

镉胁迫对菊芋生理变化及镉富集的影响

周蜜¹, 吴玉环^{2,3}, 刘星星¹, 陈娇¹, 郑婷¹, 章嗣瑶¹, 李江雯¹, 李润桥¹, 刘鹏¹

(1. 浙江师范大学植物学实验室, 浙江 金华 321004; 2. 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310036; 3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要: 通过用耐镉性较好的徐州菊芋和耐镉性较弱的潍坊菊芋进行对比试验, 设置土培 CK(Cd^{2+} 0 mmol/L, 即对照组)、T1(Cd^{2+} 0.1 mmol/L)、T2(Cd^{2+} 0.5 mmol/L)和 T3(Cd^{2+} 1.0 mmol/L)4 个处理组, 探讨菊芋镉胁迫下各项生理指标和根际土壤指标以及富集能力的影响。结果表明: 经过不同镉浓度胁迫 21 天后, 2 个菊芋品种的根长、株高、叶长、叶宽均受到相应程度的抑制, 抗氧化酶活性随镉浓度的增加而减弱; 但丙二醛(MDA)含量变化有所不同, 潍坊菊芋的 MDA 含量伴着镉胁迫加深而增加, 徐州菊芋只在 T3 镉浓度下才出现明显的上升变化, 并在 21 天时达到峰值, 为对照组的 3.52 倍。根际土壤 pH 大致呈现出持续下降趋势, 镉处理 20 天时潍坊菊芋和徐州菊芋根际土壤 pH 均在 T3 处理下达到最低, 降幅分别为 3.85% 和 3.41%; 有机质含量却表现出不断增加的状态, T3 镉处理至第 20 天时, 潍坊菊芋最大增幅为 38.60%, 徐州菊芋为 36.01%; 随着施加镉浓度的变大, 抑制了菊芋对土壤碱解氮的吸收, 总体上潍坊菊芋受抑制程度大于徐州菊芋。2 个菊芋品种对镉的富集效果也不同, 徐州菊芋各器官镉富集量均高于潍坊菊芋; 在转运镉方面, 潍坊菊芋根部的镉均等地转移到了叶、茎上, 徐州菊芋则将大部分从根部转移到茎上。综上所述, 菊芋在镉胁迫下体现出一定的抗性, 具有较强镉富集能力, 徐州菊芋镉富集能力更为明显。因此, 将能源植物菊芋应用于镉污染土壤兼具经济和生态意义。

关键词: 菊芋; 镉富集; 生理指标; 根际土壤; 土壤 pH

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)02-0323-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.049

Effects of Cadmium Stress on Physiological Responses and Cadmium Enrichment in *Helianthus tuberosus* L.

ZHOU Mi¹, WU Yuhuan^{2,3}, LIU Xingxing¹, CHEN Jiao¹,

ZHENG Ting¹, ZHANG Siyao¹, LI Jiangwen¹, LI Runqiao¹, LIU Peng¹

(1. Botany Laboratory, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004; 2. College of Life and Environmental Science, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036; 3. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: Effects of Cadmium (Cd) stress on the physiological indexes, rhizosphere soil indexes, and the bioaccumulation ability in *Helianthus tuberosus* L. of Weifang and Xuzhou were studied by a soil culture experiment. Experimental treatments included CK (Cd^{2+} 0 mmol/L as control), T1 (Cd^{2+} 0.1 mmol/L), T2 (Cd^{2+} 0.5 mmol/L) and T3 (Cd^{2+} 1.0 mmol/L). The results showed that all of the root lengths, plant heights, leaf lengths, and leaf widths of two varieties of *Helianthus tuberosus* were inhibited to some extent under different Cd stresses after 21 days. The activities of antioxidant enzymes were decreased with the increasing of Cd concentrations. While the changes of MDA contents were different in two varieties. The MDA contents of Weifang *H. tuberosus* were increased with Cd stress, but those of Xuzhou *H. tuberosus* were increase only under T3 reaching the highest MDA content after 21 days, which was 3.52 times of CK. The rhizosphere soil pH decreased approximately linearly, and both values in Weifang and Xuzhou *H. tuberosus* decreased the most after 20-day treatment of T3, with 3.85% and 3.41% respectively lower than those of CK. The organic matter contents were increased with the increasing Cd concentrations, with the largest

收稿日期: 2018-09-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571049, 41461010)

第一作者: 周蜜(1995—), 女, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事植物逆境营养、植物生理生态研究。E-mail: 526169063@qq.com

通信作者: 刘鹏(1965—), 男, 湖南冷水江人, 博士, 教授, 主要从事植物逆境生理、环境污染与保护、植物生理生态研究。E-mail: sky79@zjnu.cn

increase of 38.60% and 36.01%, respectively in Weifang and Xuzhou *H. tuberosus* after 20 days. As Cd concentrations became higher, it inhibited the uptake of alkali-hydrolyzable nitrogen (AN) in soil by *Helianthus tuberosus*. The overall inhibition was greater than that of Xuzhou *H. tuberosus*. The destinations of Cd transfer were different in two varieties. With the increase of concentrations, Cd almost equally transferred to the leaves and stems in Weifang *H. tuberosus*, while most of Cd in Xuzhou *H. tuberosus* transferred from the roots to the stems. The results indicated that *H. tuberosus* has a strong ability to accumulate Cd and a certain resistance under Cd stress, even more obvious for Xuzhou *H. tuberosus*. Therefore, *H. tuberosus* could be applied in Cd-polluted soils with both economic and ecological significance.

Keywords: *Helianthus tuberosus* L.; Cd bioaccumulation; physiological index; rhizosphere soil; soil pH

镉(Cd)作为目前危害性最为严重的重金属之一,有较强的流动性^[1],当在土壤中积累时易被植物根系吸收,致使细胞膜脂过氧化和膜电位去极化,易破坏细胞质膜的完整性,抑制其光合作用和蒸腾作用,进而干扰植物体的整个代谢过程和生长。当土壤中镉含量超过一定值时^[2],会以生物富集方式进入人体,导致患病,引发癌症,甚至诱发突变等^[3]。近 2 年来有调查公报^[4]显示,土壤镉超标率达 7.0%,污染面积达到 44.1 万 km²,导致农作物产量急剧下降,经济损失高达 20 亿元,严重阻碍了我国农业可持续发展。针对日益严重的镉污染,植物修复已经成为绿色经济且被广泛关注的治理措施,其核心技术是利用某些对镉具有超富集能力的植物,将土壤中的镉大量转移到植株体内(特别是地上部)以修复污染土壤^[5]。迄今,已筛选出镉超富集植物 10 余种^[6],如牛膝菊(*Galinsoga parviflora* Cav.)、天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens* J. et C. Presl.)、龙葵(*Solanum nigrum* L.)等。但根据进一步的深入探究,发现以超富集植物为主的植物修复模式还有较大的局限性,主要包括:可达到完全符合部分重金属标准的超富集植物较少,适应性能力也并不很明显,更难以投入于推广;已发现大部分超富集植物存在地上部生物量低、生长缓慢等问题,修复效率较差^[7];有工程试验显示,天蓝遏蓝菜修复污染浓度 444 mg/kg 的 Cd 污染土地到 330 mg/kg 需要 13.4 年^[8]。由此可见,探索生物量大、适应性强的富集植物调控仍是当今镉污染土壤生物修复的重要探讨方向。

菊芋(*Helianthus tuberosus* L.)为菊科多年生草本植物,具有抗寒、抗旱、耐盐碱和耐贫瘠等特性,在全球各气候带均有分布及种植,目前已在各个行业被广泛应用^[9]。菊芋还具有镉富集的潜力,生态适应性强、生物量大的特点使其优于一般的富集植物。有试验^[10]证明其在较高镉浓度下未出现显著的毒害,存在某种根系吸收、运输和体内解镉毒的机制。不过目前对于菊芋镉富集的探究仅局限于其吸收能力,对植物体、尤其有关其根系对土壤调控镉富集与镉转运等方面还未见相

关报道。因而本文旨通过研究不同浓度镉胁迫对菊芋根际土壤理化特性、地上与地下部分镉含量及生理变化等的影响,探求菊芋耐镉和富集镉的能力,阐明根际土壤环境与植株镉富集调控的关系,为菊芋修复土壤镉污染及再开发提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本试验以成都菊芋、金华菊芋、资阳菊芋、浦江菊芋、潍坊菊芋、徐州菊芋、温州菊芋、唐山菊芋、南京菊芋、黄冈菊芋、嘉兴菊芋和沐阳菊芋 12 个菊芋品种为材料,分别购于四川、浙江、山东、江苏、河北及湖北等地区,收集的块茎先栽培在浙江师范大学生物园,再通过筛选后以耐镉性较弱的潍坊菊芋和耐镉性较强徐州菊芋作为本试验的对比研究材料。

1.2 试验设计

选取芽眼较多的块茎 20~30 g,用蒸馏水冲洗干净后,切取带芽眼部分播种于装有细沙和 1/3 营养液的具孔塑料桶中,进行催芽。当块茎萌发幼苗长到约 8 cm 左右时,取长势大约一致的幼苗转移至装有土壤的塑料钵中,移入 Hoagland 1/2 完全营养液,预培养 3 天,再转入完全营养液预培养 6 天,然后进行处理:CK(Cd²⁺ 0 mmol/L,即对照组)、T1(Cd²⁺ 0.1 mmol/L)、T2(Cd²⁺ 0.5 mmol/L)和 T3(Cd²⁺ 1.0 mmol/L),其中,Cd²⁺以 CdCl₂·2.5 H₂O 的形式提供,每个处理 3 次重复。每隔 1 天浇灌不同浓度的镉溶液 50 mL,最初测定原来状态及胁迫的第 10 天、第 20 天菊芋根际土壤各项指标,在胁迫的第 7、14、21 天测定菊芋体内抗氧化酶活性和 MDA 含量,在胁迫的第 21 天测量菊芋的株高、叶宽、叶长和根长等生长量,最后计算菊芋镉在根茎叶的富集率。试验时间为 2017 年 7—11 月,试验地点为浙江师范大学植物学实验室,试验所用浓度均通过前期大量的预试验获得。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生物量的测定 将菊芋幼苗从塑料盆中取出,用去离子水冲去土壤,再用吸水纸吸干后随机取 3~5 片功能叶分别测定叶长和叶宽,然后用直尺测

量株高和根长。

1.3.2 抗氧化酶及 MDA 的测定 取植物叶片 0.35 g,分 4 mL 磷酸缓冲液于冰浴中研磨成匀浆,在冷冻高速离心机中以 6 000 r/s 离心 20 min,上清液即酶提取液。抗氧化酶活性依照 Yan 等^[11]的方法测定:采用氮蓝四唑(NBT)法测定叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性;紫外吸收法测定叶片过氧化氢酶(CAT)活性;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定。

1.3.3 菊芋地上地下部分镉含量的测定 植物根、茎和叶干样过 20 目筛(20 孔/645.16 mm²),采用 HNO₃-HClO₄ 法^[12]进行消化(二者体积比为 87:13),用电感耦合等离子体质谱^[13]测量镉含量,生物富集率(BCF)=植物组织中 Cd 浓度/溶液中 Cd 浓度;转移系数(TF)=叶或茎中 Cd 浓度/根中 Cd 浓度。

1.3.4 土壤镉含量及根际土壤化学指标的测定 土壤指标测定方法参照袁波等^[14]的方法,土壤全镉含量采用高氯酸与硝酸提取—原子吸收分光光度法进行测定;有效态镉含量采用 DTPA 作提取剂—原子吸收法检测,测定过程中采用国家标准土壤样品(GBW 07046)进行分析质量控制。

1.4 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2013 软件录入和整理相关数据,用 SPSS 18.0 软件数据处理系统进行方差分析和显著性检验,并采用 Excel 2013 和 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 2 个菊芋品种生长状况的变化

从总体上来看,镉对菊芋幼苗生长具有抑制作用(表 1),在镉胁迫下,2 个菊芋品种叶长都有明显下降趋势($P<0.05$),徐州菊芋叶长总体降低的趋势比潍坊菊芋较为平缓。潍坊菊芋在不同镉浓度处理下叶长皆低于对照组,分别为 CK 组的 83%,65%和 60%;徐州菊芋叶长在 T1 镉浓度时,变化差别不大,为对照组的 88%,但在 T2 和 T3 镉浓度处理下,叶长与 CK 组存在鲜明的对比,分别为对照组的 78.7%和 74.3%。2 个品种叶宽的变化趋势与叶长相似,与对照组存在较大区别。就株高和根长来说,虽然随着镉浓度增加,一直处于降低趋势,但潍坊菊芋较对照组存在显著差异,而徐州菊芋与对照无显著差异。上述结果表明,镉在某种程度上影响菊芋幼苗的生长,可见徐州菊芋比潍坊菊芋在镉胁迫下生长的适应性要强。

表 1 不同浓度 Cd 胁迫下对 2 种菊芋生长的影响

菊芋品种	Cd 浓度/(mmol·L ⁻¹)	株高/cm	根长/cm	叶长/cm	叶宽/cm
潍坊菊芋	0	25.30±6.15a	18.93±2.57a	11.30±0.51a	4.50±0.11a
	0.1	23.97±0.38a	16.67±1.65a	9.40±0.33bc	3.86±0.64b
	0.5	20.73±3.74b	14.60±9.56ab	7.45±0.51c	3.04±0.22bc
	1.0	19.93±3.63b	13.83±5.56ab	6.88±0.11c	2.80±0.54c
徐州菊芋	0	18.67±0.15b	16.27±1.50a	12.84±0.78a	4.70±0.64a
	0.1	17.37±2.44b	19.53±6.49a	11.34±0.21ab	3.96±0.81ab
	0.5	13.07±2.58a	15.94±5.50a	10.11±0.37b	3.02±0.77bc
	1.0	10.87±2.62a	11.67±6.50a	9.54±0.87c	2.80±0.20bc

注:表中数据为平均值±标准误差;同项同行数据后相同字母表示在 $P<0.05$ 水平上无显著差异。下同。

2.2 抗氧化酶活性的变化

在各种逆境胁迫下,不同种类或品种植物会通过改变抗氧化酶系统各组分的活性来增强其抗逆性。由图 1 可知,在镉胁迫的第 1 周期时,潍坊菊芋和徐州菊芋各处理组 SOD 活性较对照组强($P<0.05$),之后产生不同变化,这与品种的类型密切相关。潍坊菊芋 SOD 活性在胁迫第 7 天随着施加的镉浓度增加呈现升高趋势,胁迫时间延长后开始降低,在 T3 处理 21 天时,达到谷值 23.6%;而徐州菊芋 SOD 活性在胁迫前 2 个周期均处于上升状态,在第 21 天表现出向下趋势,其中 T3 处理下跌最大,为 31.2%,这说明徐州菊芋本身有较高的清除活性氧自由基的能力。

CAT 也是活性氧代谢的关键酶,能与 SOD 发生协同反应,降低植物的胁迫毒害。从图 2 可以看出,镉处理时间延长,潍坊菊芋和徐州菊芋 CAT 活性均呈先升

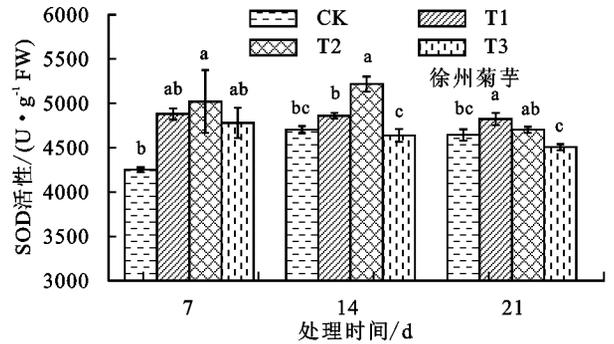
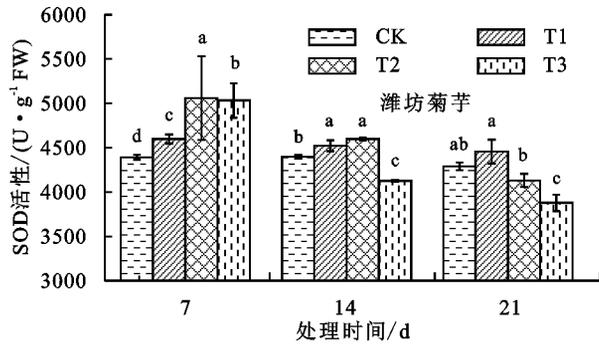
后降趋势,其活性最高多在胁迫处理的第 14 天,此时潍坊菊芋 T1 处理的活性最大,较对照组提高 366.7%,徐州菊芋 T2 处理活性最高,较对照组提高 564.3%。可见,在镉胁迫下,徐州菊芋分解过氧化氢的能力高于潍坊菊芋,表现出 2 个品种耐镉的差异性。

2.3 MDA 含量的变化

MDA 是反映植物细胞膜脂过氧化作用的指标,膜脂过氧化作用会慢慢将细胞膜系统瓦解,并最终导致机体死亡。植物在正常情况下,MDA 含量很低,当处于逆境情况下,随时间的推移和逆境的积累,MDA 含量会出现相应的增加。由图 3 可知,在镉胁迫下,随时间延长(7~21 天),潍坊菊芋各处理组的 MDA 含量显著增加($P<0.05$)。在第 21 天时,潍坊菊芋 T1、T2、T3 分别是 CK 组的 1.60,1.75,2.25 倍,说明随着胁迫程度的加深,潍坊菊芋膜脂过氧化程度在不断

提高,表现出潍坊菊芋对镉的敏感性。而徐州菊芋虽然 MDA 含量在 T1、T2 处理下先增加后下降,但差异性不大,仅在 T3 处理时才出现明显的上升($P < 0.05$)。在第 21 天时,徐州菊芋 T1、T2、T3 组分别

是 CK 组的 1.12, 1.40, 3.52 倍。综上所述,可知镉胁迫下 2 个菊芋品种叶片膜脂过氧化损坏程度不同,表明其对镉的抗逆性不同,其中徐州菊芋表现出较强的抗镉能力,且在中低镉浓度下更为明显。



注:误差线表示标准差,其上标注的不同字母表示同一生育期内处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同浓度镉胁迫对潍坊菊芋和徐州菊芋 SOD 活性的影响

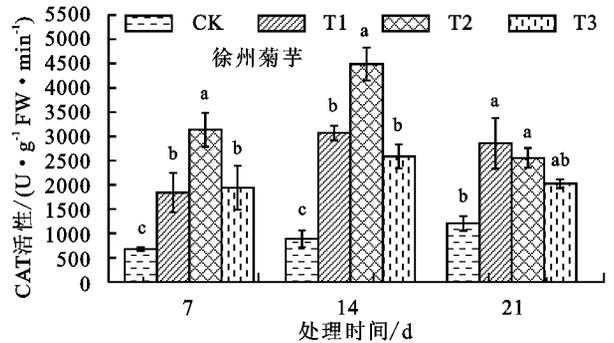
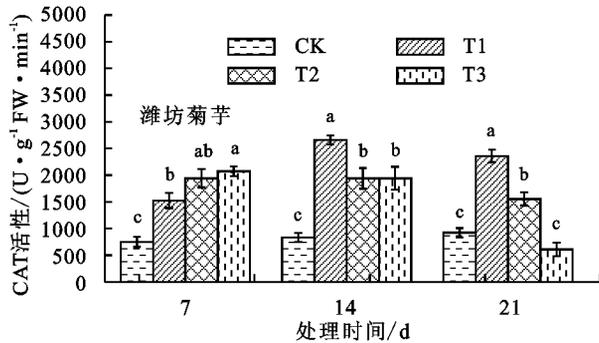


图 2 不同浓度镉胁迫对潍坊菊芋和徐州菊芋 CAT 活性的影响

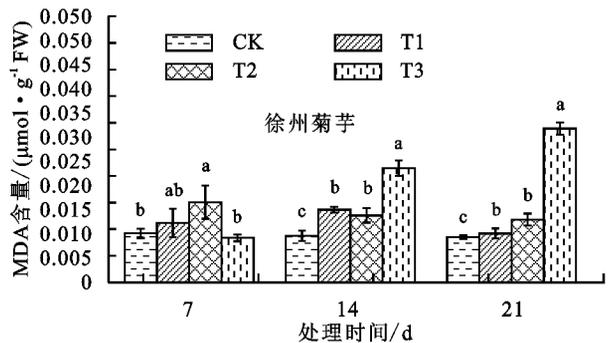
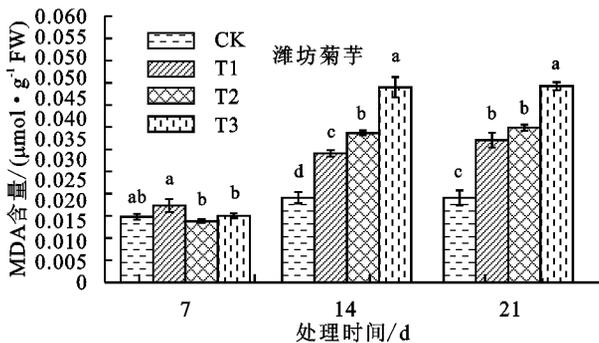


图 3 不同浓度镉胁迫对潍坊菊芋和徐州菊芋 MDA 含量的影响

2.4 根际土壤环境的影响

2.4.1 不同镉浓度胁迫下根际土壤 pH 变化 土壤 pH 的变化与植物抗重金属能力间的相关性,有学者^[15]认为,土壤 pH 是土壤中重金属形态的重要影响因素,pH 越低(即土壤酸性强度大),可溶态重金属浓度越高,生物有效性越高。由表 2 可知,随着胁迫时间延长和镉浓度的增加,潍坊菊芋和徐州菊芋根际土壤 pH 总体呈递减趋势,酸性逐渐增强。在胁迫处理 10 天时,潍坊菊芋和徐州菊芋各处理组土壤 pH 存在显著性差异($P < 0.05$),其中当镉浓度增加,潍坊菊芋减小迅速,而徐州菊芋减小较为缓慢。在胁迫处理 20 天时,2 个菊芋品种各处理组在土壤 pH 的区别并不分明,在 T3 处理时根际 pH 达到最小值,

比 CK 组分别低 3.85% 和 3.41%。结果表明,镉胁迫使菊芋根际的土壤 pH 降低,而短时间内徐州菊芋能在较高镉浓度下维持根际土壤 pH 的稳定。

2.4.2 不同镉浓度胁迫下土壤碱解氮变化 植物生长发育需要各种营养元素,其中碱解氮是土壤中氮元素的主要来源,碱解氮分解的氮元素为植物易吸收的有效氮^[16]。由表 2 可知,潍坊菊芋土壤碱解氮含量随镉浓度的增大而增加,徐州菊芋出现先降后升的趋势,在同一胁迫情况下,潍坊菊芋均高于徐州菊芋。在镉处理 10 天时,潍坊菊芋处理组均比 CK 组高,T2、T3 的碱解氮含量显著高于 CK 组($P < 0.05$),然而此时徐州菊芋与之完全相反,各处理组的碱解氮含量均低于对照组,这充分体现 2 个菊芋品种间的区

别。当镉处理至 20 天时,2 个菊芋品种皆表现为 T1 低于 CK 组和 T2、T3 高于 CK 组的情况,这表明镉对潍坊菊芋吸收氮营养有一定抑制作用。虽然在高浓度胁迫时,徐州菊芋土壤碱解氮含量有所增加,但无显著性差异。在镉胁迫的短期内,徐州菊芋比潍坊菊芋吸收较多的氮元素。由此可知,伴随胁迫程度的加深,2 个菊芋品种对氮元素吸收均会受到抑制,但二者受压抑程度存在明显差异。

2.4.3 不同镉浓度胁迫下土壤有机质变化 有机质在土壤中不能被植物体吸收,但会被土壤动物及微生物进行分解^[17],还能与重金属发生螯合和络合反应,影响植物对重金属的吸收^[18]。从表 2 可以看

出,当胁迫时间相同时,施用的镉浓度增加,2 个菊芋品种根际土壤有机质含量总体呈现增多趋势。镉胁迫 10 天时,T1 处理有机质含量均小于 CK 组,其余 2 个浓度的处理均高于 CK 组,且徐州菊芋在 T1 处理有机质含量明显高于对照组($P < 0.05$),潍坊菊芋各处理组无显著性差异。镉胁迫至 20 天时,徐州菊芋 T2 处理已达最大增幅,为 36.01%,而潍坊菊芋在 T3 处理达最大增量为 38.60%。同一浓度胁迫下,处理 10~20 天后,有机质的降低幅度均小于 CK 组,且潍坊菊芋土壤有机质含量比徐州菊芋高。说明 2 个菊芋品种在镉胁迫下,土壤有机质的分解均受到一定的程度的抑制。

表 2 菊芋根际土壤化学性质

天数	处理	潍坊菊芋			徐州菊芋		
		碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH
0	初始	97.574	12.57	4.443	97.574	12.57	4.443
	CK	69.51±1.32b	11.05±0.65a	5.00±0.01b	84.01±2.82a	10.57±0.22ab	5.05±0.01bc
10	T1	71.58±4.00ab	10.79±0.79a	5.12±0.00a	61.19±4.75c	9.87±0.67b	5.14±0.01a
	T2	82.15±3.27a	11.48±0.48a	4.96±0.01c	72.71±2.99b	10.77±0.38ab	5.09±0.00b
	T3	81.23±1.50a	12.17±0.66a	4.98±0.01bc	73.00±1.75b	11.64±0.42a	5.01±0.01c
20	CK	41.28±1.99bc	8.60±0.29c	4.94±0.01a	30.37±2.61bc	8.08±0.26c	4.99±0.02a
	T1	38.19±1.30c	9.41±0.30c	4.90±0.017ab	20.37±0.79c	8.90±0.41bc	4.93±0.02ab
	T2	46.28±2.44ab	10.61±0.08b	4.84±0.02b	41.54±4.40a	10.99±0.40ab	4.88±0.02bc
	T3	51.10±1.31a	11.92±0.57a	4.79±0.015c	35.30±2.21ab	9.41±0.63a	4.82±0.02c

2.5 不同浓度镉胁迫下菊芋富集效能对比

从表 3 可以看出,2 个菊芋品种各部分镉含量的大小均为根>叶>茎。徐州菊芋根茎叶镉的含量均高于潍坊菊芋。菊芋体内镉的含量与镉胁迫浓度呈正相关,而富集系数伴随胁迫的加强呈下降趋势,其中根是菊芋镉含量最多的部分,也是富集镉的主要区域。在 T3 处理下,2 个菊芋品种根的镉含量与镉富集整体降低,说明高镉浓度处理对菊芋根系富集有抑制作用;潍坊菊芋和

徐州菊芋转移镉的目的地不同,即镉浓度的增加,潍坊菊芋根部的镉几乎均等地转移到叶和茎上,徐州菊芋则将大部分镉从根部转移到了茎上,只有少部分转移到叶片。通过比较 2 个菊芋品种对镉吸收转运可知,徐州菊芋对镉的吸收能力总体上高于潍坊菊芋,尤其是 T3 处理时,徐州菊芋根部镉含量高于潍坊菊芋 243.6%。由转移系数可知,徐州菊芋在中、高镉浓度,其转移的能力也强于潍坊菊芋。

表 3 不同镉浓度下镉在潍坊菊芋和徐州菊芋根、茎、叶中的富集量

菊芋品种	镉浓度/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cd 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			生物富集系数			转移 系数/%
		根	茎	叶	根	茎	叶	
潍坊菊芋	0	1.52±0.05d	0.68±0.08d	0.57±0.03d	—	—	—	—
	0.1	65.43±2.57c	3.92±0.12c	6.98±0.51c	5.82±0.23a	1.35±0.01b	1.62±0.05a	0.92±0.35b
	0.5	172.71±13.59b	15.01±0.25b	15.17±1.24b	3.07±0.24b	1.27±0.01c	1.27±0.02b	0.78±0.59b
	1	255.29±1.50a	65.40±3.793a	75.04±3.07a	2.27±0.01c	1.58±0.03a	1.67±0.03a	0.63±1.62a
	0	1.47±0.08c	0.55±0.01d	0.33±0.06d	—	—	—	—
徐州菊芋	0.1	224.82±4.96b	12.30±0.89c	9.39±0.40c	20.00±0.44a	1.69±0.08b	1.84±0.04a	1.49±0.50c
	0.5	377.65±7.28a	42.95±1.23b	24.53±1.10b	6.72±0.13b	1.36±0.022c	1.44±0.02b	0.88±0.30b
	1	364.98±6.12a	179.15±5.89a	29.17±3.50a	3.25±0.05c	1.19±0.052a	1.26±0.01c	0.76±2.33a

3 讨论

3.1 镉胁迫下菊芋抗氧化酶活性及 MDA 含量的变化

植物对镉的耐受性是其富集镉的先决条件,当受到外界胁迫时,通常表现为体内活性氧(ROS)的积累,加重了抗氧化系统的负担,使细胞内自由基的增

殖和清除平衡遭到破坏。然而镉不如铜,可以直接产生 ROS,但通过与—SH、—COOH 等结合来改变靶蛋白的活性,引起细胞代谢失调,使得过量 ROS 累积所造成的氧化伤害,从而发生毒害作用^[19]。在逆境中,植物通过利用自身的 SOD 与 CAT 协同将超氧

阴离子转化为 H_2O_2 , 再转变 H_2O 等方式进行抗逆境作用。本试验是以潍坊菊芋和徐州菊为对比材料, 揭示了在中、低浓度镉胁迫下菊芋 SOD 活性明确增高, 细胞内活性氧数量增多。随着处理浓度增大, SOD 活性开始降低, 其中较为敏感的潍坊菊芋活性降低较快, 且更低。另外, CAT 活性变化与 SOD 的变化协同, 这与曹林等^[20] 酸铝胁迫下将导致菊芋幼苗膜系统的过氧化损伤的研讨结果相一致。在 T1、T2 镉浓度处理时, 植物体内感受到胁迫刺激, 激活抗氧化酶系统进行自我保护, 而 T3 镉浓度下, 镉离子吸收增加, Zn、Fe、Mn 等金属离子吸收受到抑制, 这 3 种金属元素是与 SOD、POD、CAT 的形成紧密相关, 试验结果也显示出菊芋抗氧化酶系统的合成受到抑制, 这与张哈芝等^[21] 在镉胁迫下对蓖麻 (*Ricinus communis* L.) 相关试验过程的阐述相一致。2 个菊芋品种的 MDA 含量在高镉浓度下显著上升再次证明了此观点, MDA 是膜脂过氧化产物, 它能与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联, 形成不溶性化合物发生沉淀, 干扰细胞的正常活动。除此之外, 这 2 个品种在抗氧化酶系统的变化趋势存在部分差异, 在高镉胁迫下徐州菊芋表现出 SOD 和 CAT 具有较好的活性(图 1、图 2), MDA 含量上升速度较为缓慢(图 3)。由此可见, 抗氧化酶活性及其代谢水平很大程度与植物本身的抗逆强弱有关, 因而可根据 2 个不同菊芋品种的比较, 表明徐州菊芋在适应镉逆境时有一定的抗性优势。

3.2 镉胁迫下菊芋根际土壤理化性质的变化

根际土壤环境作为重金属从土壤进入植物根系的门户, 与植物富集镉密切相关。土壤—植物系统中, 土壤理化性质是影响重金属生物有效性的的重要因素, 其中土壤重金属形态主要受土壤 pH 和氧化还原电位(Eh)的制约及其他化合物种类的作用, 不同形态的重金属在适当土壤环境条件下是可以相互转化的^[15]。大量吸附试验^[22] 证明, 土壤及其组分对镉的吸附随 pH 增大而增加。本试验结果显示, 菊芋根际土壤 pH 与镉胁迫浓度呈负相关, 随施用镉浓度的增加, 土壤酸性程度不断加深, 土壤对镉的吸附减小, 促进植物根系对镉的吸收。在相同情况下, 徐州菊芋的根际土壤 pH 均高于潍坊菊芋(表 2), 这与 2 个菊芋品种自身耐镉性的差异密切关联。在高镉浓度处理下, pH 减小, 促进镉在土壤中的迁移和转化, 这与廉梅花等^[23] 在根际土壤镉的溶解性探究一致。一方面是在酸性土壤中, 施加的镉浓度增大, 土壤的 Cd^{2+} 含量增多, 易络合成有机质—金属络合物, 使其有机质、黏土矿物和水合氧化物表面的负电荷减少, pH 不断下降, 同时减弱了其对 Cd^{2+} 的吸附能力; 另一方面,

Cd^{2+} 和 H^+ 具有相同的竞争位点, 结合态的镉因与大量 H^+ 发生交换而被释放, 导致土壤 pH 不断下降^[24]。与此同时, 当进入夏季高温状态时, 土壤有机物质在矿化和分解过程中会释放大量的有机酸类物质而降低土壤 pH, 小分子物质也能与镉形成难溶的络合物, 这和菊芋的有机质含量同镉浓度总体呈正相关趋势的试验结果相符。本试验发现, 土壤有机质含量越高, 植物镉富集量越大(表 2、表 3), 这与前人^[25] 有关有机质可以通过吸附或螯合作用降低重金属有效性的结论相悖。其原因是有机质中的某些腐殖酸对土壤中镉的活化作用, 即腐殖酸中有一种重要的组分叫富里酸(fulvic acids, FA), 起着传递金属阳离子的作用。FA 从无机矿物释放出金属阳离子并生成水溶性络合物, 从而能够提高金属的有效性和移动性。FA 的络合容量大, 吸持位点丰富, 可以使难溶无机态镉向高活性的可溶有机络合态转化。当土壤溶液 pH 不断下降时, 菊芋根际土壤中有效镉含量增加。碱解氮作为土壤氮的主要来源, 在土壤 Cd^{2+} 增加时, 其含量也随之增多。主要是因为土壤中碱解氮极易分解成硝态氮^[21], 它与植物根系吸收镉的部位相同, 造成与土壤中 Cd^{2+} 的竞争关系, 再加上镉离子的置换作用使土壤水溶态 NH_4^+ 含量增加^[26], 所以镉浓度增加后, 土壤碱解氮含量升高, 因而进一步揭示土壤 pH 与碱解氮的负相关性。除此之外, 土壤微生物也作为植物根系—土壤门户中的一个重要影响因子^[18], 从表 2 可知, 随着镉浓度的增加, 有机质含量增加, 可能是镉离子影响土壤微生物群落生境, 从而导致有机质分解受到抑制, 其机理有待进一步探究。

3.3 镉胁迫下菊芋自身富集镉效果的变化

重金属在植物体内的含量和分布会影响植物对重金属的耐性, 也是植物修复技术的关键。超富集植物对重金属有很强的吸收和转运能力, 可将根系吸收的大部分转运到地上部分^[27]。本试验中, 2 个菊芋品种体内的镉含量均表现为根部 > 茎叶(即地上部分)的分布格局, 虽然根系镉富集系数与镉呈负相关, 且都大于 1, 但转移系数均小于 1(表 2), 说明菊芋根系对重金属镉的转运有阻碍作用, 降低了植物地上部分镉的含量, 从而减轻镉对其地上部分的伤害。镉在茎、叶中的分配因植物种类或品种的不同而存在差别, 杨艳等^[28] 发现, 头花蓼 (*Polygonum capitatum* Buch. -Ham. ex D. Don) 茎内镉的含量低于叶片; 方继宇等^[27] 研究发现, 马缨丹 (*Lantana camara* L.) 地上部的镉主要储存于茎内, 叶片中镉含量较低。本试验中, 潍坊菊芋茎内储存的镉含量高于叶, 徐州菊芋则相反(表 2), 这与镉通过木质部转移过程中的滞留程度相关, 叶片镉含量越高, 光合作用越受抑制, 与叶

片抗氧化酶活性和 MDA 含量等变化相互呼应。潍坊菊芋和徐州菊芋转移镉的目的地不同,可能在于 2 个品种对镉主要转运途径以及控制位点的差别, Cd^{2+} 有共质体和质外体途径 2 种,环境不同,对 2 种途径的影响也不同,表现出耐镉性、镉的富集和转运方向的差异性。除此之外,徐州菊芋较高水平的抗氧化酶活性及体内主要存在较为完善的镉解毒或区域化^[29]机制等使得徐州菊芋表现出较强的耐镉性。

已有研究^[6]表明,苧麻(*Boehmeria nivea* (L.) Hook. f. & Arn.)、豌豆(*Pisum sativum* Linn)与水葫芦(*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)等不同的植物种类或品种对镉吸收存在差异,它们的遗传特异性决定其对重金属元素的吸收量。本试验中,2 个菊芋品种均表现出相对的耐镉性,但徐州菊芋的镉含量、生物富集系数以及转移系数均高于潍坊菊芋,随着镉浓度升高,转移系数降低,显现出镉胁迫的加剧减弱了镉的生物富集效率,而转移系数小于 1 说明菊芋根部是主要的镉富集器官,从根部向地上部运输转移镉的能力较小。表 3 中转移数据较小,但菊芋生物量巨大,具有其他植物无法比拟的优势,以 1.0 mmol/L 镉浓度为标准,徐州菊芋的根、茎、叶中镉含量分别达 364.98,179.15,29.17 mg/kg,体现徐州菊芋较高的转运镉的能力。菊芋还富含丰富的菊糖,可作为生产乙醇、生物发酵及制取油脂的良好来源,作为药用植物,菊芋有利除湿、清热凉血、和中益味的功效,其地上部分也是优良的家畜饲料。因此,应用菊芋修复重金属污染具有较大的潜力与可行性,同时还具备一定的经济效益。

4 结论

(1) 镉胁迫下,2 个品种菊芋 MDA 含量均明显增加($P < 0.05$),出现膜脂过氧化损害,通过增强体内 SOD 和 CAT 等抗氧化酶活性,清除体内自由基的毒害作用表现出抗逆性。T2 胁迫下 7 天,徐州菊芋 SOD 活性增加了 15%,较潍坊菊芋多 1.4%;徐州菊芋的 CAT 活性也从 3 000(U·FW)/min 上升到 4 500(U·FW)/min,说明徐州菊芋较潍坊菊芋而言对镉的抗逆性更占优势。

(2) 土壤理化性质影响着镉从土壤进入植物根系,镉胁迫会抑制根系对镉的富集,通过土壤有机质与镉的螯合作用,使其络合成难溶物质,降低土壤对镉的吸附。同时,随着镉处理浓度的增加,2 个菊芋品种土壤 pH 不断下降,降幅为 1.2%~4.2%,因此土壤中的 H^+ 增多,与碱解氮中的硝化氮产生协同效应,对土壤中 Cd^{2+} 吸附位点形成竞争,增加了有效镉含量,从而调控菊芋对镉的富集。

(3) 2 个菊芋品种体内的镉含量均表现为根部 >

茎叶(即地上部分),说明菊芋根部是主要的镉富集器官。徐州菊芋的镉含量、生物富集系数以及转移系数均高于潍坊菊芋,在 T3 镉浓度时,徐州菊芋的根、茎、叶中镉含量较高,分别为 364.98,179.15,29.17 mg/kg,体现出较高的镉富集能力。

综上所述,徐州菊芋在修复镉污染土壤中具有较大的应用潜力和发展前景。

参考文献:

- [1] Gill S S, Hasanuzzaman M, Nahar K. Importance of nitric oxide in cadmium stress tolerance in crop plants[J]. *Plant Physiology Biochemistry*, 2013, 63: 254-261.
- [2] Jakubowska D, Janicka-Russak M, Kabata K. Modification of plasma membrane NADPH oxidase activity in cucumber seedling roots in response to cadmium stress [J]. *Plant Science*, 2015, 234: 50-59.
- [3] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(2): 750-759.
- [4] 何兴波. 高粱对镉的积累特性及遗传变异分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [5] 刘强, 张婉秋, 周贵宇, 等. 辽河干流坝间耕地土壤重金属污染特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(10): 1545-1553.
- [6] 李希铭, 李金波, 宋桂龙, 等. 35 份草本植物镉吸收与富集特征比较[J]. *草业科学*, 2018, 35(4): 760-770.
- [7] 陈远其, 陈章, 李志贤, 等. 锰污染土壤修复研究现状与展望[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(8): 1451-1456.
- [8] Whankaew S, Machingura M, Rhanor T, et al. Interaction of cyanide uptake by sorghum and wheat with nitrogen supply[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14: 332-347.
- [9] 曹林, 吴玉环, 章艺, 等. 外源水杨酸对铝胁迫下菊芋光合特性及耐铝性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 260-266.
- [10] 高会玲, 刘金隆, 郑青松, 等. 外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1935-1943.
- [11] Yan K, Chen W, He X Y. Responses of photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant system in leaves of *Quercus monglica* to elevated O_3 [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 69: 198-204.
- [12] Zhao S, Lian D. Bioaccumulation of cadmium, copper, zinc, and nickel by weed species from municipal solid waste compost[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 24: 413-417.
- [13] 胡清源, 李力, 石杰, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定烟草中 27 种元素[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(6): 1210-1213.
- [14] 袁波, 傅瓦利, 蓝家程, 等. 菜地土壤铅、镉有效态与生物有

- 效性研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 130-134.
- [15] Bouain N, Shahzad Z, Rouached A, et al. Phosphate and zinc transport and signalling in plants: Toward a better understanding of their homeostasis interaction [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 65 (20): 5725-5741.
- [16] 张祎, 任宗萍, 李鹏, 等. 黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (1): 97-103.
- [17] 董炜华, 李晓强, 宋扬. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用[J]. 土壤, 2016, 48(2): 211-218.
- [18] 吴东明, 任常琦, 李勤奋, 等. 溶解性有机质对铁铝土吸附 2, 4-D 的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38 (3): 1090-1098.
- [19] Chen M, Zhang L L, Li J, et al. Bioaccumulation and tolerance characteristics of a submerged plant (*Ceratophyllum demersum* L.) exposed to toxic metal lead [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122: 313-321.
- [20] 曹林, 马丽, 吴玉环, 等. 菊芋对酸铝复合胁迫的生理响应[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 233-240.
- [21] 张晗芝, 郭庆军, 杨俊兴. 镉胁迫下蓖麻对镉及矿质元素的富集特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 323-328.
- [22] 顾艳, 吴良欢, 胡兆平. 土壤 pH 值和含水量对土壤硝化抑制剂效果的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 132-138.
- [23] 廉梅花, 孙丽娜, 胡筱敏, 等. pH 对不同富集能力植物根际土壤溶液中镉形态的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 130-137.
- [24] Muhammad I, Puschenreiter M, Wenzel W W. Cadmium and Zn availability as affected by pH manipulation and its assessment by soil extraction, DGT and indicator plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 416: 490-500.
- [25] Zeng F R, Ali S, Zhang H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavymetal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 84-91.
- [26] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 生物质炭添加对重金属污染稻田土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 279-284.
- [27] 方继宇, 贾永霞, 张春梅, 马缨丹对镉的生长响应及其富集、转运和亚细胞分布特点研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1677-1682.
- [28] 杨艳, 吴宗萍, 张敏. 头花蓼对重金属 Cd 的吸收特性与累积规律初探[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2094-2099.
- [29] Wang Z H, Shao Y, Li C H, et al. RNA-seq analysis revealed ROS-mediated related genes involved in cadmium detoxification in the razor clam *Sinonovacula constricta* [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2016, 57: 350-360.
- (上接第 286 页)
- [8] 何建斌, 何新林, 王振华, 等. 滴灌哈密大枣耗水规律初步研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 9-12.
- [9] 刘洪波, 张江辉, 白云岗, 等. 滴灌条件下库尔勒香梨耗水特征分析[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(12): 2206-2211.
- [10] 钱翠, 饶碧玉, 罗绍芹, 等. 不同水肥处理对当归种植需水量的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(9): 5613-5617.
- [11] 何建斌, 王振华, 何新林, 等. 极端干旱区不同灌水量对滴灌葡萄生长及产量的影响[J]. 农学学报, 2013, 3 (2): 65-69.
- [12] 张学优. 深层坑渗灌溉施肥制度对成龄葡萄土壤养分和生长特性影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [13] 谢森传, 段新杰. 503DR 中子水分仪的标定[J]. 核农学通报, 1987(6): 14-19.
- [14] 樊引琴, 蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报, 2002, 33(3): 50-54.
- [15] 张国军, 王晓玥, 孙磊, 等. 北京典型冲积平原葡萄耗水规律研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊 1): 51-56.
- [16] 何园球, 沈其荣, 王兴祥, 等. 不同水分和施磷量对旱作水稻耗水量和水分利用率的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 901-907.
- [17] 刘晓宏, 肖洪浪, 赵良菊. 不同水肥条件下春小麦耗水量和水分利用率[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 56-59.
- [18] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 953-959.
- [19] 陈凤, 蔡焕杰, 王健, 等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. 农业工程学报, 2006, 22 (5): 191-193.
- [20] 耿琳, 王甫, 崔宁博, 等. 温室苦瓜耗水规律及作物系数研究[J]. 西北农业学报, 2014, 23(12): 154-160.