

螯合剂对铀镉污染土壤中蚕豆幼苗生理特性影响

钟钊芝¹, 王 丹^{1,2*}, 徐长合¹, 谢新闻¹, 张玉琳¹

(1.西南科技大学生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2.核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要:通过盆栽试验研究了在不同浓度 EDTA、柠檬酸、草酸 3 种螯合剂作用下不同浓度铀镉复合污染(分别用 W1、W2 表示)对土壤中蚕豆(*Vicia faba* L.)幼苗体内叶绿素、丙二醛和细胞质膜透性的影响。结果表明,在所设的两个土壤污染浓度下,较高土壤污染浓度(W2)中植物受损伤程度高于较低土壤污染浓度(W1)中的植物受损伤程度,由此得出较高土壤污染浓度可能更有利于蚕豆对铀镉的吸收;蚕豆的整个生长过程中,对于叶绿素而言,在污染土壤中添加 5 mg·kg⁻¹ 的草酸,对其含量影响最大,可能有利于促进蚕豆对土壤中铀和镉的吸收,添加 2.5 mg·kg⁻¹ 的柠檬酸次之;对于丙二醛,向污染土壤中添加 10 mg·kg⁻¹ 的草酸,对其含量影响最大,可能有利于蚕豆对土壤中铀和镉的吸收,添加 2.5 mg·kg⁻¹ 的柠檬酸次之;在细胞质膜透性上,向土壤中添加 5 mg·kg⁻¹ 草酸,对其含量影响最大,可能更有利于促进蚕豆吸收土壤中的铀和镉,而添加 5 mg·kg⁻¹ 的柠檬酸次之。而 EDTA 在整个试验中都表现出了对植物较大的生物毒性。

关键词:蚕豆;铀;镉;生理特征;螯合剂

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)04-0639-06

The Physiological Characteristics of *Vicia faba* Linn. to Extract Uranium Cadmium Under Chelate Treatment

ZHONG Mu-zhi¹, WANG Dan^{1,2*}, XU Chang-he¹, XIE Xin-wen¹, ZHANG Yu-lin¹

(1.College of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2.Defense Key Discipline Laboratory of the Nuclear Waste and Environmental Security, Mianyang 621010, China)

Abstract: A pot experiment was studied by the effect of the chlorophyll, cell membrane permeability and malondialdehyde of the broad bean (*Vicia faba* Linn.) seedlings extraction of uranium cadmium pollution(set two concentrations of W1, W2 indicated) under the treatment with the EDTA, citric acid, oxalic acid. The results showed that the overall growth in the broad bean, the high concentration of contaminated soil(W2) was more conducive to uptake the pollutants of uranium and cadmium than the lower the concentration of contaminated soil(W1) to the bean; When added the 5 mg·kg⁻¹ of the oxalic acid to the soil, the influence of the chlorophyll in plants was the greatest, the concentration might be more conducive to absorb the uranium and cadmium of the contaminated soil to the beans, followed by 2.5 mg·kg⁻¹ of the citric acid; When added the 10 mg·kg⁻¹ of the oxalic acid to the soil, the influence of the malondialdehyde in plants was the greatest, the concentration may be more conducive to absorb the uranium and cadmium of the contaminated soil to the beans, followed by 2.5 mg·kg⁻¹ of the citric acid; When added the 5 mg·kg⁻¹ of the oxalic acid to the soil, the influence of the cell membrane permeability in plants was the greatest, the concentration might be more conducive to absorb the uranium and cadmium of the contaminated soil to the beans, followed by 5 mg·kg⁻¹ of the citric acid; In the whole experiment, EDTA had shown greater toxicity to plants.

Keywords: *Vicia faba* Linn.; U; Cd; physiological characteristics; chelate

近年来,核技术的开发利用给人类带来了巨大的经济效益和社会效益,但同时也产生了大量的放射性

废物^[1]。这些放射性废物不仅可以污染土壤和水体,还可以通过生物的吸收从土壤向生物内富集,并通过食物链向动物和人体内转移,人食入含放射性核素的生物组织后,核素将残留在人体内,并通过内照射对人体产生一定的辐射效应,严重威胁人类的健康,由此带来的放射性核素对环境与生物的影响引起了人们日益的关注^[2-3]。

收稿日期:2010-09-28

基金项目:西南科技大学重点资助项目(07XJGZB05);西南科技大学青年基金资助项目(08zx315208zx3152)

作者简介:钟钊芝(1985—),女,四川遂宁人,在读硕士,主要从事低放核素的植物修复。E-mail:zhongmuzhi2006@126.com

* 通讯作者:王 丹 E-mail:wangdan@swust.edu.cn

目前,处理放射性核素和重金属污染土壤主要有物理方法、化学方法和植物修复法^[4]。广义的植物修复技术包括利用植物修复重金属污染的土壤、利用植物净化空气、利用植物清除放射性核素和利用植物及其根系微生物共存体系净化土壤中的有机物 4 个方面。而狭义的植物修复就是筛选和培育特种植物,特别是对目标污染物具有超常规吸收和富集能力的植物,种植在污染的土壤上,利用植物根系吸收水分和养分的过程来吸收土壤中的污染物,再将收获的植物统一处理,以期达到清除污染的目的^[5]。

根据作用机理植物修复技术可分为植物提取、植物转化、植物挥发、植物固定和根际过滤,对于修复铀污染环境而言,具有现实意义的植物修复类型主要是植物提取、根际过滤和植物固定。成功的植物提取技术既依赖于对能吸收铀并使铀朝地上部分迁移的植物物种的识别,还依赖于农艺学和改良策略的发展以促进植物生长和提供土壤中铀的生物有效性。大量研究显示,向土壤中添加某些种类的螯合剂能够大幅度提高铀的植物有效性,增加铀从污染土壤向植物嫩枝的迁移量,从而强化植物提取,这实际上是一种诱导植物提取过程^[6]。Shahandeh 的研究表明,向土壤中施入柠檬酸和草酸显著增加了铀向植物嫩枝中的迁移和积累量^[7]。Chang 施用柠檬酸以提高 4 种作物累积铀的能力,结果表明供试植物的各组织转移铀的能力为根大于枝,枝又与叶相当^[8]。

有关铀和镉复合污染土壤对植物的生长发育、代谢等影响的报道甚少。现以蚕豆为试验材料,研究在不同螯合剂辅助作用下对蚕豆提取铀镉的生理特性的影响,为铀镉污染的植物修复奠定一定的基础。

1 材料方法

1.1 试验材料

本试验采用盆栽的方式进行。供试植物为成胡 15,购于绵阳市平政二桥蔬菜种子市场。供试螯合剂为分析纯 EDTA、柠檬酸、草酸,均购于绵阳市迅捷公司。

1.2 试验方法

1.2.1 蚕豆苗的培育

选择大小均匀一致无病虫害的蚕豆种子,在露地育苗 30 d,肥水管理一致,然后选择大小均匀一致的蚕豆苗备用。

1.2.2 试验土壤的性质

本试验所用的土壤为菜园土,采自园林中心,土壤类型为黄壤土。土壤的 pH 值为 7.153(水:土=5:1),

土壤有机质含量为 1.23%,土壤有效氮、磷、钾分别为 95、60、82 mg·kg⁻¹。

1.2.3 试验设计

试验所使用花盆直径为 33 cm,高 26 cm,每盆装土 8.5 kg。选择育好的蚕豆苗,定植于施有不同浓度铀镉的土壤中,其中铀以醋酸双氧铀[UO₂(CH₃CO₂)₂·2H₂O]为铀源,镉以 Cd(NO₃)₂·4H₂O 为镉源,所用药品均为分析纯^[9]。铀镉的两个处理浓度见表 1。

表 1 铀镉的两个处理浓度

Table 1 The two treatment concentrations of uranium cadmium

编号 Number	每千克施用量 Fertilizer amount/mg·kg ⁻¹	每盆实际施用量 Practical fertilizer amount in pot/×8.5 mg
W1	5U+10Cd	42.5U+85Cd
W2	10U+15Cd	85U+127.5Cd

试验中所用螯合剂 EDTA、柠檬酸、草酸均为分析纯,分别用 A1、A2、A3 表示。各螯合剂均设 4 个添加水平:2.5、5、10、20 mg·kg⁻¹,分别用 B1、B2、B3、B4 表示,以不施螯合剂为对照,用 CK 表示。

各处理均设 3 个重复,每个重复为 1 盆,每盆 3 株。处理 1 d 后,将不同螯合剂的不同浓度以水溶液的形式加入各花盆中。

1.2.4 试验材料的选取

待铀镉处理 7 d 和 21 d 后,取蚕豆形态学上端向形态学下端数第三片叶,测定蚕豆的生理指标。

1.3 分析方法

叶绿素总含量(mg·g⁻¹ FW)采用乙醇丙酮浸泡提取法测定^[10],测定仪器为 T6 系列紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司);细胞膜透性采用电导仪法^[11],测定仪器为台式电导仪 CyberScan Con510(美国 Eutech);蚕豆幼苗丙二醛(MDA)含量(μmol·g⁻¹ FW)采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定^[12],测定仪器为 T6 系列紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)。试验结果为 3 次重复的平均值。采用 Microsoft Excel 2003 (美国,Microsoft)和 DPS3.01 软件进行数据统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同螯合剂处理在不同时间内对蚕豆生长状况的影响

在未施用螯合剂以前,蚕豆在不同土壤污染浓度下均能正常的生长。但是在施用不同螯合剂 7 d 以后,肉眼明显可见,在 A1、A2 和 A3 的 B3 和 B4 浓度处

理下,蚕豆幼苗开始出现失绿、萎蔫、坏死斑点。直至21 d时,在这些处理中,蚕豆幼苗均出现死亡现象;且在A1处理中,除了对照以外,其他浓度的植株均全部死亡,表现出严重的生物毒性。

2.2 不同整合剂对铊镉复合污染土壤上蚕豆幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的重要物质,其含量的多少直接标志着植物生长能力的强弱^[3]。在逆境条件下,叶绿素的破坏与降解最终会使光合效率降低。

由图1可知,第7 d时,在加入了不同整合剂的不同污染浓度的土壤中,在W1这个土壤污染浓度下,A1和A3在B1浓度时,叶绿素含量达到最低值,而A2则在B2浓度达最低值,最低值分别为1.528、1.925、1.444 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比对照分别减少20.62%、1.38%和26.02%。在W2这个土壤污染浓度下,A1、A2、A3均在B1浓度达到最低值,分别为1.389、1.586、1.241 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别比对照减少18.53%、6.98%、27.21%。对叶绿素含量做三因素方差分析结果表明,土壤的污染浓度、整合剂的种类和浓度均对蚕豆幼苗的叶绿素含量有极显著的影响,其含量表现为:W1>W2,A2>A1>A3,B4>B3>B2>B1。在第21 d时,对于蚕豆的生长状况来说,在不同整合剂处理下,随着整合剂浓度的增加,蚕豆苗植株均出现不同程度的死亡,以A1处理较为严重,除CK以外,其他浓度的幼苗均完全死亡,死亡率较对照达到100%;土壤污染浓度为W1时,在A1和A2处理下,当整合剂浓度达到B4时,蚕豆幼苗全部死亡;在W2这个污染浓度下,当A2浓度达到B3时,蚕豆幼苗出现死亡,死亡率较对照达到100%,而此时A3处理下的蚕豆幼苗未出现死亡现象。对于叶绿素含量来说,与对照相比,增减趋势不明显,在W1这个土壤污染浓度下,A2和A3处理的最低值均

出现在B3浓度,分别为1.296 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和1.339 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比对照分别减少28%和25.61%;在W2这个处理中,A2和A3的最低值分别出现在B1和B2浓度时,最低值分别为1.646 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和1.685 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别比对照减少11.60%和9.51%。综上所述,蚕豆生长7 d时,在所设的两个土壤污染浓度下,添加2.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的草酸,叶绿素含量达到最低值;而生长21 d时,在低污染土壤浓度(W1)下,添加10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的柠檬酸,叶绿素含量达到最低值,在高污染土壤浓度(W2)下,添加2.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的柠檬酸,叶绿素达到最低值。

2.3 不同整合剂对铊镉复合污染土壤上蚕豆幼苗丙二醛含量的影响

丙二醛是膜脂质过氧化作用的产物,是表达植物膜系统受伤害程度的重要指标之一。

从图2可知,第7 d时,在两个土壤污染浓度下,丙二醛含量随着整合剂浓度的增加呈现上升趋势,由此可见,在B1、B2两种整合剂浓度下,丙二醛含量的增加趋势都表现得较为稳定,而在B3、B4两个浓度下,则出现较大幅度的增加。在W1这个土壤污染浓度下,添加了A1、A2和A3的蚕豆幼苗丙二醛含量均在B4浓度达最大值,分别为0.464、0.519、0.774 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,分别比对照增加182.19%、215.67%、370.18%。在W2处理中,A1在B3浓度时丙二醛含量达最大值,而A2和A3则在B4浓度达最大值,分别为1.247、0.639、1.307 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,分别比对照增加570.05%、243.35%、602.39%。对丙二醛含量做三因素方差分析结果表明,土壤的污染浓度、整合剂的种类和浓度均对蚕豆幼苗的丙二醛含量有极显著的影响,其含量表现为:W2>W1,A3>A1>A2,B4>B3>B2>B1。而在第21 d时,对于蚕豆的生长状况来说,在不同整合剂处理下,随着整合剂浓度的增加,蚕豆苗植株均

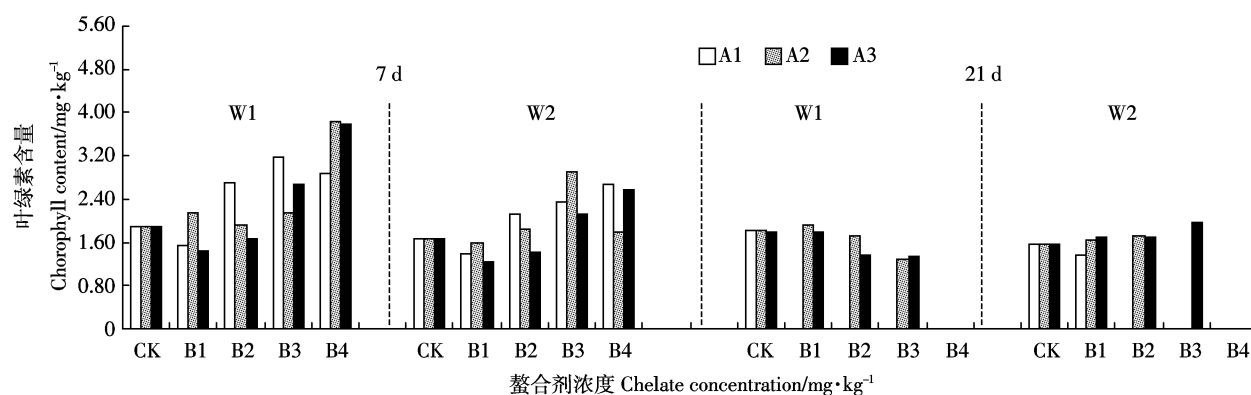


图1 处理7 d和21 d后蚕豆叶绿素含量

Figure 1 Chlorophyll content in *Vicia* seedling after 7 days and 21 days

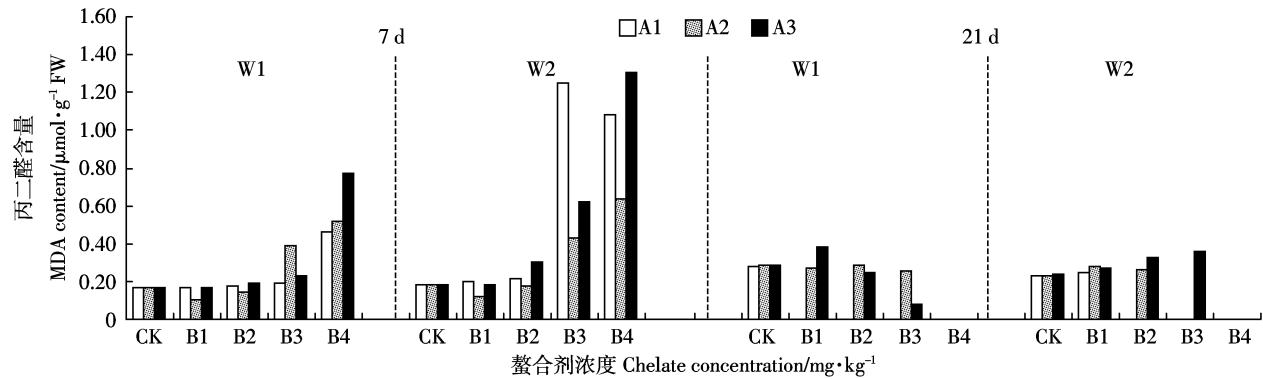


图 2 处理 7 d 和 21 d 后蚕豆幼苗丙二醛含量

Figure 2 MDA content in *vicia* seedling after 7 days and 21 days

出现不同程度的死亡, 尤其以 A1 处理较为严重, 除 CK 以外, 其他浓度的幼苗均完全死亡, 死亡率较对照达到 100%; 而土壤污染浓度为 W1 时, 在 A1 和 A2 处理下, 当螯合剂浓度达到 B4 时, 蚕豆幼苗全部死亡; 在 W2 这个污染浓度下, 当 A2 浓度达到 B3 时, 蚕豆幼苗出现死亡, 死亡率较对照达到 100%, 而此时 A3 处理下的蚕豆幼苗未出现死亡现象。但对于丙二醛含量来说, 较对照相比, 增减趋势不明显, 在 W1 这个污染浓度下, A2 的最高值出现在 B3 浓度时, A3 的最高值出现在 B1 浓度时, 最高值分别为 $0.290 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.379 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别比对照增加 3.57% 和 35.36%; 而在 W2 这个污染浓度下, A2 最高值出现在 B1 浓度时, A3 最高值出现在 B3 浓度时, 最高值分别为 $0.281 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.355 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别比对照增加 16.37% 和 51.06%。综上所述, 蚕豆生长 7 d 时, 在所设的两个土壤污染浓度下, 添加 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的草酸, 丙二醛含量达到最大值; 而生长 21 d 时, 在低污染土壤浓度 (W1) 下, 添加 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的草酸, 丙二醛含量达到最大值, 在高污染土壤浓度 (W2) 下, 添加 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的

草酸, 丙二醛达到最大值。

2.4 不同螯合剂对铈镉复合污染土壤上蚕豆幼苗质膜透性的影响

植物在逆境胁迫或衰老过程中, 细胞原生质膜中的不饱和脂肪酸发生过氧化作用, 使质膜系统受到伤害, 其选择透性降低, 细胞内电解质外渗量增加, 因而细胞质膜透性可表示膜伤害程度^[13]。

从图 3 可知, 第 7 d 时, 在两个土壤污染浓度下, 蚕豆幼苗质膜透性总体上均呈现出随螯合剂浓度的增加而增大。在 W1 这个土壤污染浓度下, 添加了 A1、A2 和 A3 的蚕豆幼苗质膜透性均在 B4 浓度达到最大值, 分别为 48.03%、47.41%、55.80%, 分别比对照增加 175.35%、171.79%、219.89%。在 W2 这个土壤污染浓度下, 添加了 A1、A2 和 A3 的蚕豆幼苗质膜透性也在 B4 浓度达到最大值, 分别为 75.30%、78.72%、77.33%, 分别比对照增加 185.80%、198.79%、193.52%。对质膜透性做三因素方差分析结果表明, 土壤的污染浓度、螯合剂的种类和浓度均对蚕豆幼苗的质膜透性有极显著的影响, 其质膜透性表现为: $W2 > W1, A1 >$

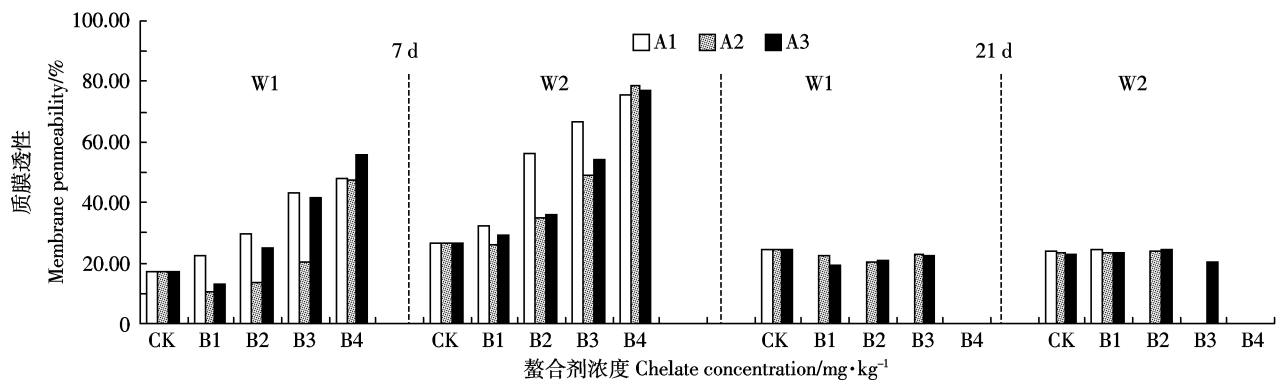


图 3 处理 7 d 和 21 d 后蚕豆质膜透性

Figure 3 Membrane permeability in *Vicia* seedlings after 7 days and 21 days

A3>A2, B4>B3>B2>B1。在第21 d时,对于蚕豆的生长状况来说,在不同螯合剂处理下,随着螯合剂浓度的增加,蚕豆苗植株均出现不同程度的死亡,尤其以A1处理较为严重,除CK以外,其他浓度的幼苗均完全死亡,死亡率较对照达到100%;而土壤污染浓度为W1时,在A1和A2处理下,当螯合剂浓度达到B4时,蚕豆幼苗全部死亡;在W2这个污染浓度下,当A2浓度达到B3时,蚕豆幼苗出现死亡,死亡率较对照达到100%,而此时A3处理下的蚕豆幼苗未出现死亡现象。第21 d时,在W1这个污染浓度下,质膜透性相对于对照略有下降,A2和A3的最大值均出现在B3浓度,最大值分别为25.3%和22.4%,分别比对照增加8.12%和4.27%;在W2这个污染浓度下,A2和A3的最大值均出现在B2浓度,最大值分别为23.9%和24.4%,分别比对照增加2.58%和4.72%。综上所述,蚕豆生长7 d时,在所设的两个土壤污染浓度下,添加20 mg·kg⁻¹的草酸,细胞质膜透性达到最大值;而生长21 d时,在低污染土壤浓度(W1)下,添加10 mg·kg⁻¹的柠檬酸,细胞质膜透性达到最大值,在高污染土壤浓度(W2)下,添加5 mg·kg⁻¹的草酸,细胞质膜透性达到最大值。因此,在蚕豆不同的生长时期内,以上的土壤污染浓度、螯合剂种类和浓度组成的组合可能就更有利于促进蚕豆对污染土壤中铀和镉的吸收。

3 讨论

在植物的整个生长周期中,用肉眼可以明显的观察到,植物生长7 d后开始出现失绿、萎蔫和坏死斑点,直到21 d时,随着不同螯合剂浓度的升高,植株均出现死亡现象,这有可能就是螯合剂对植物存在的更大的生物毒性,导致了高浓度致死现象。

叶绿素是植物光合作用的物质基础,叶绿素的含量是衡量叶片生长状况的重要指标,其含量可能会受到环境胁迫的影响而降低。在蚕豆生长7 d后,从W1和W2这两个土壤污染浓度下叶绿素含量的变化来看,整体呈现出W1>W2,并均出现先降后升的趋势,在B2浓度时叶绿素含量最低。出现这种结果的原因可能是高浓度的螯合剂本身就对植物具有一定的毒害作用,而在低浓度下(B1),螯合剂有助于植物吸收土壤存在的重金属和核素,导致蚕豆幼苗的叶绿素遭到破坏,含量逐渐减少,随着螯合剂浓度的增加,反而抑制了植物对土壤存在的重金属和核素的吸收,从而出现蚕豆幼苗中叶绿素含量的提高。处理7 d

后,在W1和W2这两个土壤污染浓度下,叶绿素含量表现为:W1>W2, A2>A1>A3, B4>B3>B2>B1。此趋势可能说明,蚕豆生长7 d时,在所设的两个土壤污染浓度下,添加2.5 mg·kg⁻¹的草酸,叶绿素含量达到最低值;生长21 d时,在低污染土壤浓度(W1)下,添加10 mg·kg⁻¹的柠檬酸,叶绿素含量达到最低值,在高污染土壤浓度(W2)下,添加2.5 mg·kg⁻¹的柠檬酸,叶绿素达到最低值。综合以上生理指标的变化情况,在污染土壤中添加5 mg·kg⁻¹的草酸,可能有利于促进蚕豆对土壤中铀和镉的吸收,添加2.5 mg·kg⁻¹的柠檬酸次之。

丙二醛是衡量植物经逆境胁迫后膜脂过氧化程度的指标,其在植物体内的积累会对细胞产生毒害作用。本试验中,在处理7 d和21 d后,蚕豆幼苗体内的丙二醛含量与对照相比都随着处理浓度的升高而增加,但21 d明显较7 d时的含量有所减少。这说明铀和镉胁迫使蚕豆植株体内活性氧自由基累积,引发并加剧膜脂过氧化作用,会在短时间内积累大量的丙二醛,尤其高浓度的铀和镉胁迫对植株体内活性氧自由基累积明显,这与王正秋^[14]在芦苇幼苗上、孙光闻等^[15]在白菜上的研究结论一致。处理7 d后,在W1和W2这两个土壤污染浓度下,丙二醛含量表现为:W2>W1, A3>A1>A2, B4>B3>B2>B1;在21 d后,随着不同螯合剂浓度的增加,植株出现了不同程度的死亡现象。蚕豆生长7 d时,在所设的两个土壤污染浓度下,添加20 mg·kg⁻¹的草酸,丙二醛含量达到最大值;生长21 d时,在低污染土壤浓度(W1)下,添加2.5 mg·kg⁻¹的草酸,丙二醛含量达到最大值,在高污染土壤浓度(W2)下,添加10 mg·kg⁻¹的草酸,丙二醛含量达到最大值。由以上生理指标的变化情况得到,向污染土壤中添加10 mg·kg⁻¹的草酸,可能有利于蚕豆对土壤中铀和镉的吸收,添加2.5 mg·kg⁻¹的柠檬酸次之。

在正常情况下,植物细胞膜的选择性对维持细胞的微环境和正常的代谢起着重要的作用。当植物受到逆环境的影响时,细胞膜的结构遭到破坏,膜透性增大,使细胞内的电解质外渗,以致植物细胞浸提液的电导率增大。本试验中,在处理7 d后,W1和W2这两个土壤污染浓度下,蚕豆细胞质膜透性均呈现出随着螯合剂浓度的增加而增加的趋势,其表现为:W2>W1, A1>A3>A2, B4>B3>B2>B1;在21 d后,随着不同螯合剂浓度的增加,植株出现不同程度的死亡现象。蚕豆生长7 d时,在所设的两个土壤污染浓度下,添加20 mg·kg⁻¹的草酸,细胞质膜透性达到最大值;生

长 21 d 时,在低污染土壤浓度(W1)下,添加 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的柠檬酸,细胞质膜透性达到最大值,在高污染土壤浓度(W2)下,添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的草酸,细胞质膜透性达到最大值。综上所述,向土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的草酸,可能更有利于促进蚕豆吸收土壤中的铀和镉,添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的柠檬酸次之。

4 结论

在本试验中,蚕豆生长第 7 d 和 21 d 时,对不同土壤污染浓度下的植物的不同生理指标做了测定,不同的生理指标在不同的时期内、不同的污染浓度下都表现出了不同的情况。在 0~7 d 时,在螯合剂的辅助作用下,铀和镉复合污染土壤对蚕豆幼苗的影响是明显的,而随着处理时间的增长,在 21 d 时,随着不同螯合剂浓度的增加,蚕豆幼苗生理指标的变化较 7 d 时的变化就比较稳定,而且含量明显降低。在整个试验中,综合蚕豆在整个生长过程中的生长状况和各生理指标的变化情况,可以得到高浓度污染土壤较低浓度污染土壤更利于蚕豆对铀和镉复合污染物的吸收;对于叶绿素而言,在污染土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的草酸,可能有利于促进蚕豆对土壤中铀和镉的吸收,添加 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的柠檬酸次之;对于丙二醛而言,向污染土壤中添加 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的草酸,可能有利于蚕豆对土壤中铀和镉的吸收,添加 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的柠檬酸次之;在细胞质膜透性上,向土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草酸,可能更有利于促进蚕豆吸收土壤中的铀和镉,添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的柠檬酸次之。而 EDTA 在整个试验中都表现出了对植物较大的生物毒性。

参考文献:

- [1] 郑洁敏,宋 亮.放射性 Cs 污染土壤的植物修复及其影响因素[J].杭州农业科技,2006(1):33-35.
ZHENG Jie-min, SONG Liang. The phytoremediation of contaminated soil to the radioactive Cs and its influencing factors[J]. *Hangzhou Agricultural Science and Technology*, 2006(1):33-35.
- [2] Chander K, Dyckmans J, Joergensen R G, et al. Different source of heavy metals and their long-term effects on soil microbial properties[J]. *Biol Fertil Soil*, 2001, 34(4):241-247.
- [3] Chen S H, Zhou Q X, Sun T H, et al. Rapid ecotoxicological assessment of heavy metal combined polluted soil using canonical analysis[J]. *Environ Sci*, 2003, 15(6):854-858.
- [4] 唐 丽,柏 云,邓大超,等.修复铀污染土壤超积累植物的筛选及积累特征研究[J].核技术,2009,32(2):136-141.
TANG Li, BO Yun, DENG Da-chao, et al. The selection of hyperaccumulators for phytoremediation of uranium-contaminated soils and their uranium-accumulating characters[J]. *Nuclear Techniques*, 2009, 32(2):136-141.
- [5] 冷 鹏,揭雨成,许 英.植物治理重金属污染土壤的研究现状及展望[J].土壤通报,2002,33(6):467-470.
LENG Juan, JIE Yu-cheng, XU Ying. The current conditions and future studies on phytoremediation of soils polluted by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(6):467-470.
- [6] 张学礼,王尔奇.环境中铀污染的植物修复[J].铀矿冶,2008,27(1):44-48.
ZHANG Xue-li, WANG Er-qi. Review on phytoremediation of uranium-contaminated environment[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2008, 27(1):44-48.
- [7] Shahandeh H, Hossner I R. Enhancement of uranium phytoaccumulation from contaminated soils[J]. *Soil Science*, 2002, 167(4):269-280.
- [8] Chang Peichun, Kyoung-Woong, Kim-Satoshi, et al. U ranium accumulation of crop plants enhanced by citric acid[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2005, 27:529-538.
- [9] 徐长合,王 丹,张晓雪,等.不同肥料处理下蚕豆幼苗提取铀镉的生理特征研究[J].北方园艺,2010(10):19-23.
XU Chang-he, WANG Dan, ZHANG Xiao-xue, et al. Study on the physiological characteristics of *Vicia faba* Linn. to extract uranium cadmium under fertilizer treatment[J]. *Northern Horticulture*, 2010(10):19-23.
- [10] 华东师范大学生物系植物生理教研组.植物生理学实验指导[M].北京:人民教育出版社,1980:88-90.
The Plant Physiology Research Group of Department of Biology of the East China Normal University. Guidebook of phyto-physiology experiments[M]. Beijing:People's Education Press, 1980:88-90.
- [11] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000,7(2005 重印):261-263.
LI He-sheng. Guidebook of phyto-physiology experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000, 7(2005 Reprint):261-263.
- [12] 王学奎.植物生理生化实验原理与技术[M].北京:高等教育出版社,2006:169-171.
WANG Xue-kui. Guidebook of phyto-physiology experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:169-171.
- [13] 张守文,呼世斌,肖 璇,等.油菜对 Cd 污染土壤的植物修复[J].西北农业学报,2009,18(4):197-201.
ZHANG Shou-wen, HU Shi-bin, XIAO Xuan, et al. Phytoremediation of cadmium pollution in soil by oilseed rape[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, 18(4):197-201.
- [14] 王正秋,江行玉,王长海.铅、镉和锌污染对芦苇幼苗氧化胁迫和抗氧化能力的影响[J].过程工程学报,2002,2(6):558-563.
WANG Zheng-qiu, JIANG Xing-yu, WANG Chang-hai. Effects of Pb, Cd, and Zn on oxidative stress and antioxidative ability in *phragmites australis*[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2002, 2(6):558-563.
- [15] 孙光闻,朱祝军,方学智.镉对白菜活性氧代谢及 H_2O_2 清除系统的影响[J].中国农业科学,2004,37(12):2012-2015.
SUN Guang-wen, ZHU Zhu-jun, FANG Xue-zhi. Effects of different cadmium levels on active oxygen metabolism and H_2O_2 scavenging system in *Brassica*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12):2012-2015.