

腐殖酸营养液对镉胁迫下树仔菜幼苗生理生化特性及重金属积累的影响

范琼, 酒元达, 叶海辉, 冯剑, 邹冬梅, 苏初连, 赵敏

(中国热带农业科学院分析测试中心·海南省热带果蔬产品质量安全重点实验室·
农业农村部亚热带果品蔬菜质量安全控制重点实验室 海口 571101)

摘要:为探讨镉(Cd)胁迫下腐殖酸营养液对树仔菜幼苗生理生化特性及重金属积累的影响,对不同Cd浓度(0、15、25、45 mg·kg⁻¹)胁迫下施用腐殖酸营养液(AF)和不施用腐殖酸营养液(CK)的树仔菜幼苗进行盆栽试验。结果表明,与CK相比,AF处理可有效提高树仔菜总生物量、叶面积和叶片数。在Cd浓度为45 mg·kg⁻¹时,AF处理促进了树仔菜叶片和根部对Cd的吸收以及叶片对Zn的富集,分别显著增加了134.7%、39.0%和36.9%,叶片和根部MDA含量分别显著增加了7.0%和19.6%。AF处理能有效提升抗氧化酶活性,在没有Cd胁迫时,AF处理的树仔菜根部和叶片POD活性、叶片SOD活性分别显著高于CK 187.6%、35.1%和20.6%,且随着Cd浓度增加,AF处理根部的CAT和SOD活性均呈升高趋势。综上,腐殖酸营养液促进了高Cd胁迫下树仔菜对Cd的吸收,但是树仔菜生长发育情况却没有受到影响,主要是由于抗氧化酶保护系统缓解了脂膜过氧化伤害,增强了树仔菜的耐Cd能力。

关键词:树仔菜;腐殖酸营养液;Cd胁迫;生理生化特性

中图分类号:S649

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2023)12-120-09

Effects of humic acid nutrient solution on physio-biochemistry characteristic and heavy metal accumulation of *Sauropus androgynus* seedlings under cadmium stress

FAN Qiong, JIU Yuanda, YE Haihui, FENG Jian, ZOU Dongmei, SU Chulian, ZHAO Min

(Analysis and Testing Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Hainan Provincial Key Laboratory of Quality and Safety for Tropical Fruits and Vegetables/Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruit and Vegetable, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Haikou 571101, Hainan, China)

Abstract: In order to investigate the effects of humic acid nutrient solution on physio-biochemistry and heavy metal content of *Sauropus androgynus* seedlings under cadmium(Cd) stress, pot experiments with humic acid nutrient solution(AF) treatment and without humic acid nutrient solution(CK) treatment were conducted under different soil Cd concentrations (0, 15, 25, and 45 mg·kg⁻¹). The results showed that the application of AF can effectively improve the total biomass, leaf area and leaf number of *Sauropus androgynus*. At Cd45 the AF application promoted the accumulation of Cd in leaves and roots and Zn in leaves of *S. androgynus*, which increased by 134.7%, 39.0% and 36.9%, respectively. MDA content in leaves and roots increased by 7.0% and 19.6%, respectively. The AF treatment can effectively increase the activity of antioxidant enzymes. Under no Cd, the POD enzyme activity in roots and leaves and SOD enzyme activity in leaves of *S. androgynus* treated with AF application were 187.6%, 35.1% and 20.6% higher than those treated with CK, respectively. And the CAT and SOD enzyme activity in roots increased with the concentration of Cd. Therefore, AF promoted the Cd accumulation of *S. androgynus* under high Cd stress, but the growth of *S. androgynus* were not affected, mainly because the protection system of antioxidant enzymes mitigated the damage of lipid membrane peroxidation and increased the Cd tolerance of *S. androgynus*.

Key words: *S. androgynus*; Humic acid nutrient solution; Cadmium stress; Physio-biochemistry characteristic

收稿日期:2023-03-31;修回日期:2023-10-23

基金项目:海南省自然科学基金(320QN301);海南省热带果蔬产品质量安全重点实验室开放课题(KFKT2021001)

作者简介:范琼,女,副研究员,主要从事农产品质量安全研究。E-mail:joanhee@126.com

通信作者:赵敏,女,副研究员,主要从事土壤改良和产地环境控制技术研究。E-mail:zmhb313@163.com

镉(Cd)是环境中常见的重金属元素之一,2014年4月国家环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国耕地土壤重金属总超标率为16.1%,其中重金属Cd点位超标率为7.0%^[1]。海南蔬菜产地土壤多为酸性,Cd离子活化性较高^[2],易被蔬菜吸收,Cd在蔬菜内累积后会干扰正常的细胞功能和代谢,诱导植株根和叶的生理生化变化,而且还可经生物富集作用,通过食物链威胁人体健康^[3]。因此,Cd是海南蔬菜安全生产中的重要风险控制指标。

目前,施用含腐殖酸类物质的有机物料被认为是降低重金属迁移率的有效办法^[4]。腐殖酸是一种高分子有机混合物,含有丰富的羧基、酚羟基、羰基和甲氧基等活性含氧官能团^[5],通过与Cd²⁺发生吸附、螯合和络合作用,影响Cd²⁺的迁移和生物有效性^[6]。在前期研究中,赵敏等^[7]通过施用碱性腐殖酸水溶肥有效提高土壤pH,降低土壤和树仔菜的Cd含量。但也有一些研究报道认为腐殖酸对土壤重金属有活化作用,柏宏成^[8]的研究表明,低浓度腐殖酸可以有效淋溶土壤Cd,活化土壤总Cd;邹传等^[9]研究表明,可溶性腐殖酸可以活化和解吸Cd,腐殖酸滤渣则能吸附Cd,因此,腐殖酸的种类和环境因素等都会影响对重金属活化或钝化的作用。

树仔菜(*Sauropus androgynus*)属大戟科守宫木属植物,又名守宫木、天绿香、泰国枸杞、五指山野菜等,是最具特色的海南野菜之一^[10]。笔者前期研究发现,树仔菜是一种易超量吸收Cd并将其向上迁移的蔬菜^[11]。但在Cd污染土壤中树仔菜的重金属积累的生理特性还有待进一步研究,腐殖酸类营养液在高Cd胁迫下对树仔菜的重金属积累和生理生化的影响还未见报道。

笔者通过Cd胁迫盆栽试验,研究腐殖酸类营养液对不同Cd浓度下树仔菜生长指标、叶绿素含量、生理生化活性的影响以及重金属含量的变化规律,为明晰腐殖酸类营养液对树仔菜在高Cd胁迫下积累和生理生化影响的作用机制,寻找适合树仔菜种植在Cd污染土壤中的农艺强化方法提供基础数据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试土壤:盆栽用土壤采自海南省五指山市畅好乡树仔菜基地的表层土壤(0~20 cm),土壤类型为砂壤土。土壤采回后经风干、研磨、过筛(2 mm)后保存。

供试材料:海南省五指山市广泛栽培的马来西亚种树仔菜由五指山市汇通农业综合开发有限公司提供。选择苗龄40 d左右,大小均匀、无病虫害、无损伤的幼苗进行盆栽试验。

供试肥料:腐殖酸营养液由中国热带农业科学院分析测试中心提供,其中黄腐殖酸含量(w,后同)50%;复合肥料为雅苻国际有限公司生产,N、P、K质量比为15:15:15;蚯蚓粪购自海南星农夫生态科技有限公司,有机质含量为50.1%。

1.2 方 法

1.2.1 试验设计 试验于2020年8—9月在海南省海口市中国热带农业科学院温室大棚内进行。选用体积比为1:1的砂壤土和椰糠混合土样作为盆栽土壤,每盆装入1.5 kg土壤,盆栽土基本理化性质如下:pH 5.2,有机质含量73.8 g·kg⁻¹,阳离子交换量9.2 cmol⁺·kg⁻¹,碱解氮含量103.3 mg·kg⁻¹,速效钾含量1.33 g·kg⁻¹,有效磷含量59.4 mg·kg⁻¹,交换性钙含量20.7 cmol·kg⁻¹,交换性镁含量1.90 cmol·kg⁻¹,Zn含量42.9 mg·kg⁻¹,未有Cd检出。

重金属Cd以CdCl₂水溶液形式,采用喷雾方式以4个浓度(w,后同)梯度均匀喷洒至土壤中,分别为0(Cd0)、15(Cd15)、25(Cd25)、45 mg·kg⁻¹(Cd45),计算配置相应浓度所需试剂质量和土壤60%田间持水量所需水量,用扎有细孔的保鲜膜封住盆口,在室温下老化2周,其间采用称质量法补充丢失的水分。为保证土壤具有丰富的有机质,老化平衡后施入底肥和10%的蚯蚓粪,1周后移栽树仔菜苗,每盆种植1株,每个处理3盆,试验3次重复。试验分为试验区 and 对照区,试验区称取0.125 g碱性腐殖酸营养液溶于50 mL清水后对每株进行灌根施肥,每10 d施用1次,对照区则不施用腐殖酸营养液,其他田间管理措施保持一致。种植4个月后收获,采集的土壤样品经自然风干、磨细,分别过60目和100目筛,保存待测;植物样品洗净后,测定生物量,并分成根、叶两部分分别测定酶活性。

1.2.2 Cd胁迫下树仔菜生长指标测定 采用直尺测定树仔菜株高;吸干树仔菜叶片和根部的水分,用电子天平直接测量地上部和根部的鲜质量;将树仔菜地上部和根部清洗干净后放入烘箱内105 °C杀青30 min后,在70 °C下干燥72 h至恒质量,用电子天平测量地上部和根部的干质量;采用长宽乘积法测定叶面积,叶长用直尺测量树仔菜展开叶尖至叶基的距离,叶宽为直尺测量树仔菜展开叶最宽部分的距离。

1.2.3 Cd胁迫下树仔菜生理指标的测定 在树仔菜收获时将根和叶分开,装入塑封袋内,于-80℃超低温冰箱保存,备用。按照苏州科铭生物技术有限公司提供的试剂盒说明书,测定以下指标。采用分光光度法测定叶绿素含量;采用TBA法测定丙二醛(MDA)含量,采用羟胺法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性、采用比色法测定过氧化物酶(POD)活性、采用钼酸铵比色法测定过氧化氢酶(CAT)活性。

1.2.4 Cd胁迫下树仔菜Cd和Zn含量的测定 称取0.25g树仔菜干样加入8mL硝酸放入消解炉中消解,定容至25mL,采用电感耦合等离子体质谱仪测定树仔菜Cd和Zn含量^[11]。

1.3 数据分析

采用Excel 2016、Origin 2018制图,采用SPSS 22.0软件进行试验数据的差异显著性分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 腐殖酸营养液对Cd胁迫下树仔菜生长的影响

由表1可知,在CK处理中,随着Cd胁迫浓度的增加,树仔菜叶面积、叶片数和株高逐渐下降。其中,Cd45处理的树仔菜叶面积和株高分别比Cd0处理显著降低22.2%和16.2%,而叶片数在不同处理间差异不显著。树仔菜地上部干质量和总干质量呈先降低后升高的变化趋势,在Cd0~Cd25处理下,树仔菜地上部干质量和总干质量均显著下降,Cd45处理树仔菜总干质量比Cd15和Cd25处理分别增加5.2%和13.3%。

在AF处理中,随着土壤Cd浓度增加,树仔菜地上部干质量、根部干质量、总干质量、叶面积、叶片数、株高均呈下降趋势。其中,Cd45处理的树仔菜总干质量、叶面积、叶片数和株高比Cd0处理分别显著下降14.9%、37.6%、30.9%和

49.1%。

与CK处理相比,在Cd0~Cd45处理下,AF处理的树仔菜地上部干质量、叶面积和叶片数均显著高于CK处理。AF处理的树仔菜总干质量和株高在Cd0~Cd25处理下显著高于CK处理12.4%~16.7%和8.4%~37.7%。在Cd浓度为45mg·kg⁻¹时,AF处理与CK处理的树仔菜总干质量差异不显著,AF处理的株高显著低于CK处理16.4%。这说明了高Cd土壤下树仔菜在一定的时间和浓度范围内可以正常生长,施用腐殖酸营养液可促进树仔菜生长,但随着Cd浓度的增加,树仔菜生长程度逐渐下降,尤其是在Cd浓度达到45mg·kg⁻¹时,树仔菜株高受到显著抑制。

2.2 腐殖酸营养液对Cd胁迫下树仔菜根部和叶片Cd和Zn含量的影响

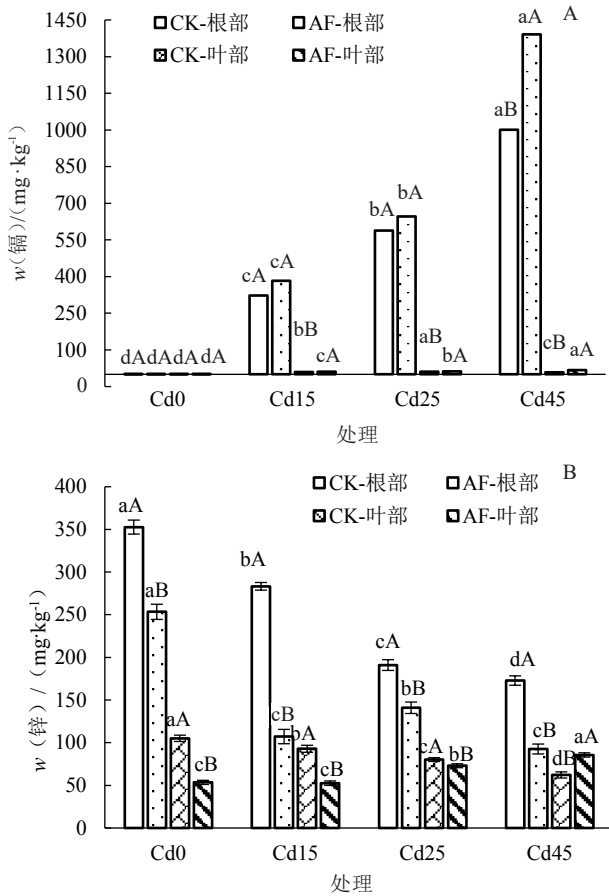
Cd胁迫下树仔菜根部和叶片Cd和Zn含量变化见图1。由图1-A可知,随着Cd胁迫浓度的增加,CK处理和AF处理的树仔菜根部Cd含量呈增加趋势。CK处理下树仔菜根部Cd含量分别为0.61、322.8、587.9、1000.7mg·kg⁻¹;AF处理下树仔菜根部Cd含量分别为0.69、382.6、645.3、1390.9mg·kg⁻¹。在Cd0~Cd25处理下,两处理的树仔菜根部Cd含量差异不显著,在Cd浓度为45mg·kg⁻¹时,AF处理的根部Cd含量显著高于CK处理39.0%。从Cd胁迫下树仔菜叶片Cd含量变化可以看出,随着Cd浓度的增加,CK处理的树仔菜叶片Cd含量呈先升高后降低的变化趋势,AF处理的树仔菜叶片Cd含量则呈上升趋势。在Cd浓度为45mg·kg⁻¹时,CK处理和AF处理的树仔菜叶片Cd含量分别为7.64和17.93mg·kg⁻¹,说明在正常农艺措施的情况下,土壤Cd浓度到达一定值后树仔菜叶片Cd含量会下降,但腐殖酸营养液施用后会促进Cd在树仔菜根部和叶片中富集。

表1 腐殖酸营养液在Cd胁迫下对树仔菜生长的影响
Table 1 Effects of AF on growth of *Sauropus androgynus* under Cd stress

处理		地上部干质量/g	根部干质量/g	总干质量/g	叶面积/cm ²	叶片数	株高/cm
CK	Cd0	7.8±0.7 aB	2.9±0.4 cA	10.7±0.5 aB	9.9±1.2 aB	61.5±1.1 aB	32.1±1.8 aB
	Cd15	6.4±0.5 bB	3.3±0.4 abA	9.7±0.4 bB	8.8±0.7 aB	60.7±0.5 aB	30.1±0.1 aB
	Cd25	5.4±0.3 cB	3.6±0.3 aA	9.0±0.3 cB	7.9±1.0 abB	60.0±0.7 aB	27.5±0.7 bB
	Cd45	6.6±0.3 bB	3.6±0.4 aA	10.2±0.4 abA	7.7±0.2 bB	59.5±0.9 aB	26.9±0.9 bA
AF	Cd0	8.8±0.7 aA	3.3±0.3 aA	12.1±0.5 aA	13.3±1.9 aA	103.5±2.1 aA	44.2±0.4 aA
	Cd15	8.0±0.5 bA	2.9±0.2 abA	10.9±0.4 abA	11.1±1.0 bA	75.3±2.6 bA	36.0±0.8 bA
	Cd25	8.0±0.5 bA	2.5±0.2 bB	10.5±0.4 bA	9.2±0.6 cA	73.0±1.9 cA	29.8±0.7 cA
	Cd45	7.9±0.4 bA	2.4±0.3 bB	10.3±0.3 bA	8.3±0.3 dA	71.5±2.3 dA	22.5±0.9 dB

注:不同小写字母表示同一处理不同浓度间在0.05水平差异显著,不同大写字母表示不同处理同一浓度间在0.05水平差异显著。

由图 1-B 可知,随着土壤 Cd 浓度增加,CK 处理的树仔菜根部 Zn 含量均显著下降,AF 处理的树仔菜根部 Zn 含量呈降-升-降的变化趋势,CK 处理的树仔菜根部 Zn 含量均显著高于 AF 处理。随着土壤 Cd 浓度增加,CK 处理的树仔菜叶片的 Zn 含量不断下降,而 AF 处理中的树仔菜叶片的 Zn 含量逐渐升高。在 Cd0~Cd25 处理下,AF 处理的树仔菜叶片 Zn 含量均显著低于 CK 处理,在 Cd 浓度为 45 mg·kg⁻¹ 时,AF 处理的树仔菜叶片 Zn 含量显著高于 CK 处理 36.9%。说明在高浓度 Cd 胁迫下,腐殖酸营养液可以促进 Zn 在树仔菜叶片中富集。



注:不同小写字母表示同一处理不同浓度间在 0.05 水平差异显著,不同大写字母表示不同处理同一浓度间在 0.05 水平差异显著。

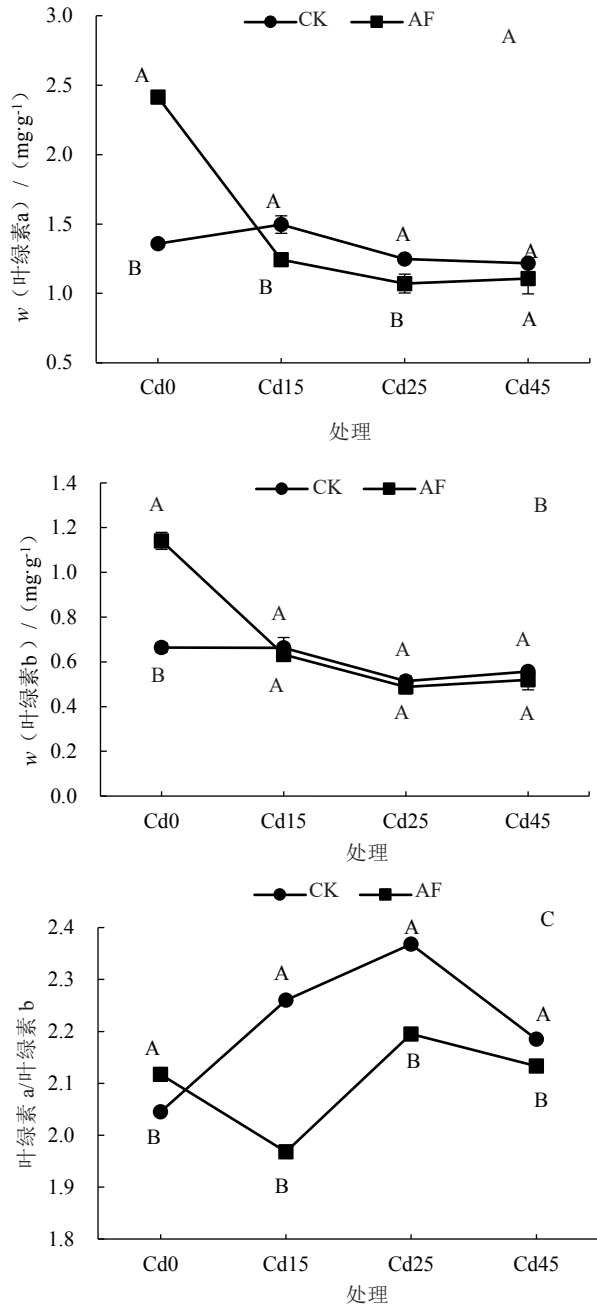
图 1 Cd 胁迫下腐殖酸营养液对树仔菜根部和叶片 Cd 和 Zn 含量的影响

Fig. 1 Effects of AF on the contents of Cd and Zn in roots and leaves of *Sauropus androgynus* under Cd stress

2.3 腐殖酸营养液对 Cd 胁迫下树仔菜叶绿素含量的影响

由图 2 可知,随着土壤 Cd 胁迫浓度的升高,

CK 处理中树仔菜叶绿素 a 呈现先上升后下降的变化趋势,叶绿素 b 含量呈先上升后下降再上升的变化趋势,AF 处理中树仔菜叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均呈先下降后上升的变化趋势。在没有 Cd 胁迫时,AF 处理的树仔菜叶绿素 a 和叶绿素 b 含量分别显著高于 CK 处理 77.8%和 71.8%;在 Cd 浓度为



注:不同大写字母表示同一浓度间不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

图 2 Cd 胁迫下腐殖酸营养液对树仔菜叶绿素 a、叶绿素 b 含量和叶绿素 a/b 的影响

Fig. 2 Effects of AF on chlorophyll a, chlorophyll b content and chlorophyll a/b of *Sauropus androgynus* under Cd stress

15 mg·kg⁻¹时,AF处理的树仔菜叶绿素 a 和叶绿素 b 含量急剧下降,其中叶绿素 a 含量显著低于 CK 处理;在 Cd 浓度为 45 mg·kg⁻¹时,两个处理的树仔菜叶绿素 a 和叶绿素 b 含量差异不显著。通过对叶绿素 a/b 的计算(图 2-C),发现 CK 处理和 AF 处理的叶绿素 a/b 在 Cd25 处达到最高,说明在 Cd 浓度为 25 mg·kg⁻¹时,树仔菜对 Cd 的敏感度最强。

2.4 腐殖酸营养液对 Cd 胁迫下树仔菜根部和叶片丙二醛含量的影响

由图 3-A 可知,随着 Cd 浓度升高,CK 处理的根部 MDA 含量呈先升高后降低的变化趋势,AF 处理的根部 MDA 含量呈逐渐升高趋势。在 Cd0~Cd25 处理下,CK 处理和 AF 处理的根部 MDA 含量差异不显著;在 Cd 浓度为 45 mg·kg⁻¹时,AF 处理的根部 MDA 含量比 CK 处理显著提高 19.6%。从图 3-B 可知,随着 Cd 浓度的升高,CK 处理和 AF 处理的叶片 MDA 含量均呈先升高后降低

的变化趋势。在 Cd 浓度为 25 mg·kg⁻¹时,叶片 MDA 含量最高。在 Cd15~Cd45 处理下,AF 处理的叶片 MDA 含量分别比 CK 处理显著提高 10.1%、10.8%和 7.0%,且 AF 处理和 CK 处理叶片的 MDA 含量均高于根部。说明随着土壤 Cd 浓度增加,AF 处理中的根部膜脂过氧化程度逐渐增加,树仔菜有特殊的运输渠道将土壤中的 Cd 运输到叶片,对叶片细胞质膜造成损伤,从而降低对根部的伤害程度,但是当 Cd 浓度达到一定程度后,叶片细胞质膜损伤程度逐渐下降。

2.5 腐殖酸营养液对 Cd 胁迫下树仔菜根部和叶片抗氧化酶活性的影响

由图 4 可知,在 Cd 胁迫下树仔菜叶片和根部 CAT、SOD、POD 活性的响应不同。从图 4-A~B 可知,随着 Cd 胁迫浓度的增加,AF 处理的树仔菜根部 CAT 活性随着 Cd 胁迫浓度的增加而提高,在 Cd0 和 Cd15 处理下,AF 与 CK 处理差异不显著;在 Cd25 和 Cd45 处理下,AF 处理的树仔菜根部 CAT 活性分别显著高于 CK 处理 44.5%和 93.4%。AF 处理与 CK 处理的叶片 CAT 活性随着 Cd 浓度增加均呈先升高后降低的变化趋势,在 Cd 浓度为 15 mg·kg⁻¹时,CAT 活性最高,AF 处理的叶片 CAT 活性在 Cd0、Cd15、Cd25、Cd45 处理下分别显著高于 CK 处理 101.5%、218.8%、309.1%和 317.4%。

从图 4-C~D 可知,Cd 胁迫处理的树仔菜叶片中的 SOD 活性大于根。随着土壤 Cd 浓度增加,AF 处理的根部 SOD 活性逐渐升高,在 Cd0~Cd25 处理下,CK 处理和 AF 处理的根部 SOD 活性没有显著差异,在 Cd 浓度为 45 mg·kg⁻¹时,CK 处理的根部 SOD 活性显著高于 AF 处理。随着土壤 Cd 浓度增加,AF 处理的叶片 SOD 活性则呈现先降低后升高的变化趋势,在没有 Cd 胁迫时,AF 处理的叶片 SOD 活性显著高于 CK 处理 20.6%,在 Cd15~Cd45 处理下,AF 与 CK 处理差异不显著。

从图 4-E~F 可知,随着土壤 Cd 浓度的升高,CK 处理中根部 POD 活性逐渐下降,AF 处理的 POD 活性则呈现先降低后升高的变化趋势。在 Cd0 和 Cd45 处理下,AF 处理的根部 POD 活性分别显著高于 CK 处理 187.6%和 186.4%。随着土壤 Cd 浓度的升高,树仔菜叶片 POD 活性的变化呈先降低后升高的变化趋势。在没有 Cd 胁迫时,AF 处理的树仔菜叶片 POD 活性显著高于 CK 处理 35.1%。

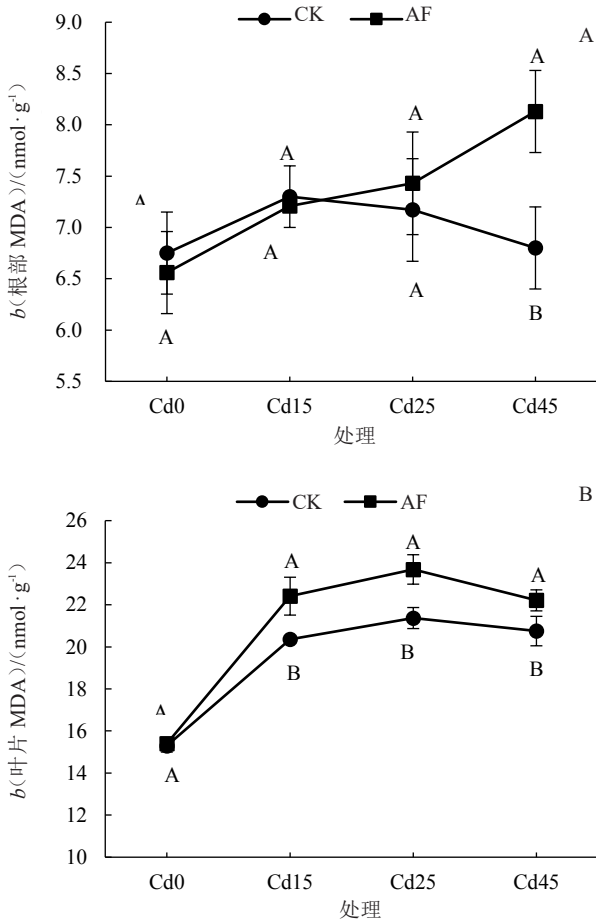


图 3 Cd 胁迫下腐殖酸营养液对树仔菜根部和叶片的 MDA 的影响

Fig. 3 Effects of AF on MDA of roots and leaves of *Sauropus Androgynus* under Cd stress

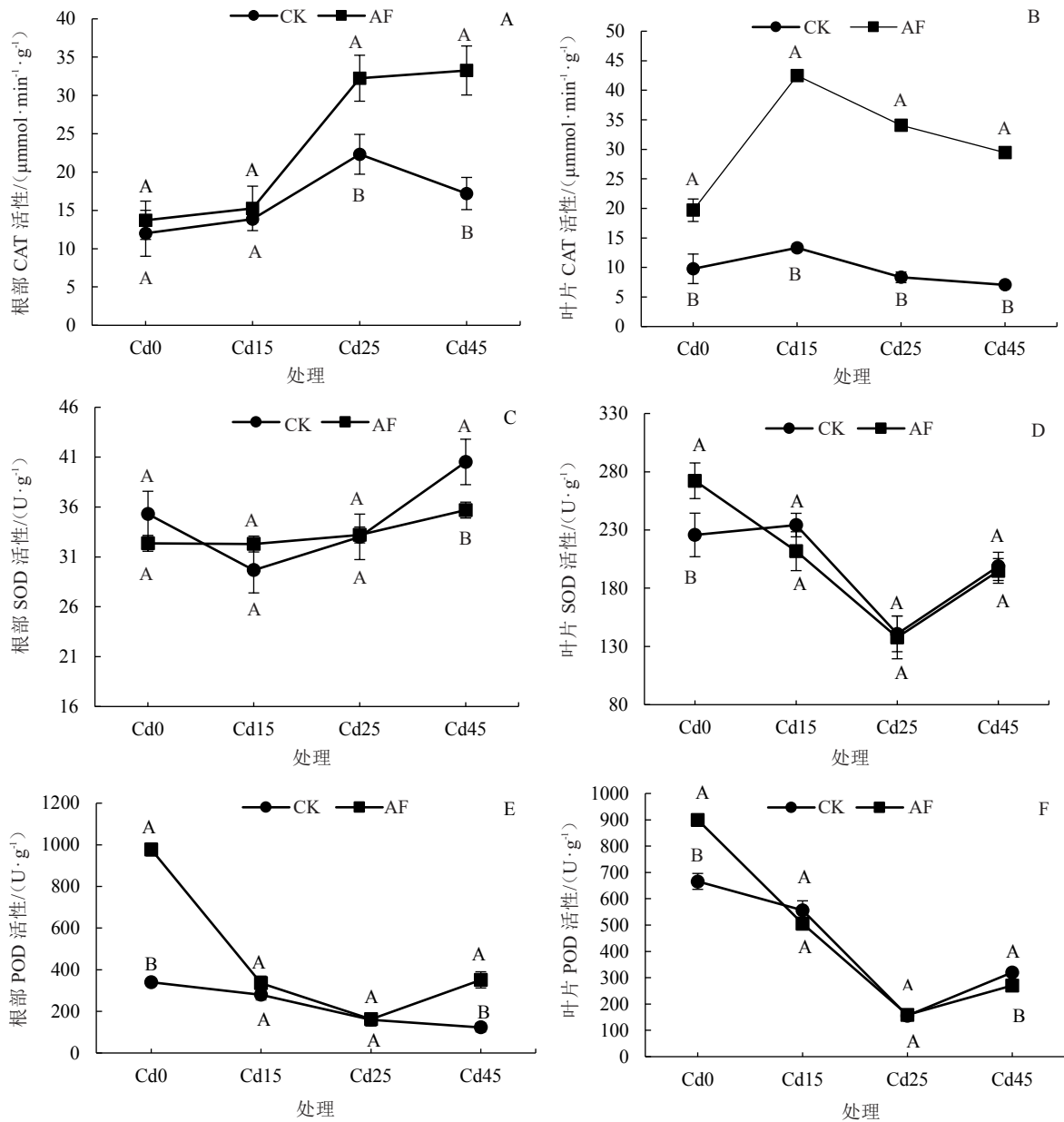


图4 Cd胁迫下腐殖酸营养液对树仔菜根部和叶片的CAT、SOD、POD活性的影响

Fig. 4 Effects of AF on CAT, SOD, POD activity of roots and leaves of *Sauropus androgynus* under Cd stress

2.6 相关性分析

从表2可知,树仔菜株高与根部Cd含量呈显著负相关,与叶面积、叶绿素b含量呈极显著正相关,与总干质量、叶绿素a含量、叶片POD和根部POD活性呈显著正相关;树仔菜叶片Cd含量与根部Cd含量、根部CAT活性呈显著正相关,与叶片MDA、根部MDA含量呈极显著正相关,与根部Zn含量、叶片POD活性呈显著负相关;树仔菜根部Cd含量与根部MDA含量、根部CAT活性呈显著正相关,与根部Zn含量、株高、叶片POD活性呈显著负相关;树仔菜根部Zn含量与叶片Cd含量、根部Cd含量和叶片MDA含量呈显著负相关;叶绿素a含

量与叶绿素b含量、根和叶片POD活性呈极显著正相关,与株高、叶面积呈显著正相关,与叶片MDA含量呈显著负相关;叶绿素b含量与株高、叶面积、根部和叶片POD活性呈极显著正相关,与叶片SOD活性、总干质量呈显著正相关,与叶片MDA含量呈显著负相关;叶绿素a/b与总干质量呈显著负相关。

3 讨论与结论

3.1 腐殖酸营养液对Cd胁迫下树仔菜幼苗生长的影响

Liu等^[12]研究表明,腐殖酸肥料可以提高土壤

表2 树仔菜重金属含量和生理生化特性的相关性分析
Table 2 Correlation analysis of heavy metal content and physio-biochemistry characteristic in *Sauropus androgynus*

指标	叶片 Cd 含量	根部 Cd 含量	叶片 Zn 含量	根部 Zn 含量	总干质量	株高	叶面积	叶绿素 a 含量	叶绿素 b 含量	叶绿素 a/b	根 MDA 含量	叶片 MDA 含量	根 CAT 活性	叶片 CAT 活性	根 SOD 活性	叶片 SOD 活性	根 POD 活性	叶片 POD 活性
叶片 Cd 含量	1																	
根部 Cd 含量	0.814*	1																
叶片 Zn 含量	-0.011	-0.029	1															
根部 Zn 含量	-0.827*	-0.741*	0.526	1														
总干质量	-0.469	-0.409	-0.479	0.095	1													
株高	-0.687	-0.803*	-0.497	0.349	0.774*	1												
叶面积	-0.546	-0.683	-0.463	0.223	0.882**	0.950**	1											
叶绿素 a 含量	-0.684	-0.617	-0.327	0.463	0.661	0.833*	0.793*	1										
叶绿素 b 含量	-0.696	-0.636	-0.361	0.436	0.768*	0.879**	0.869**	0.984**	1									
叶绿素 a/b	0.195	0.231	0.242	0.058	-0.717*	-0.417	-0.574	-0.104	-0.277	1								
根 MDA 含量	0.930**	0.725*	0.251	-0.634	-0.395	-0.678	-0.473	-0.599	-0.602	0.126	1							
叶片 MDA 含量	0.904**	0.684	-0.186	-0.820*	-0.512	-0.587	-0.553	-0.731*	-0.750*	0.250	0.711*	1						
根 CAT 活性	0.801*	0.746*	0.050	-0.692	-0.260	-0.599	-0.434	-0.531	-0.556	0.267	0.794*	0.685	1					
叶片 CAT 活性	0.513	0.147	-0.426	-0.663	0.374	0.162	0.350	-0.179	-0.076	-0.544	0.480	0.501	0.411	1				
根 SOD 活性	-0.001	0.527	-0.079	-0.192	-0.019	-0.413	-0.406	-0.321	-0.287	-0.107	-0.106	0.001	0.139	-0.301	1			
叶片 SOD 活性	-0.603	-0.501	-0.110	0.496	0.656	0.636	0.665	0.758*	0.816*	-0.487	-0.450	-0.732*	-0.699	-0.111	-0.157	1		
根 POD 活性	-0.513	-0.489	-0.343	0.267	0.810*	0.801*	0.880**	0.923**	0.953**	-0.346	-0.375	-0.664	-0.337	0.103	-0.300	0.756*	1	
叶片 POD 活性	-0.767*	-0.736*	-0.106	0.619	0.728*	0.809*	0.812*	0.835**	0.893**	-0.500	-0.607	-0.838**	-0.753*	-0.099	-0.276	0.943**	0.819*	1

注: *表示在 0.05 水平显著相关; **表示在 0.01 水平极显著相关。

养分有效性和玉米养分吸收效率,严萍^[13]研究证明,腐殖酸对小麦、水稻幼苗的株高、鲜干质量、根系活力都有一定的促进作用。在笔者的研究中,Cd胁迫下施用腐殖酸营养液可促进树仔菜生长发育,在土壤Cd浓度为0~25 mg·kg⁻¹时,施用腐殖酸营养液的树仔菜幼苗总干质量、株高、叶面积和叶片数均高于对照组。但是在土壤Cd浓度为45 mg·kg⁻¹时,虽然AF处理显著促进了Cd在树仔菜根部的积累,树仔菜叶面积和叶片数均高于CK处理,然而株高却显著低于CK处理,树仔菜株高与根部Cd含量呈显著负相关,说明了Cd在树仔菜根部的积累量可能达到上限,导致树仔菜生长受到了抑制,主要是体现在株高上,但是并未出现树仔菜死亡的现象。

3.2 腐殖酸营养液对Cd胁迫下树仔菜幼苗Cd和Zn含量的影响

当Cd胁迫浓度达到45 mg·kg⁻¹时,CK处理的树仔菜叶片的Cd和Zn含量显著降低,AF处理后树仔菜的根部和叶片的Cd含量以及叶片的Zn含量均高于CK处理,这可能是树仔菜在正常种植下土壤Cd胁迫达到一定浓度后,根部代谢受损,向叶片迁移的速率下降,而施用腐殖酸营养液促进了树仔菜对土壤中Cd和Zn含量的吸收。王凯迪^[14]研究表明,施用腐殖酸对土壤Cd具有一定的活化作用。吴洪燕等^[5]发现,低分子腐殖酸对土壤重金属的吸附络合能力更强,能提高Cd的生物有效性。在本研究中,笔者施用的腐殖酸营养液主要成分为黄腐酸(含量≥50%),黄腐酸是一种易溶于酸碱的腐殖质,易和重金属离子形成易溶的络合物^[15]。因此,在笔者的试验中,施用腐殖酸营养液显著提高了树仔菜Cd和叶片Zn的积累量,可能存在至少两方面的原因,一是腐殖酸营养液提高了土壤重金属的生物有效性,土壤Cd和Zn更容易被树仔菜吸收和迁移;二是腐殖酸营养液促进了树仔菜生物量提高,进而提高树仔菜对重金属的积累量。由于树仔菜以食用嫩梢(嫩茎10 cm)为主,一般种植6个月后方可采摘嫩茎供食用,笔者的试验材料为生长2个月左右树仔菜幼苗,嫩梢尚不明显,因此,在Cd胁迫下腐殖酸营养液是否促进嫩梢对Cd积累还有待进一步研究。

3.3 腐殖酸营养液对Cd胁迫下树仔菜幼苗叶绿素含量的影响

在笔者的试验中,没有Cd胁迫时,施用腐殖酸营养液的树仔菜叶绿素a和叶绿素b含量均高于CK处理组,但是Cd浓度为15 mg·kg⁻¹时,AF处理

的叶绿素a和叶绿素b含量急剧下降。叶绿素a/b被认为是衡量植物叶片感受重金属相对敏感的一个指标^[16],在Cd15~Cd45处理下,AF组的叶绿素a/b显著低于CK组。叶绿素a和叶绿素b含量与叶片MDA含量呈显著负相关,与叶片SOD活性呈显著正相关,与叶片POD活性呈极显著正相关,说明Cd胁迫下树仔菜幼苗叶绿素的变化会使MDA含量和酶活性等生理生化发生相应变化。朱润华等^[17]的研究表明,随着Cd胁迫浓度增加,越来越多的重金属沉积在细胞膜表面,破坏叶绿体的结构与功能,导致叶绿素降解。张大为等^[18]的研究表明,高浓度的Cd胁迫会显著抑制油菜的叶绿素含量,导致叶片黄化,与本研究结果一致。

3.4 腐殖酸营养液对Cd胁迫下树仔菜生理生化特性的影响

从生理生化的角度来看,腐殖酸营养液可以缓解树仔菜的氧化胁迫。MDA是膜脂过氧化的最终分解产物,浓度越高,表明膜脂过氧化程度越高,细胞膜损伤越严重^[16]。在笔者的研究中,在CK组中,根部和叶片MDA含量呈先升高后降低的变化趋势,说明树仔菜在正常种植下,胁迫程度超过树仔菜自身调节作用的极限后,相关渗透调节物质含量下降。施用腐殖酸营养液的树仔菜根部MDA含量随着根部Cd含量的增加而逐渐升高,这可能与AF处理促进树仔菜根部和叶片Cd积累有关,树仔菜根部和叶片细胞膜受伤害的程度更加严重。过氧化氢酶、超氧化物歧化酶和过氧化物酶是抗氧化酶系统中控制植物体内活性氧积累的最主要的酶^[17]。随着Cd浓度增加,AF处理的根部CAT和SOD活性不断升高,在Cd浓度为45 mg·kg⁻¹时,根部CAT和POD活性均显著高于CK处理,说明树仔菜受到Cd胁迫时,整个酶保护系统起到了一定的缓解自由基危害的作用,从而将胁迫产生的活性氧维持在平衡水平。Garcia等^[20]研究表明,腐殖酸与植物的根系系统存在互相作用,影响叶片和根部抗氧化防御系统中CAT和SOD活性,与本研究结果一致。此外,在笔者的研究中,叶片较根部变化趋势明显可能是由于叶片是植物主要的光合作用部位,酶活性变化较为敏感。这也说明了Cd胁迫下树仔菜体内抗氧化系统消除Cd诱导的ROS能力没有降低,且在叶片中尚有所增强,因此树仔菜对Cd的解毒能力较强,这应是其能富集Cd的原因之一。

综上所述,在Cd胁迫下腐殖酸营养液促进了树仔菜重金属的积累,并通过激发抗氧化酶保护系

统来抵抗树仔菜中 ROS 积累,在 Cd 浓度为 0~25 mg·kg⁻¹ 范围内,腐殖酸营养液在促进树仔菜重金属积累的同时促进幼苗生长,为树仔菜在高 Cd 土壤中种植进行土壤生物修复提供了新的思路。

参考文献

- [1] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014(5):10-11.
- [2] 周聪,赵敏.蔬菜产地酸性土壤中 Pb、Cd、Cr 形态分析研究[J].热带作物学报,2011,32(7):1272-1277.
- [3] ÅKSSON A, BARREGARD L, BERGDAHL I A, et al. Non-renal effects and the risk assessment of environmental cadmium exposure[J]. Environmental Health Perspectives, 2014, 122(5): 431-438.
- [4] 王青清.腐殖酸活性组分含量和比例对紫色潮土中铅的形态转化及生物有效性的影响[D].重庆:西南大学,2017.
- [5] 吴洪燕,李清君,陈士更,等.不同分子量腐植酸的结构特征及其对土壤镉有效性的影响[J].土壤,2022,54(6):1233-1239.
- [6] XU M M, ZHAO Z J, SHI M, et al. Effect of humic acid on the stabilization of cadmium in soil by coprecipitating with ferrihydrite[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(26):27330-27337.
- [7] 赵敏,范琼,邓爱妮,等.酸性土壤改良对土壤镉形态改变及树仔菜镉含量的影响[J].南方农业学报,2018,49(6):1089-1094.
- [8] 柏宏成.低分子有机酸、腐殖酸对土壤镉污染淋洗修复研究[D].成都:四川农业大学,2015.
- [9] 邹传,郭彬,林义成,等.不同粒径腐殖酸颗粒对土壤有效态镉的影响[J].浙江农业学报,2019,31(4):616-623.
- [10] 范琼,周聪,赵敏,等.Folin-Ciocalteu 比色法测定树仔菜总多酚[J].南方农业学报,2014,45(12):2230-2235.
- [11] 范琼,赵敏,酒元达,等.双位加热消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定树仔菜中 7 种元素的含量[J].南方农业学报,2020,51(10):2215-2522.
- [12] LIU M L, WANG C, WANG F Y, et al. Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 142: 147-154.
- [13] 严萍.含腐殖酸调理剂对小麦、水稻幼苗生长和产量的影响[D].江苏扬州:扬州大学,2016.
- [14] 王凯迪.堆肥腐殖酸强化东南景天修复镉铅污染土壤的研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [15] 黄占斌,郝文静,冯泽坤,等.腐植酸在土壤改良和污染修复中的应用现状及研究展望[J].水土保持通报,2022,42(2):354-361.
- [16] 赵晓祥,冯璐,王宇晖.锌、镉单一及复合胁迫下番茄幼苗生理响应及联合毒性的研究[J].安全与环境学报,2020,20(3):1176-1184.
- [17] 朱润华,贺忠群,王海霞,等.镉胁迫处理对水培苦苣幼苗生理响应及叶片超微结构的影响[J].西南农业学报,2021,34(6):1302-1308.
- [18] 张大为,杜云燕,吴金锋,等.镉胁迫对甘蓝型油菜幼苗生长及基因表达的影响[J].中国油料作物学报,2020,42(4):613-622.
- [19] 范琼,冯剑,邹冬梅,等.重金属镉在树仔菜-土壤系统中的富集迁移及安全阈值研究[J].中国瓜菜,2022,35(11):86-92.
- [20] GARCIA A C, SANTOS L A, LZQUIERDO F G, et al. Vermicompost humic acids as an ecological pathway to protect rice plant against oxidative stress[J]. Ecological Engineering, 2012, 47:203-208.