表 11 结果表明,单一重金属胁迫下匍匐剪股颖的耐受能力强弱表现为:Pb>Cu>Cd;单一 EDTA 处理的匍匐剪股颖的综合评价由优到差依次为:E3+0>E5+0>E1+0;EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖的缓解效果最佳的三个处理分别是 E3+Cu25、E3+Cd18 和 E3+Pb200,说明 3 mmol/L EDTA 对中度 Cu、Pb 胁迫以及轻度 Cd 胁迫下匍匐剪股颖的促进作用最好,且效果从优到差依次表现为 E3+Pb200>E3+Cu25>E3+Cd18。

3 讨论

3.1 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子萌发和幼苗生长的影响

单一重金属处理,100 mmol/L Pb(NO₃)₃ 处理的匍匐剪股颖种子的发芽势、发芽指数、活力指数、叶片长

表 10 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖根系总表面积的影响

Table 10 Effects of exogenous EDTA on total root surface area of creeping bentgrass under heavy metal stress

处理	根系总表面积/mm ²				
	0	E1	E3	E5	LSD(5%)
0	246.13	326.42	346.47	232.01	33.39
Cu12.5	216.36	223.75	164.33	178.02	20.75
Cu25	184.47	206.91	236.25	199.27	25.48
Cu50	0.00	0.00	200.04	0.00	12.68
Cd18	149.40	224.59	240.05	148.29	14.14
Cd36	86.12	190.34	215.78	205.24	19.64
Cd54	0.00	120.84	136.14	172.53	16.51
Pb100	178.23	253.78	177.06	173.06	16.83
Pb200	133.49	281.47	294.42	193.32	25.62
Pb300	92.58	214.46	132.92	0.00	13.48

度、叶片宽度和根系长度较对照均有所增加, 12.5 mmol/L CuSO₄ 和 18 mmol/L CdCl₂ 处理相较于对照可以提高匍匐剪股颖种子的发芽势, 说明轻度重金属胁迫对种子萌发有一定促进作用, 这与刘骐华等^[25]研究结果一致; 中、高度重金属胁迫处理则会抑制种子萌发, 且随处理液浓度升高而抑制作用增强, 与鲜靖苹等^[26]的报道结果一致。

无重金属胁迫下, 施加 3 mmol/L EDTA 可使匍匐剪股颖发芽势升高、叶片宽度增加以及促进根系生长, 说明一定浓度的 EDTA 可以促进草坪草出苗整齐和幼苗根系的生长, 但会使匍匐剪股颖的发芽率、发芽指数、活力指数、叶片长度和叶片总表面积减小, 说明 EDTA 对种子萌发有一定的抑制作用; 但 1 mmol/L EDTA 会使发芽指标降低、根系直径减小以及抑制叶片生长, 5 mmol/L EDTA 则会抑制发芽率、发芽指数、活力指数以及叶片和根系相关指标, 且各项指标均低于施用 3 mmol/L EDTA 溶液的处理, 表明浓度过低或过高均会增强对匍匐剪股颖种子萌发的抑制作用, 这与张灿灿等^[27]的研究结果相似, 但由于植物种类不同, EDTA 的适用浓度范围存在差异。

EDTA 浓度为 1、3 mmol/L 时, 对中度和重度 Cu、Cd、Pb 胁迫处理均有缓解效果, 其中 3 mmol/L EDTA 的缓解效果最佳, 说明一定浓度范围内的 EDTA 可以缓解重金属胁迫对植物的伤害, 与 Metwally A 等^[28]的研究成果相一致。5 mmol/L EDTA 则使轻度重金属胁迫下匍匐剪股颖的发芽率、发芽指数、活力指数、叶片宽度、叶片长度、根系长度、根系直径和根系总表面积较单一轻度重金属胁迫降低, 并且进一步损伤了重

度重金属胁迫处理的匍匐剪股颖根系, 表明 EDTA 浓度过高会进一步抑制重金属胁迫下匍匐剪股颖种子萌发, 与 Huda A K M 等^[29]的结果相似, 原因可能是高浓度 EDTA 会导致生物膜结构破坏, 细胞代谢紊乱, 最终影响植株生长发育^[30]。

3.2 外源 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子萌发影响的综合评价

试验结果表明, 匍匐剪股颖随金属溶液浓度、金属种类、EDTA 浓度不同而表现不同, 即同一植物对不同金属的耐受能力有所不同, 不同浓度 EDTA 对同一种类金属的同一金属溶液浓度的效果不同, 同一浓度 EDTA 对同一金属溶液的不同浓度的效果各异, 同一浓度 EDTA 对不同金属的效果也有差异, 因此任何单一指标都不能准确有效地评价 EDTA 和重金属对匍匐剪股颖的影响。而隶属函数是模糊数学中的一种多指标体系评价方法, 它对各个指标的隶属函数值进行累加取平均值, 并进行处理间的比较, 避免了使用单一评价系统的片面性和不准确性, 评价的结果较为科学、可靠^[31], 因此, 本试验选取了 10 个指标, 利用隶属函数法得出综合评价值, 对匍匐剪股颖的金属耐受能力和 EDTA 缓解效果进行排序, 缓解效果表现为随着 EDTA 浓度的升高先增加后降低, 这可能是因为 EDTA 与金属离子形成金属螯合物可以减小重金属对匍匐剪股颖的损伤^[30, 32], 然而 EDTA 浓度过低无法螯合更多金属离子, 导致 EDTA 虽然降低了重金属对植物的毒害作用, 但仍有大量游离金属离子侵害植物; 而 EDTA 浓度过高虽然可以吸收大量金属离子, 但其积累的量超过了匍匐剪股颖本身的耐受能力, 反

表 11 EDTA 对重金属胁迫下匍匐剪股颖种子萌发和幼苗生长指标隶属函数值及综合评价

Table 11 Membership function values and comprehensive evaluation of seed germination and seedling growth indexes of creeping bentgrass under heavy metal stress by EDTA

处理/指标	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	活力指数	叶片长度/mm	叶片宽度/mm	叶片表面积/mm ²	根系长度/mm	根系直径/mm	根系总面积/mm ²	综合值	排序
CK	0.65	0.61	0.34	0.46	0.49	0.53	0.59	0.39	0.61	0.48	0.52	11
0+Cu12.5	0.54	0.62	0.47	0.53	0.36	0.57	0.56	0.59	0.41	0.57	0.52	5
0+Cu25	0.43	0.50	0.48	0.57	0.46	0.50	0.56	0.41	0.42	0.48	0.48	25
0+Cu50	0.60	0.50	0.55	0.50	0.47	0.41	0.53	0.00	0.00	0.00	0.36	36
0+Cd18	0.56	0.62	0.53	0.50	0.53	0.51	0.39	0.49	0.41	0.64	0.52	6
0+Cd36	0.53	0.50	0.44	0.47	0.54	0.42	0.37	0.46	0.49	0.48	0.47	28
0+Cd54	0.46	0.55	0.46	0.42	0.55	0.50	0.48	0.00	0.00	0.00	0.34	39
0+Pb100	0.50	0.50	0.51	0.57	0.67	0.53	0.40	0.46	0.56	0.53	0.52	4
0+Pb200	0.28	0.58	0.44	0.52	0.59	0.56	0.47	0.44	0.44	0.37	0.47	29
0+Pb300	0.47	0.42	0.49	0.31	0.50	0.39	0.53	0.54	0.50	0.42	0.46	33
E1+0	0.50	0.50	0.34	0.47	0.61	0.38	0.50	0.63	0.62	0.56	0.51	13
E3+0	0.58	0.54	0.40	0.42	0.54	0.57	0.42	0.63	0.55	0.53	0.52	6
E5+0	0.57	0.44	0.52	0.52	0.52	0.48	0.50	0.50	0.39	0.61	0.51	15
E1+Cu12.5	0.60	0.34	0.57	0.35	0.51	0.48	0.43	0.67	0.62	0.56	0.51	12
E3+Cu12.5	0.50	0.56	0.60	0.48	0.55	0.50	0.37	0.53	0.43	0.42	0.49	17
E5+Cu12.5	0.46	0.25	0.54	0.68	0.28	0.53	0.55	0.49	0.47	0.51	0.48	27
E1+Cu25	0.57	0.50	0.56	0.65	0.37	0.47	0.45	0.47	0.50	0.62	0.52	10
E3+Cu25	0.50	0.40	0.57	0.57	0.55	0.52	0.60	0.52	0.59	0.51	0.53	2
E5+Cu25	0.44	0.50	0.56	0.59	0.31	0.42	0.47	0.54	0.55	0.55	0.49	19
E1+Cu50	0.43	0.38	0.51	0.47	0.67	0.41	0.46	0.00	0.00	0.00	0.33	40
E3+Cu50	0.45	0.37	0.69	0.34	0.33	0.38	0.62	0.45	0.53	0.49	0.47	31
E5+Cu50	0.56	0.30	0.64	0.65	0.51	0.42	0.42	0.00	0.00	0.00	0.35	37
E1+Cd18	0.67	0.42	0.35	0.65	0.62	0.46	0.60	0.42	0.44	0.54	0.52	9
E3+Cd18	0.75	0.55	0.34	0.60	0.41	0.45	0.50	0.49	0.58	0.58	0.53	3
E5+Cd18	0.46	0.50	0.48	0.47	0.52	0.60	0.47	0.47	0.46	0.55	0.50	16
E1+Cd36	0.33	0.50	0.38	0.44	0.62	0.33	0.54	0.66	0.50	0.58	0.49	22
E3+Cd36	0.33	0.69	0.45	0.33	0.63	0.56	0.50	0.43	0.45	0.57	0.49	17
E5+Cd36	0.52	0.42	0.39	0.38	0.47	0.56	0.52	0.39	0.54	0.58	0.48	26
E1+Cd54	0.67	0.08	0.71	0.59	0.39	0.47	0.50	0.38	0.59	0.48	0.49	23
E3+Cd54	0.56	0.40	0.43	0.61	0.39	0.43	0.53	0.49	0.47	0.59	0.49	19
E5+Cd54	0.58	0.35	0.36	0.39	0.34	0.51	0.54	0.60	0.57	0.58	0.48	24
E1+Pb100	0.38	0.65	0.36	0.32	0.45	0.40	0.50	0.61	0.50	0.51	0.47	30
E3+Pb100	0.38	0.50	0.34	0.35	0.59	0.50	0.34	0.41	0.67	0.41	0.45	34
E5+Pb100	0.50	0.50	0.42	0.43	0.41	0.46	0.46	0.41	0.39	0.41	0.44	35
E1+Pb200	0.40	0.42	0.54	0.38	0.49	0.57	0.59	0.55	0.56	0.61	0.51	13
E3+Pb200	0.50	0.50	0.40	0.63	0.58	0.53	0.53	0.52	0.70	0.49	0.54	1
E5+Pb200	0.62	0.45	0.40	0.47	0.34	0.45	0.59	0.45	0.52	0.60	0.49	21
E1+Pb300	0.33	0.60	0.43	0.40	0.39	0.61	0.53	0.42	0.47	0.45	0.46	32
E3+Pb300	0.44	0.75	0.43	0.61	0.52	0.46	0.53	0.52	0.45	0.47	0.52	6
E5+Pb300	0.45	0.33	0.57	0.67	0.58	0.44	0.45	0.00	0.00	0.00	0.35	38

而对植物生长表现出明显的毒害作用^[33]。

4 结论

1) 轻度重金属胁迫对匍匐剪股颖种子萌发有促进作用,但随着金属溶液浓度升高,匍匐剪股颖种子萌发逐渐受到抑制,且抑制作用随金属溶液浓度升高而增强,综合评价匍匐剪股颖对 Cu、Cd、Pb 的耐受能

力,由强到弱依次为 Pb>Cu>Cd。

2) 无重金属胁迫时,施加 3 mmol/L EDTA 可以增加匍匐剪股颖的发芽势和叶片宽度,促进根系生长,但浓度过低或过高均会损害匍匐剪股颖上述指标。

3) 不胜数 EDTA 可以在一定程度上缓解重金属胁迫对匍匐剪股颖造成的伤害,缓解效果整体表现为

随着浓度的增加先升高后降低,其中以 3 mmol/L 的效果最好。另外对 3 种重金属的缓解效果由优到差依次为 Pb>Cu>Cd。

参考文献:

- [1] 毛志远,张从志. 住宅区草坪可以更加“平息近人”[J]. 现代物业(上旬刊),2011,10(1):86—87.
- [2] 张甘霖,吴华勇. 从问题到解决方案:土壤与可持续发展目标的实现[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):124—134.
- [3] 平原,马美景,郭忠录. 像呵护皮肤一样呵护土壤——论土壤的重要性及表土保护与利用[J]. 中国水土保持,2021(1):14—17.
- [4] 陈伟,张苗苗,宋阳阳,等. 镉胁迫对 4 种草坪草抗逆生理特性的影响[J]. 草原与草坪,2015,35(2):65—69.
- [5] 陈鸣晖,刘大林,张卫红,等. 铜污染土壤中不同多年生黑麦草品种富集效应的评价[J]. 草原与草坪,2017,37(6):78—83.
- [6] 路旭平,董文科,张然,等. 外源甜菜碱对镉胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草原与草坪,2019,39(6):1—10.
- [7] 向华,南丽丽,李春晓,等. 一氧化氮对铅胁迫下杂花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草原与草坪,2014,34(2):77—80+85.
- [8] 串丽敏,赵同科,郑怀国,等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术,2014,37(S2):213—222.
- [9] 徐一芄,黄益宗,张利田,等. 镉污染土壤修复技术的文献计量分析[J]. 环境工程学报,2020,14(10):2882—2894.
- [10] 潘新星,王明新,姚静波,等. EDTA 和 BR 对黑麦草铅积累与耐性的调控作用[J]. 环境科学学报,2017,37(4):1524—1530.
- [11] 章绍康,弓晓峰,易佳璐,等. 多种强化技术联合植物修复重金属污染土壤机制探讨[J]. 江苏农业科学,2019,47(14):1—6.
- [12] 史广宇,余志强,施维林. 植物修复土壤重金属污染中外源物质的影响机制和应用研究进展[J]. 生态环境学报,2021,30(3):655—666.
- [13] 刘欢. 外源低分子量有机酸对镉胁迫下美洲商陆的超累积和解 Cd 毒的机制研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [14] Israel L, Linda A M, Sarai R, *et al.* Remediation by means of EDTA of an agricultural calcareous soil polluted with Pb[J]. Environ Geochem Health, 2021(43):2231—2242.
- [15] 房媛媛,马晖玲. 2,3-丁二醇与水杨酸诱导匍匐剪股颖对镰刀菌枯萎病的抗性[J]. 草原与草坪,2015,35(3):83—87.
- [16] 王慧忠,张新全,何翠屏. Pb 对匍匐剪股颖根系超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(3):644—647.
- [17] 傅坤元,林忠平. 草坪草在土壤重金属污染治理中应用的研究进展[J]. 农业技术与装备,2018,345(9):15—16+18.
- [18] 张刚,翁悦,李德香,等. 铜胁迫对黑麦草种子萌发及幼苗生理生态的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版),2019,51(1):119—124.
- [19] 邓一飞,戴佳莺,吴雯君,等. 镉对匍匐剪股颖成熟胚愈伤组织诱导及再生的影响[J]. 上海大学学报(自然科学版),2013,19(6):636—640.
- [20] 纪童,王波,王占军,等. 草坪草叶绿素高光谱估测模型的建立及 Pb~(2+) 胁迫下的反演研究[J]. 草地学报,2020,28(3):675—683.
- [21] 牛奎举. 外源 5-氨基乙酰丙酸对干旱胁迫下草地早熟禾光合作用的调控机制[D]. 兰州:甘肃农业大学,2018.
- [22] 王慧慧. 钙盐对 NaCl 胁迫下匍匐剪股颖耐盐性影响[D]. 兰州:兰州大学,2021.
- [23] 闫蒙,韩肃磊,包金连,等. 盐碱胁迫对少花蒺藜草种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 草原与草坪,2022,42(4):9—16.
- [24] 高峰,顿振东,吕剑,等. 基于模糊数学隶属函数法综合评价黄瓜生物物质栽培基质[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(6):93—101.
- [25] 刘骥华,王慧慧,刘璐,等. 铜、镉、铅对高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草原与草坪,2019,39(4):10—18.
- [26] 鲜靖苹,王勇,马晖玲,等. 外源 NO 对镉胁迫下草地早熟禾幼苗根系生长及生理的影响[J]. 草原与草坪,2020,40(2):73—78.
- [27] 张灿灿,多立安,赵树兰. EDTA 对高羊茅生长及其土壤中酶活性的影响[J]. 中国草地学报. 2013,35(3):116—120.
- [28] Metwally A, Finkemeier I, Georgi M, *et al.* Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings[J]. Plant Physiology, 2003,132:272—281.
- [29] Huda A K M. Nazmul, Hossain Muktar, Mukta Rumana

- Haque, *et al.* EDTA—Enhanced Cr Detoxification and Its Potential Toxicity in Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant Stress, 2021:100014—E.
- [30] Małgorzata Wójcik, Anna Tukendorf. The Effect of EDTA on Maize Seedlings Response to Cd—Induced Stress[J]. Zeitschrift für Naturforschung C, 2015, 54(9—10):754—758.
- [31] 于伟,刘卫东,柳李旺,等. 隶属函数法对12个茄种幼苗期耐盐性的筛选与鉴定[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11):228—230.
- [32] Manik Sharma, Vinod Kumar, Sonia Mahey, *et al.* Antagonistic effects of EDTA against biochemical toxicity induced by Cr(VI) in *Hordeum vulgare* L. seedlings[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2020, 26: 2487—2502.
- [33] 吴仁杰,陈银萍,曹雯婕,等. 营养元素与螯合剂强化植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (5):328—337.

Effects of EDTA on seed germination of creeping bentgrass under heavy metal stress

ZHAO Xin-di, LIU Min-ting, LIU Rong, LI Zheng-hua, ZHANG Xin-xin,
LU Jia-yin, CHAI Qi*

(Key Laboratory of Grassland and Animal Husbandry Innovation of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of Lanzhou University, Engineering Research Center of Grassland Agriculture Ministry of Education of Lanzhou University/College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou 730020, China)

Abstract: 【Objective】 In order to study the effect of exogenous EDTA on seed germination of creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.) under heavy metal stress. 【Method】 The creeping bentgrass 'Pennway' variety was used as the test material, and the creeping bentgrass under different concentrations of Cu, Cd and Pb stress was treated with EDTA, and the seed germination rate, germination potential, germination index, seedling leaf and root related indexes of creeping bentgrass were determined. 【Result】 The results showed that creeping bentgrass had the strongest tolerance to Pb, followed by Cu and Cd. The application of 3 mmol/L EDTA had better germination index, leaf index and root index of creeping bentgrass under moderate and severe heavy metal stress. Among them, the germination rate of creeping bentgrass seeds treated with 3 mmol/L EDTA under moderate Cu, mild Cd and moderate Pb stress increased by 16.67%, 3.36% and 8.72%, respectively, compared with the controls. The leaf length increased by 30.99%, 30.60% and 1.63%, respectively, and the root length increased by 35.93%, 0.37% and 29.80%, respectively. 【Conclusion】 Through the comprehensive ranking of each treatment by the membership function method, it was found that the application of 3 mmol/L EDTA had the best mitigation effect on heavy metal stress, and the mitigation effect on the three heavy metals was ranked as Pb > Cu > Cd.

Key words: EDTA; heavy metal stress; creeping bentgrass; seed germination

(责任编辑 刘建荣)