

DOI: 10.11686/cyxb2017268

http://cyxb.lzu.edu.cn

亓琳, 杨莹博, 王晓凌, 赵威. 四个燕麦品种对锶耐受性的比较研究. 草业学报, 2017, 26(12): 89-97.

QI Lin, YANG Ying-Bo, WANG Xiao-Ling, ZHAO Wei. Comparative studies on strontium tolerance of four *Avena sativa* varieties. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(12): 89-97.

四个燕麦品种对锶耐受性的比较研究

亓琳^{1*}, 杨莹博², 王晓凌¹, 赵威¹

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023; 2. 兰州大学生命科学学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为探明燕麦对锶的富集能力和耐受机制, 选取了 4 个燕麦品种(本德、白燕 2 号、白燕 7 号和定莜 6 号), 施加不同浓度锶(0、25、100、500 和 1000 mg/kg)处理 30 d, 分析燕麦对锶的富集和分配特征、生长指标、丙二醛(MDA)含量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性。结果显示: 1) 燕麦幼苗的根部和地上生物量都随着土壤中锶浓度的升高呈先增加后降低的趋势; 2) 各器官的富集浓度随着土壤中锶浓度的升高而增加, 并表现为叶>根>茎。转运系数随着土壤中锶浓度的升高而降低, 在 1000 mg/kg 时小于 1, 而在其他锶处理中均大于 1。本德在 25 mg/kg 时的转运系数最高(2.026); 3) 高浓度锶增加了燕麦的 MDA 含量并抑制了 POD 活性, 而 SOD 活性随着锶浓度增加而升高。结果表明, 燕麦的根、茎、叶均能积累锶, 叶片的富集能力最强。4 个燕麦品种具有锶超富集植物的特征。低浓度锶可以诱导燕麦中抗氧化酶活性的增强, 促进其生长; 高浓度锶处理中 SOD 和 CAT 在清除活性氧中发挥重要作用。综合评价, 本德可用于治理锶轻度污染地区, 而定莜 6 号可用于治理锶重度污染地区, 为燕麦用于锶污染地区的植物修复提供理论依据。

关键词:燕麦; 锶; 富集; 抗氧化酶活性

Comparative studies on strontium tolerance of four *Avena sativa* varieties

QI Lin^{1*}, YANG Ying-Bo², WANG Xiao-Ling¹, ZHAO Wei¹

1. Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. School of Life Sciences, Lanzhou University, State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystem, Lanzhou 730000, China

Abstract: Strontium (Sr) is a common fission product of U-235 and Pu-239. Radioactive isotopes are toxic because they are heavy metals and also because of their radioactivity. The fate of radio nuclides in the environment is similar to that of stable elements therefore the behavior of stable Sr-88 in the environment should be regarded as a useful analogue for predicting the long-term fate of Sr-90. Phytoremediation is an emerging alternative technology which utilizes plants to remove metals from the environment. To investigate the ability of oats to accumulate strontium four oat varieties (Bende, Baiyan No. 2, Baiyan No. 7 and Dingyou No. 6) were exposed to five strontium levels (0, 25, 100, 500 and 1000 mg/kg). Plants were cultivated for 30 days. Strontium accumulation and distribution in plants, growth, MDA content, as well as POD, SOD and CAT activity were measured. The results showed that the root and shoot biomass of oat seedlings were increased early and decreased later with increased strontium concentration. Strontium accumulation increased with increased stron-

收稿日期: 2017-06-06; 改回日期: 2017-07-27

基金项目: 河南科技大学青年基金项目(2014QN065), 河南科技大学学科提升振兴 A 计划项目(13660001)和国家自然科学基金(U1304326)资助。

作者简介: 亓琳(1985-), 女, 河南洛阳人, 讲师, 博士。

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qilinchampion@126.com

tium levels; ranked leaf > root > stem. Translocation decreased with increasing strontium concentration. The high strontium treatments increased the MDA content and inhibited POD activity whereas SOD activity increased. The root, stem and leaf of oats could accumulate strontium but most was accumulated in the leaf. All four varieties were able to be classified as hyper accumulators of strontium. Low strontium concentration increased the activities of antioxidant enzymes. Under high strontium concentrations SOD and CAT played an important role in scavenging active oxygen. Oats were able to accumulate and tolerate high concentrations of strontium and could be used for phytoremediation of strontium polluted soils.

Key words: oat (*Avena sativa*); strontium; accumulation; antioxidant enzyme activity

放射性核素锶-90(^{90}Sr)是核工业活动和核电站事故的主要污染物之一,为 ^{235}U 和 ^{239}Pu 的裂变产物^[1]。 ^{90}Sr 的半衰期为28.79年,是一种重要的长寿命、高毒类核素。环境中的 ^{90}Sr 通过大气沉降、降水或灌溉汇入土壤^[2]。由于土壤中 ^{90}Sr 的迁移能力相对较弱,最终土壤中 ^{90}Sr 的浓度要远远高于大气和水体环境^[3]。放射性核素并不易被生物降解,被植物根部吸收后通过食物链进入人体。由于 ^{90}Sr 的化学形态和其同族元素钙十分相似,为一种典型的亲骨性元素,可沉积在含钙的骨组织中并滞留多年,对人体的危害极大^[4]。因此,面临严峻的放射性核素土壤污染形势,开展 ^{90}Sr 污染土壤的修复研究十分必要。放射性核素污染土壤的植物修复是一种经济有效、环境友好的修复方式。Negri等^[5]比较了植物修复 ^3H 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 污染土壤的效果,结果显示富集核素的能力与植物类型有关。谷类作物富集 ^{90}Sr 的浓度相差2~4倍,而大田作物的差别则达到27倍^[6]。理想的修复植物应该具有以下特点:1)耐受有害重金属;2)地上部分富集能力强;3)生长速度快;4)生物量大;5)大根系。在某些情况下,较高的地上生物量可以弥补较低的地上富集浓度^[7]。因此,一些能够富集重金属的作物品种被用于植物修复。水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)和高粱(*Sorghum bicolor*)的地上部分能够富集锶^[8]。反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)地上部分富集 ^{90}Sr 的浓度低于印度芥菜(*Brassica juncea*)和宽叶菜豆(*Phaseolus acutifolius*),但由于反枝苋的生物量较大,其地上部分富集的 ^{90}Sr 总量高于印度芥菜和宽叶菜豆^[9]。

植物体内积累锶之后,往往表现出受害症状。在形态上主要是幼苗和根的生长受到抑制^[10]。叶片失绿,植物的干重下降。生理生化方面则表现为叶绿素的含量大幅度下降,光合作用降低,细胞膜严重受损^[11-13]。植物会在有氧呼吸和光合作用电子传递时产生具有氧化性质的自由基。自由基的存在会使植物中蛋白质和生物大分子变性,导致细胞膜受损,破坏细胞功能^[14]。而对此,植物本身进化出了可以清除自由基的抗氧化酶系统,主要包括超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(oxidase, POD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)。SOD可以将 O_2^- 转化为 H_2O_2 。POD可以将 H_2O_2 分解成 H_2O ,可以把有毒性作用的过氧离子转化为无毒的 H_2O 。而CAT可以直接把 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 ,同时大幅度降低细胞中的自由基,防止细胞受到自由基的损害^[15]。而这种正常的生理循环过程会在锶的作用下受到破坏,导致产生大量的自由基,同时会破坏有些植物本身的抗氧化酶系统。唐永金等^[16-18]研究了13种植物对锶的富集和响应,结果表明锶胁迫使抗氧化酶活性降低了20%~50%,并显著抑制了植物种子萌发,锶抗性和富集能力与植物类型相关。

燕麦(*Avena sativa*),禾本科燕麦属,一年生草本植物,是世界各地广泛种植的粮食作物。由于燕麦富含蛋白质和膳食纤维,被誉为“全球十大健康食物”之一,成为人们关注的营养健康食品。同时,因其环境适应性强、易栽培管理等特性,又是优质饲草作物的首选。燕麦是主要的高寒作物之一,为上等杂粮。集中种植于华北、西北和青藏高原等高寒及半干旱地区^[19]。其生物量大,根系发达,生长速度快,耐盐胁迫等特点有利于对土壤中污染物的吸附。已有研究表明,放射性核素在环境中的行为与其稳定性元素相似。Soudek等^[20]比较了水培条件下向日葵 $^{90}\text{SrCl}_2$ 和 $^{88}\text{SrCl}_2$ 的积累和转运特征,结果发现放射性和稳定性锶在植物体内的富集和分配没有差异。因此,观察稳定性 ^{88}Sr 在环境中的行为,是一个预测模拟其放射性同位素 ^{90}Sr 的方法。本研究选择了4个燕麦品种:本德(Bende)、白燕2号(Baiyan No. 2)、白燕7号(Baiyan No. 7)和定莜6号(Dingyou No. 6)。砂培盆栽试验

比较了 4 个燕麦品种在镉胁迫下富集特征和生理响应,旨在研究燕麦对镉的耐受机理,为核素污染土壤的植物修复研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

燕麦种子购于甘肃省农业科学院。4 个燕麦品种包括本德、白燕 2 号、白燕 7 号和定菽 6 号,均为西北广泛种植的品种。首先挑选粒大而饱满种子,经 0.2% 次氯酸钠表面消毒 20 min,用水浸种 10 min,以去除种子表皮上的病菌,风干,春化。采用砂基培养,砂基用水冲洗干净,洗去砂子表面的泥沙后,基质砂用 3% HCl 溶液浸泡过夜,然后用水冲洗至无 Cl^- 离子,风干备用。

1.2 材料培养及处理

试验于 2016 年 4 月 5 日至 5 月 28 日在甘肃省兰州市榆中校区试验站进行。播 20 颗麦粒,春化,在培养皿中培养发芽,10 d 后移栽到直径 10 cm、高 12 cm 的盆钵中(通气盆),装入 1.5 kg(以干重计)砂基。移苗至盆中后,出苗后定株至 12 株。植物在人工温室中培养,室内条件为:昼夜温度为 25 °C/18 °C,相对湿度(45/60±5)%,光照强度为 150~170 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,1 d 的光照时间为 12 h。

试剂 $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 提供 Sr^{2+} ,分析纯。移苗 3 d 后添加 Sr^{2+} ($^{88}\text{SrCl}_2$),5 个处理水平分别为:0、25、100、500、1000 mg/kg 砂基,0 为对照(CK),随灌溉加入。每个处理 6 次重复。在整个实验期间,培养期间通过称重法添加蒸馏水,以保证必要的水分供应。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 植物生长指标及镉含量 播种后 30 d 采样,每盆取 6 株。植株用蒸馏水冲洗用吸水纸吸干后,将根、茎、叶分成不同的信封作为样本,然后在 105 °C 条件下杀青 30 min,55 °C 条件下烘干至恒重,用分析天平称取其干重。将烘干的植株分为根、茎、叶,取 3 种器官,每种器官称取 2.0 g,在 250 °C 条件下灰化,然后温度逐渐增加至 500 °C 灰化 2 h。灰化的样品 95 °C 条件下在 $\text{HCl}-\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}_2$ 的混合物中消化 1 h(1.0 g 的灰化样品对应 6 mL 的 $\text{HCl}-\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}_2$ 的混合物,体积比为 1:1:1)。采用 ICP/AES 和 MS 的方法测定镉含量^[21],测定地点为中国科学院兰州化学物理研究所。

1) 转运系数(translocation factor,简称为 TLF)为根冠转运系数,即植物的地上镉富集浓度与根部镉富集浓度之比。在富集植物中,TLF 常大于 1,然而,在非富集植物中,TLF 常小于 1^[16]。

$$TLF = \frac{\alpha_{\text{shoot}}}{\alpha_{\text{root}}}$$

式中: α_{shoot} 和 α_{root} 分别为植物的地上部分与根部镉富集浓度。

2) SrCl_2 的去除率(in%) = 整株的金属镉富集含量/金属镉施加量

1.3.2 抗氧化酶活性和脂质过氧化水平的测定 取新鲜植物叶片或者根部,每盆取 6 株。用于 MDA 含量和抗氧化酶活性的测定。脂质过氧化水平(MDA)测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法;超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用光化学氮蓝四唑(NBT)法;过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法;过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外吸收法^[22]。

1.4 数据处理

以镉添加量为固定因素(自变量),对所有参数(因变量)进行单因素方差分析。处理之间的差异显著性在 $P < 0.05$ 概率水平以最小显著性差异(LSD)进行判定。所有统计分析都是用 SPSS 软件(version 13.0;SPSS Institute Chicago,IL,USA)来进行。各图表中的数据均为 6 个重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 镉处理对燕麦幼苗生长的影响

由表 1 所示,4 个燕麦品种的生物量随着镉浓度的升高呈先增加后降低的趋势。燕麦的地上部分和根部对镉的响应一致。根生物量随着土壤中镉浓度的升高呈先增加后降低的趋势,最高值出现在 100 mg/kg 处理($P <$

0.05),在 500 mg/kg 处理时下降,除了定菰 6 号的根生物量在 1000 mg/kg 处理时低于对照($P<0.05$),其他 3 个品种的根生物量在 1000 mg/kg 处理时最低,但与对照相比差异不显著($P>0.05$)。地上生物量则随着土壤中镉浓度的升高,呈先增加后降低的趋势。在 100 mg/kg 处理时达到最高($P<0.05$),在 500 mg/kg 处理时下降,但与对照无显著性差异($P>0.05$),4 个品种的地上生物量在 1000 mg/kg 处理时最低,且与对照相比差异显著($P<0.05$)。

表 1 镉处理对燕麦地上生物量和根生物量的影响

Table 1 Effects of Sr treatment on shoot biomass and root biomass of oats

mg/株 Plant

因素 Factors	品种 Varieties	镉浓度 Sr concentrations				
		0 mg/kg	25 mg/kg	100 mg/kg	500 mg/kg	1000 mg/kg
根生物量 Root biomass	本德 Bende	21.3±1.2Cb	24.2±1.4Ba	24.8±1.5Aa	22.4±2.2Ca	20.7±1.4Ca
	白燕 2 号 Baiyan No. 2	22.2±0.8Ca	23.3±0.9Ba	24.1±1.9Aa	22.8±0.4Ca	20.6±1.0Cb
	白燕 7 号 Baiyan No. 7	22.3±0.5Ca	23.6±1.4Ba	24.6±1.2Aa	22.6±1.1Ba	21.0±0.6Ca
	定菰 6 号 Dingyou No. 6	21.0±3.1BCb	22.7±1.3Bb	24.6±0.9Ab	19.9±1.1Cb	17.6±1.2Db
地上生物量 Shoot biomass	本德 Bende	82.6±3.1Ca	86.4±1.5Bb	97.6±2.5Aa	85.4±1.7BCa	71.2±1.2Da
	白燕 2 号 Baiyan No. 2	77.8±1.1Cb	82.4±2.7Ba	94.2±1.5Aa	81.2±2.4BCb	68.0±2.8Db
	白燕 7 号 Baiyan No. 7	75.6±1.6Cb	80.8±1.5Bb	93.2±1.8Ab	81.0±2.7BCa	69.4±1.4Da
	定菰 6 号 Dingyou No. 6	78.0±2.3Ca	81.6±1.9Bb	92.0±2.4Ab	82.4±1.3BCa	69.2±1.8Da

注:同列不同小写字母表示同一处理的不同品种之间差异显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示同一品种的不同处理之间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Means with different lower letters in the same column are significantly different at the 0.05 level in different varieties of the same treatment; Means with different capital letters in the same row are significantly different at the 0.05 level in different treatments of the same variety, the same below.

2.2 镉处理下 4 个燕麦品种根、茎、叶和地上部分的富集特征

如表 2 所示,燕麦品种在 4 个镉处理下,其镉富集浓度存在显著差异。本试验中,所有燕麦品种的富集浓度都随着处理中镉浓度的升高而增加。在 25 mg/kg 时,燕麦中镉的富集浓度范围为 385~875 mg/kg。在 100 mg/kg 时,燕麦中镉的富集浓度范围为 1076~2801 mg/kg。在 500 mg/kg 时,燕麦中镉的富集浓度范围为 2866~7270 mg/kg。在 1000 mg/kg 时,燕麦中镉的富集浓度范围为 4886~16970 mg/kg。不同的燕麦品种相比,在所有的镉处理中,定菰 6 号的根、茎、叶和地上的富集浓度最高,其次为白燕 7 号,白燕 2 号次之,本德的富集浓度最低。在最高浓度 1000 mg/kg 时,本德的根、叶片和地上的富集浓度最低,约为定菰 6 号的 50%。不同富集部位相比,其富集能力依次排序为:叶片>根>茎。相对于根部,地上的富集浓度在不同的燕麦品种中存在差异。本德在所有处理中,地上富集浓度高于根部富集浓度,白燕 2 号、白燕 7 号和定菰 6 号在 25、100 和 500 mg/kg 处理时的地上富集浓度高于根部,而在 1000 mg/kg 处理时的地上富集浓度低于根部。

2.3 镉处理下 4 个燕麦品种的转运系数

如图 1 所示,本德和白燕 7 号的转运系数随着处理镉浓度的升高而降低。白燕 2 号和定菰 6 号的转运系数随着处理镉浓度的升高呈现先增加后降低的趋势。本德的转运系数范围为 1.656~2.026,白燕 2 号的转运系数范围为 0.865~1.632,白燕 7 号的转运系数范围为 1.013~1.663,定菰 6 号的转运系数范围为 0.939~1.296。本德和白燕 7 号的转运系数始终高于 1。而白燕 2 号和定菰 6 号的转运系数除了最高浓度 1000 mg/kg 时小于 1,其他 3 个镉处理中都大于 1。在本试验中,本德在 25 mg/kg 时的转运系数最高,为 2.026。

2.4 镉处理下 4 个燕麦品种的 SrCl₂ 去除率

如图 2 所示,4 个燕麦品种的 SrCl₂ 去除率随着处理镉浓度的升高而降低。本德和白燕 2 号的 SrCl₂ 去除率随着金属浓度的升高而降低,且不同的处理之间存在显著性差异($P<0.05$)。白燕 7 号和定菰 6 号的 SrCl₂ 去除

率在 25 mg/kg 时最高,100 mg/kg 处理时显著低于 25 mg/kg($P < 0.05$),在 500 和 1000 mg/kg 时最低,而两个处理之间差异不显著($P > 0.05$)。本德的 $SrCl_2$ 去除率范围为 0.04%~0.20%,白燕 2 号的 $SrCl_2$ 去除率范围为 0.05%~0.18%,白燕 7 号的 $SrCl_2$ 去除率范围为 0.06%~0.19%,定菥 6 号的 $SrCl_2$ 去除率范围为 0.09%~0.18%。

表 2 在镉处理下 4 个燕麦品种根、茎、叶和地上部分的富集特征

Table 2 The accumulation characteristics in roots, stems, leaves and shoots of four oat varieties at four Sr treatments

因素 Factors	品种 Varieties	镉浓度 Sr concentrations			
		25 mg/kg	100 mg/kg	500 mg/kg	1000 mg/kg
根中的镉富集浓度 Sr accumulating concentration in roots	本德 Bende	385±22Dd	1372±112Cc	2926±136Bc	4886±234Ad
	白燕 2 号 Baiyan No. 2	523±25Db	1411±175Cb	4069±188Bb	10090±119Ab
	白燕 7 号 Baiyan No. 7	460±24Dc	1153±134Cd	4102±145Bb	9140±167Ac
	定菥 6 号 Dingyou No. 6	600±25Da	1969±154Ca	4238±138Ba	15834±234Aa
茎中的镉富集浓度 Sr accumulating concentration in stems	本德 Bende	570±58Da	1923±136Ca	4086±162Bb	6473±176Ab
	白燕 2 号 Baiyan No. 2	530±69Db	1499±141Cb	3955±125Bc	5431±185Ad
	白燕 7 号 Baiyan No. 7	533±68Db	1076±134Cc	2866±157Bd	5728±178Ac
	定菥 6 号 Dingyou No. 6	501±70Dc	1486±197Cb	4503±124Ba	10860±191Aa
叶片中的镉富集浓度 Sr accumulating concentration in leaves	本德 Bende	875±61Da	2801±88Ca	6192±211Bc	8804±168Ad
	白燕 2 号 Baiyan No. 2	803±75Dc	2734±78Ca	6855±159Bb	10530±184Ac
	白燕 7 号 Baiyan No. 7	853±75Db	1718±122Cb	4987±139Bd	12059±168Ab
	定菥 6 号 Dingyou No. 6	775±94Dc	2621±134Ca	7270±233Ba	16970±135Aa
地上的镉富集浓度 Sr accumulating concentration in shoots	本德 Bende	780±60Da	2586±144Ca	5608±112Bc	8093±256Ad
	白燕 2 号 Baiyan No. 2	697±73Dc	2303±121Cb	5807±161Bb	8729±155Ac
	白燕 7 号 Baiyan No. 7	765±73Db	1547±125Cc	4341±152Bd	10169±147Ab
	定菥 6 号 Dingyou No. 6	690±68Dc	2291±132Cb	6338±147Ba	14872±159Aa

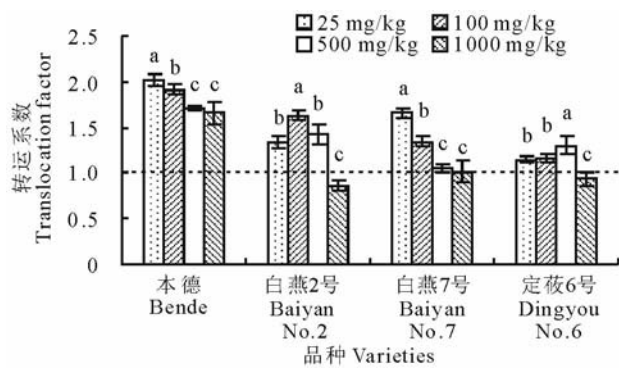


图 1 镉处理下 4 个燕麦品种的转运系数
Fig. 1 Translocation factors of four oat varieties in four Sr treatments

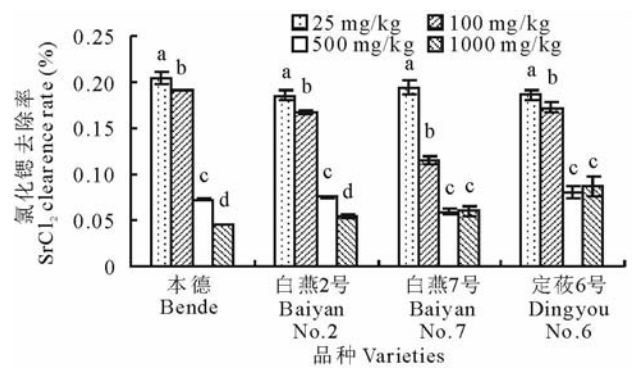


图 2 镉处理下 4 个燕麦品种的氯化镉去除率
Fig. 2 SrCl₂ clearance rate of four oat varieties under Sr treatments

不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。Different letters are significantly different at the 0.05 level. The same below.

2.5 镉处理对 4 个燕麦品种丙二醛含量和抗氧化酶活性的影响

如图 3 所示,在本试验中,4 个燕麦的丙二醛含量都随着处理镉浓度的升高而增加。在最高浓度 1000 mg/kg 时,4 个燕麦品种的丙二醛含量与对照相比平均增加了 50%。本德的丙二醛含量高于其他 3 个品种。根

中的丙二醛含量高于叶片,约为叶片中丙二醛含量的2倍。

如图4所示,抗氧化酶SOD活性随着处理镉浓度的升高而增加。在最高浓度1000 mg/kg时,4个燕麦品种的SOD活性约为对照的2倍。POD活性随着随着处理镉浓度的升高呈现先增加后降低的趋势。在100 mg/kg时,4个燕麦品种的POD活性达到最高,与对照相比约增加了50%。在1000 mg/kg时,POD活性最低,与对照相比约减少了30%。CAT活性在不同的燕麦品种中存在差异。本德和白燕2号的CAT活性随着处理镉浓度的增加而增加,而白燕7号和定莜6号随着处理镉浓度的增加而降低。

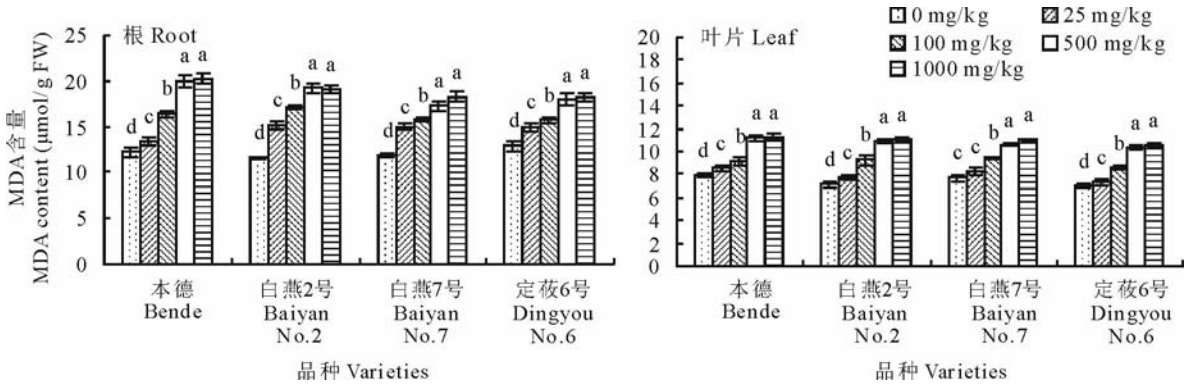


图3 镉处理对4个燕麦品种丙二醛含量的影响

Fig. 3 Effects of Sr treatments on MDA content in four oat varieties

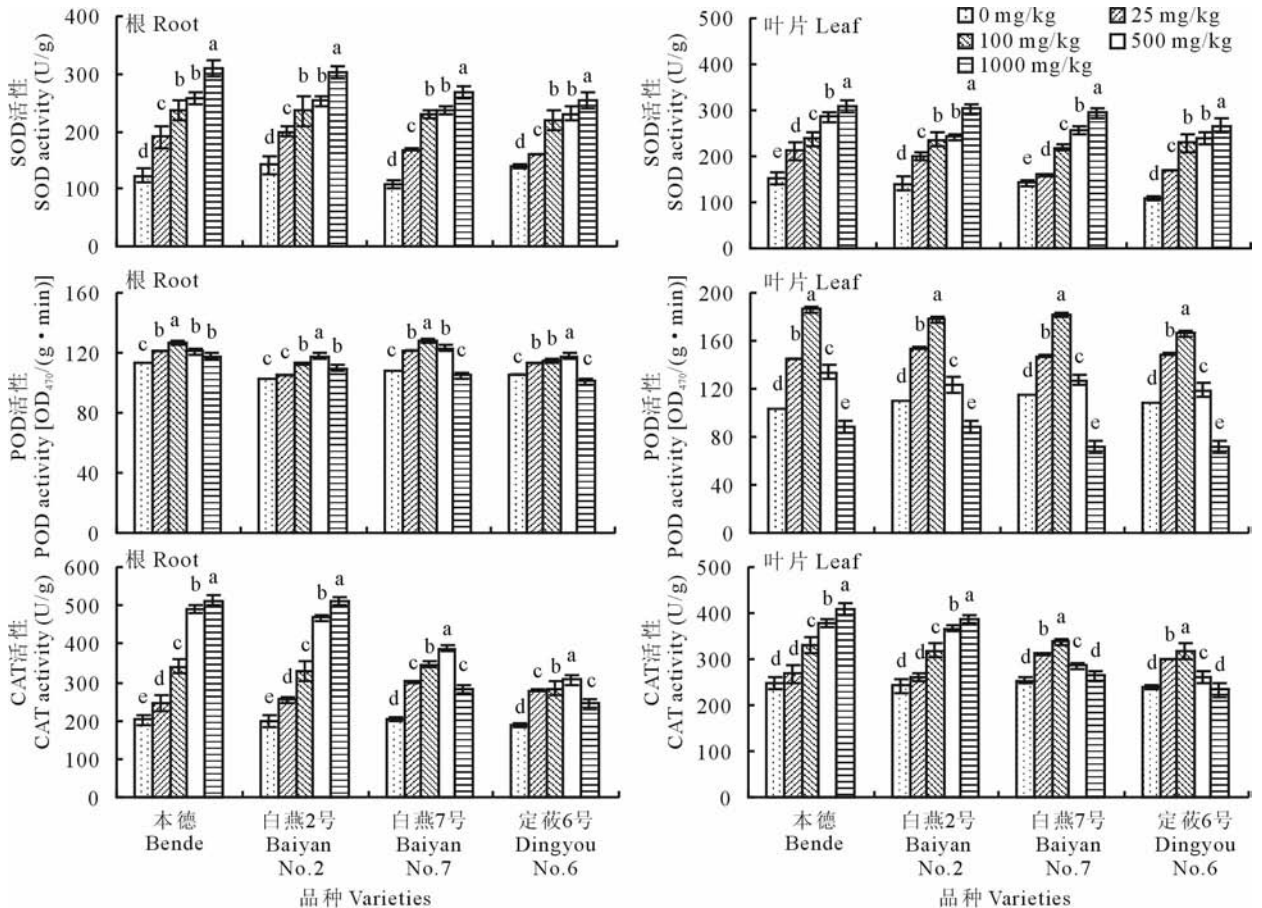


图4 镉处理对4个燕麦品种抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effects of Sr treatments on antioxidant enzyme activities in four oat varieties

3 讨论

3.1 4 个燕麦品种间镉分布及耐受性差异

低浓度镉促进燕麦种子的萌发,根和芽的伸长^[18]。常思宇等^[10]发现高浓度镉对玉米种子的萌发,幼苗的根长和株高有强烈的抑制作用。本研究中,镉显著影响了燕麦幼苗的生长,燕麦幼苗的地上和根生物量都随着处理中镉浓度的升高先增加后降低。这一现象的原因可能是镉通过根部吸收进入到植物体内,通过区域化分布贮存于叶绿体,损伤了植物的光合作用^[11]。高浓度镉使植物根尖细胞有丝分裂受阻,促进 DNA 链的断裂,出现异常染色体片段^[12]。在本试验中,4 种燕麦品种的地上生物量和根生物量在 100 mg/kg 处理时显著增加,而在 500 mg/kg 处理时下降,1000 mg/kg 处理与对照相比约减少了 10%。这一结果表明燕麦能够耐受镉胁迫,500 mg/kg 为燕麦耐受镉胁迫的阈值,在 1000 mg/kg 镉处理时受到显著抑制。本德燕麦的生物量在所有处理中都显著高于其他 3 个品种,表明本德燕麦在镉胁迫时能够产生较高的生物量。

植物富集的金属含量与植物种类及吸收部位有关。镉在水稻、玉米和高粱等多种作物内的富集部位主要在植物茎、叶等地上部分^[23]。本试验中 4 种燕麦不同器官富集镉的能力依次为叶片>根>茎。在低浓度镉处理(25 和 100 mg/kg)中,本德的富集能力较强,叶片和地上富集浓度都高于其他 3 个品种。定菽 6 号在高浓度镉处理(500 和 1000 mg/kg)中的富集能力最强,根、茎、叶和地上部分的镉富集浓度都高于其他 3 个品种,这一结果说明定菽 6 号在高浓度下的富集能力较强。

3.2 4 个燕麦品种间耐受镉胁迫的生理响应

细胞膜是第一个受到重金属伤害的区域,细胞膜结构的不稳定性主要是由于膜脂质的氧化^[24]。脂质过氧化会产生超氧负离子,组织中的 MDA 含量用于衡量脂质过氧化水平。在本研究中,4 个燕麦的 MDA 含量都随着处理镉浓度的升高而增加。在最高浓度 1000 mg/kg 时,4 个燕麦品种的 MDA 含量与对照相比平均增加了 50%。燕麦幼苗虽然未出现叶片失绿、萎蔫等症状,而高浓度镉导致活性氧的累积,造成氧化损伤,从而加剧了脂质过氧化程度。

SOD 活性随着处理镉浓度的升高而增加。在最高浓度 1000 mg/kg 时,4 个燕麦品种的 SOD 活性约为对照的 2 倍。根部和叶片中的 SOD 活性随着镉处理浓度的增加而增加。SOD 活性的增加可能是由于 ROS 水平的提高而引起的适应性反应。暴露在高浓度镉处理中,叶片和根部的 POD 活性都显著下降。POD 活性显著减少的原因可能是由于其合成受到抑制或 H₂O₂ 引起的失活^[25]。CAT 活性增加体现出 H₂O₂ 水平的提高,CAT 是一个强有力的清除 H₂O₂ 的抗氧化酶。在本实验中,CAT 活性在所有镉处理中都高于对照,并且随着处理中镉浓度的增加而增加。在镉胁迫中 POD 活性的不足可以由增加的 CAT 活性抵消,以清除镉胁迫产生的 H₂O₂。SOD 和 CAT 可能在高浓度镉胁迫时清除过氧化产物发挥关键作用。

3.3 4 个燕麦品种间的镉富集能力

植物地上部分积累重金属达到某个临界值即可认定为超富集植物。目前对超富集植物的界定主要依据 Baker 和 Brooks 所提出的参考值:镉(Cd)达到 100 mg/kg,钴(Co)、铜(Cu)、镍(Ni)和铅(Pd)达到 1000 mg/kg,锰(Mn)和锌(Zn)达到 10000 mg/kg^[26]。超富集植物庭荠(*Alyssum bertolonii*)叶片富集镍(Ni)达到 7900 mg/kg^[27]。本研究中,100、500 和 1000 mg/kg 镉处理时,燕麦的地上镉富集浓度范围分别为 1076~2801 mg/kg、2866~7270 mg/kg 和 4886~16970 mg/kg。至今还未有镉超富集植物的界定,但燕麦已表现出很强的镉富集能力。

根冠转运系数(TLF)表示植物由根部向地上转移金属的能力,是评价植物富集金属能力的重要因素。超富集植物的 TLF 大于 1^[16]。3 种矿区超富集植物巨枝大戟(*Euphorbia macroclada*)、毛蕊花(*Verbascum cheiranthifolium*)和黄芪(*Astragalus gummifer*)的 TLF 分别为 2.08、1.47 和 1.18^[28]。在本研究中,本德、白燕 2 号、白燕 7 号和定菽 6 号的 TLF 范围分别为 1.656~2.026、0.865~1.632、1.013~1.663 和 0.939~1.296。本德和白燕 7 号的 TLF 始终高于 1。而白燕 2 号和定菽 6 号的 TLF 除在最高浓度 1000 mg/kg 时小于 1,其他镉处理中都大于 1。本德在 25 mg/kg 时的 TLF 最高,为 2.026。燕麦可以作为潜在的品种用于修复镉污染地区的土

壤,其中本德转移铯至地上部分的能力最强。随核素浓度的增加,燕麦的 TLF 呈下降趋势。这一现象的原因一方面由于植物根系的铯浓度逐渐饱和,而铯载体的数量有限,因此导致吸收能力下降^[29];另一方面重金属在植物体内逐渐积累,植物在铯胁迫下通过回避机制减少铯富集,同时增强了植物对铯的耐受性^[30]。4个燕麦品种 SrCl₂ 去除率随铯浓度的增加而降低,而白燕7号和定菰6号在500和1000 mg/kg处理时的 SrCl₂ 去除率虽然是最低值,但两个处理之间无显著性差异。白燕7号和定菰6号在高浓度铯处理(1000 mg/kg)时整株的 SrCl₂ 去除率没有显著下降,这一结果说明白燕7号和定菰6号可以在铯重污染地区中维持较强的铯富集能力。

4 结论

在本研究中,低浓度铯促进燕麦的生长,提高抗氧化酶活性,阈值为500 mg/kg铯处理。高浓度铯抑制燕麦的生长发育,SOD和CAT可能在燕麦耐受铯胁迫中起到关键作用。燕麦叶片富集铯的能力最强。本德的转运系数在所有铯处理中都大于1,具备铯超富集植物的特征。定菰6号在高浓度铯时富集能力较强,可用于修复铯重污染地区。

参考文献 References:

- [1] Vajda N, Kim C K. Determination of radiostromtium isotopes: a review of analytical methodology. *Applied Radiation and Isotopes*, 2010, 68(12): 2306-2326.
- [2] Wang X, Chen C, Wang J. Phytoremediation of strontium contaminated soil by *Sorghum bicolor* L. moench and soil microbial community-level physiological profiles (CLPPs). *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(8): 1-11.
- [3] Xu H, Jin Y R, Li W P. Specific activity and distribution of ⁹⁰Sr in desert plants from a contaminated site. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2011, 33(1): 18-24.
徐辉,金玉仁,李伟平,等.放射性污染区内沙漠植物中⁹⁰Sr的含量及分布.核化学与放射化学,2011,33(1):18-24.
- [4] Tsukada H, Hasegawa H, Hisamatsu S, *et al.* Rice uptake and distributions of radioactive ¹³⁷Cs, stable ¹³³Cs and K from soil. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 2002, 117(3): 403-409.
- [5] Negri M C, Hinchman R R. The use of plants for the treatment of radionuclides//*Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment*. New York: Wiley-Interscience, 2000.
- [6] Prasad M, Freitas H. Metal hyperaccumulation in plants-biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2003, 6(3): 285-321.
- [7] Al Attar L, Al-Oudat M, Safia B, *et al.* Transfer factor of Sr-90 and Cs-137 to lettuce and winter wheat at different growth stage applications. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, 150: 104-110.
- [8] Fuhrmann M, Lasat M M, Ebbs S D, *et al.* Uptake of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three plant species application to phytoremediation. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(3): 904-909.
- [9] Zhang X X, Wang D, Li W F, *et al.* Studies on accumulation of ¹³³Cs and ⁸⁸Sr in *Vicia faba* Linn and irradiation damage effect. *Journal of Radioactivity Research and Radioactivity Process*, 2010, 28(1): 48-52.
张晓雪,王丹,李卫锋,等.¹³³Cs和⁸⁸Sr在蚕豆苗中的蓄积及其辐射损伤效应.辐射研究与辐射工艺学报,2010,28(1):48-52.
- [10] Chang S Y, Wang J Y, Wang J Y. Effects of strontium stress on the growth and physiological and biochemical characteristics of corn seedling. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(1): 32-34.
常思宇,王建英,王晶妍.铯胁迫对玉米幼苗生长及生理生化响应的研究.湖北农业科学,2017,56(1):32-34.
- [11] Zhu J, Liu J Q, Yang Y, *et al.* Effects of Sr stress on photosynthetic physiology of *Salix babylonica*. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(10): 32-35.
朱靖,刘建芹,杨叶,等.铯胁迫对垂柳光合生理的影响.环境科学与技术,2015,38(10):32-35.
- [12] Jiang X Y, Liu S J, He Y X, *et al.* Spinach and Chinese cabbage on the uptake and accumulation of strontium. *Carcino Genesis, Terato Genesis & Muta Genesis*, 2015, 27(6): 463-466.
姜晓燕,刘淑娟,何映雪,等.菠菜和小白菜对核素铯的吸附与富集作用.癌变·畸变·突变,2015,27(6):463-466.
- [13] Giannopolitis C N, Ries S. Superoxide dismutases. *Plant Physiology*, 1977, 59(2): 309-314.
- [14] Milonea M T, Sgherria C, Clijstersb H, *et al.* Antioxidative responses of wheat treated with realistic concentration of cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50(3): 265-276.
- [15] Li M, Xie X T, Liu Z L. Strontium stress of physiological and biochemical on *Platymonas subcordiformis*. *Acta Universitatis Medicinalis Nanjing (Natural Science)*, 2004, 24(5): 459-463.

- 李梅, 谢玺韬, 刘志礼. 镉胁迫下亚心形扁藻生理生化的研究. 南京医科大学学报(自然科学版), 2004, 24(5): 459-463.
- [16] Tang Y J, Luo X G, Zeng F, *et al.* The responses of plants to high concentrations of strontium, cesium stress and the screening of remediation plants. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 960-965.
唐永金, 罗学刚, 曾峰, 等. 不同植物对高浓度 Sr、Cs 胁迫的响应与修复植物筛选. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 960-965.
- [17] Tang Y J, Luo X G, Jiang S J, *et al.* Influence of three nuclides upon seed and bud mortality of plants. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(4): 495-500.
唐永金, 罗学刚, 江世杰, 等. 三种核素对植物烂种烂芽的影响. 核农学报, 2013, 27(4): 495-500.
- [18] Tang Y J, Luo X G, Jiang S J, *et al.* The responses of plants to high concentrations of strontium, cesium stress and the screening of remediation plants. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 1-4.
唐永金, 罗学刚, 江世杰, 等. 镉、铯、铀对 5 种植物种子发芽的影响. 种子, 2013, 32(4): 1-4.
- [19] Liu H, Mu P, Zhao G Q, *et al.* The impact of herbicides on production and antioxidant properties of oats. *Acta Praraculturae Sinica*, 2015, 24(2): 41-48.
刘欢, 慕平, 赵桂琴, 等. 除草剂对燕麦产量及抗氧化特性的影响. 草业学报, 2015, 24(2): 41-48.
- [20] Soudek P, Valenová S, Vavříková Z, *et al.* ^{137}Cs and ^{90}Sr uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, 88(3): 236-250.
- [21] Liu Z L, Li J, Yang Y Q, *et al.* Research and application of microwave assisted digestion procedure for the determination of 23 elements in sediments by ICP-AES/ICP-MS. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(12): 2370-2377.
刘珠丽, 李洁, 杨永强, 等. 微波消解-ICP-AES/ICP-MS 测定沉积物中 23 种元素的方法研究及应用. 环境化学, 2013, 32(12): 2370-2377.
- [22] Wu F B, Zhang G P. Genotypic differences in effect of Cd on growth and mineral concentrations in barley seedling. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, 69(2): 219-227.
- [23] Sasmaza A, Sasmaz M. The phytoremediation potential for strontium of indigenous plants growing in a mining area. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(1): 139-144.
- [24] Ibeanusi V M, Grab D A, Jensen L, *et al.* Radionuclide Biological Remediation Resource Guide. US Environmental Protection Agency, Region 5, Superfund Division, 2004.
- [25] Farooq M A, Ali S, Hameed A, *et al.* Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 96(4): 242-249.
- [26] Dixit V, Pandey V, Shyam R. Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad). *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52: 1101-1109.
- [27] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metal elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1989, 1: 81-126.
- [28] Brooks R R, Lee J, Jaffre T. Some New Zealand and New Caledonian plant accumulators of nickel. *The Journal of Ecology*, 1974, 62(2): 493-499.
- [29] Evseeva T I, Geras'kin S A, Shuktomova I I. Genotoxicity and toxicity assay of water sampled from a radium production industry storage cell territory by means of *Allium* test. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, 68(3): 235-248.
- [30] Shen Z P, Duo L A, Zhao S L. Effects of air dried sewage sludge leachate after remediation on initial growth and heavy metal accumulation of *Lolium perenne*. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 937-943.
沈志平, 多立安, 赵树兰. 风干污泥修复后淋洗液对黑麦草初期生长与重金属富集的影响. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 937-943.