

几种油料作物对铬、铅的耐受性与积累研究

王 帅¹, 吕金印^{1*}, 李鹰翔², 齐 君², 叶庆富³

(1.西北农林科技大学生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100; 3.浙江大学核农所, 杭州 310029)

摘 要:选取花生(*Arachis hypogaea*)、大豆(*Glycine max*)、向日葵(*Helianthus annuus*)、蓖麻(*Ricinus communis*)4种油料作物,采用不同浓度的 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 水培处理,研究了4种油料作物对 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 的耐受能力和富集特征。结果表明,随着 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 处理浓度的升高,4种油料作物株高、根长、地上部与根部生物量和耐受指数均不同程度降低。其中,花生、向日葵地上部生物量降幅较小。4种作物地上部 Cr 、 Pb 含量随处理浓度的升高呈增加趋势,200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理下大豆地上部 Cr 含量最高(5 322 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb^{2+} 处理下向日葵地上部 Pb 含量最高(1 439 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。4种作物地上部对重金属的富集量随着 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 处理浓度的升高而增加,并且大部分重金属积累在根部。其中,花生 Cr 、 Pb 积累量和迁移率均较高,100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 、200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb^{2+} 处理下地上部 Cr 、 Pb 积累量分别为420.5、492.4 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,迁移率分别为23.1%、11.7%。综合分析表明,花生对 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 具有较强的耐受和积累能力,可作为 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 污染环境 中植物修复的油料作物。

关键词:油料作物;铬;铅;耐受性;植物修复

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)07-1310-07

Chromium and Lead Tolerance and Accumulation in Several Oil Crops

WANG Shuai¹, LÜ Jin-yin^{1*}, LI Ying-xiang², QI Jun², YE Qing-fu³

(1.College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Institute of Nuclear-Agricultural Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The tolerance and enrichment characteristics of four oil crops, including peanut(*Arachis hypogaea*), soybean(*Glycine max*), sunflower(*Helianthus annuus*) and castor(*Ricinus communis*), were studied under hydroponic culture treatment with different concentrations of Cr^{3+} and Pb^{2+} . The results showed that the plant height, root length, shoot biomass, root biomass and tolerance index of the four crops decreased in various degrees with the increase of Cr^{3+} and Pb^{2+} concentrations, the shoot biomass of peanut and sunflower decreased relatively slightly. The Cr and Pb contents in shoots of the crops increased with the increase of Cr^{3+} and Pb^{2+} concentration. Among them the Cr content in shoots of soybean was the highest(5 322 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) under treatment of 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr^{3+} , the Pb content in shoots of sunflower was the highest(1 439 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) under treatment of 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb^{2+} . The accumulation of Cr and Pb in shoots of the four crops increased with the increase of Cr^{3+} and Pb^{2+} concentration and most of heavy metal accumulated in roots. The accumulation and translocation rate of Cr and Pb in peanut were relatively higher, the accumulation of Cr and Pb in shoots under treatment of 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr^{3+} and 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb^{2+} was 420.5 $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ and 492.4, respectively, while the translocation rate was 23.1% and 11.7%, respectively. The results indicate that peanut has both stronger tolerance and higher ability of enrichment under Cr^{3+} and Pb^{2+} stress, and could be used as a potential oil crop for the phytoextraction of Cr^{3+} and Pb^{2+} contaminated environment.

Keywords: oil crop; chromium; lead; tolerance; phytoremediation

收稿日期:2012-01-13

基金项目:农业部农业公益性行业科研专项“核技术在高效、低碳农业中的应用”(201103007)

作者简介:王 帅(1987—),男,山西保德人,在读硕士生,主要从事植物微量元素吸收代谢机理研究。E-mail:wangxyz222@126.com

* 通讯作者:吕金印 E-mail:jinyinlu@163.com

环境恶化和能源危机是人类目前面临的两大挑战。随着城市化、工业化以及农业生产的集约化经营,重金属引起的土壤污染日益严重^[1]。近年来发展起来的植物修复技术以其成本低、可大面积推广和环境友好等特点,成为土壤净化的重要手段^[2]。但有研究表明,植物修复也存在一些局限性,如修复速度慢^[3]、能用于修复的植物大多没有经济价值^[4]等。另一方面,能源危机、环境恶化、粮食安全等问题日趋凸显,生物能源(生物乙醇、生物柴油等)以其资源的丰富性、可再生性和CO₂零排放等特点成为当今国际上新能源研发的热点^[5]。然而,发展生物能源需要大量耕地,与传统的粮食生产相矛盾,因此,在污染土壤中栽培能源植物,生产生物能源显得非常重要。

为了克服植物修复的不足和充分利用重金属污染土壤,可将能源植物开发和重金属污染土壤的植物修复相结合,通过发展能源植物来降低重金属污染土壤修复成本^[6]。这一研究的关键是筛选对重金属具有一定耐受性和积累能力的能源植物。油料作物是一类重要的能源植物,是生产生物柴油油脂的主要作物,已有研究表明,油料作物对重金属具有一定耐受和积累能力,如向日葵对Cu^[7]、蓖麻对Cd、Zn^[8-9]、芥菜型油菜对Cd^[10]具有较强的耐受性和吸收能力。Cr、Pb是重金属对环境污染报道中常见的两种单一污染元素,目前,有关多种油料作物对Cr³⁺、Pb²⁺耐受和积累能力的差异鲜见报道。本研究选用4种油料作物,采用不同浓度Cr³⁺、Pb²⁺水培处理,分析4种油料作物幼苗生长特性和对Cr、Pb吸收水平差异,比较对Cr³⁺、Pb²⁺的耐受性和积累能力,为重金属污染地区环境的植物修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试4种油料作物花生(白沙1018)、大豆(中黄24)、向日葵(567DW)、蓖麻(溜蓖5号)种子均购于陕西省西安市华星种苗公司,为当年市售新种子。

1.2 试验处理

选取籽粒饱满的4种作物种子,用0.1%HgCl₂表面消毒10 min去离子水冲洗。将种子置于铺有3层滤纸的培养皿中,25℃恒温催芽。待胚根长至2 cm左右,置于纱网上,7 d后转入盛有2 L 1/2 Hoagland 营养液的塑料盆(直径18 cm,深20 cm)中继续培养,每4 d更换一次营养液。用有定植孔的硬质纸板承载作物,用脱脂棉包茎以固定植株,并保持连续通气,每盆

8株。出芽20 d后采用CrCl₃·6H₂O和Pb(NO₃)₂处理,Cr³⁺处理浓度为0、50、100、200 mg·L⁻¹,Pb²⁺处理浓度为0、100、200、400 mg·L⁻¹,每种处理设3个重复。重金属处理期间,为避免Pb²⁺与PO₄³⁻发生沉淀,对照与处理营养液中均不加KH₂PO₄。整个试验在光照培养室中进行,昼/夜温度:(27±3)℃/(21±3)℃,光/暗:14 h/10 h,光强:150 μmol·m⁻²·s⁻¹。

1.3 生物量测定

重金属处理10 d后,分别采取4种作物根部及地上部,用自来水和去离子水洗净,将根系置于5.0 mmol·L⁻¹ CaCl₂溶液浸泡30 min,再用去离子水清洗3次。吸水纸吸干表面水分,105℃杀青15 min,80℃烘干至恒重,称重。

1.4 重金属含量测定

将烘干的根部和地上部样品磨碎后,称取0.1 g,加入HNO₃-HClO₄(4:1,V/V)混合酸,220℃沙浴消化,蒸至近干,去离子水定容至10 mL,利用火焰原子吸收分光光度计(Z-5000赛曼,日立公司)测定Cr、Pb含量^[11]。

1.5 数据处理

作物对重金属的耐受指数(Tolerance index, TI)按下式计算^[12]:

$$TI = \frac{\text{重金属处理作物的生物量}}{\text{对照作物的生物量}} \times 100\%$$

作物组织重金属积累量按下式计算^[13]:

$$\text{根(地上)部重金属积累量} = \text{根(地上)部重金属含量} \times \text{根(地上)部干重}$$

重金属的迁移率(Translocation rate, TR)按下式计算^[14]:

$$TR = \frac{\text{作物地上部重金属积累量}}{\text{整株重金属积累量}} \times 100\%$$

试验数据用Excel 2007和SPSS 16.0软件进行处理与统计分析,数值结果用3次重复的平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同浓度Cr³⁺、Pb²⁺处理下4种油料作物生长参数和耐受指数的变化

随着Cr³⁺、Pb²⁺处理浓度的升高,4种油料作物的根长和株高呈降低趋势(表1、表2)。其中,低浓度Cr³⁺(50 mg·L⁻¹)、Pb²⁺(100 mg·L⁻¹)处理下,向日葵的根长与对照差异不显著($P>0.05$)。同样,4种作物根系和地上部分生物量随Cr³⁺、Pb²⁺处理浓度的升高而降

低。其中花生和向日葵降幅较小,与对照相比,高浓度 Cr^{3+} ($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理下地上部生物量分别降低了 38%、19%,高浓度 Pb^{2+} ($400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理下分别降低了 30%、26%,且不同浓度 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 处理下,花生和向日葵耐受指数较高(表 1、表 2),表明花生和向日葵对 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 具有较强的耐受性。而大豆和蓖麻在高浓度 Cr^{3+} ($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 Pb^{2+} ($400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理下地上部生物量降幅均大于 40%。不同浓度 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 处理下大豆和蓖麻耐受指数较低,对 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 的耐受能力较弱。

2.2 不同浓度 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 处理下 4 种油料作物组织中 Cr、Pb 含量的变化

由图 1-A 可知,随着 Cr^{3+} 处理浓度的升高,4 种作物地上部 Cr 含量呈增加趋势。高浓度 Cr^{3+} ($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理下,大豆地上部 Cr 含量最高($5322 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其次为向日葵($4640 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、花生($955 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、蓖麻($468 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。4 种作物根部 Cr 含量明显大于地上部,表明大部分 Cr 滞留在作物根系(图 1-B)。

与 Cr^{3+} 处理相类似,4 种作物根中 Pb 含量明显高

于地上部(图 2-B)。随着 Pb^{2+} 处理浓度的升高,4 种作物地上部 Pb 含量均不同程度的增加(图 2-A)。其中,向日葵地上部 Pb 含量明显高于其他作物,在高浓度 Pb^{2+} ($400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理下达 $1439 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 不同浓度 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 处理下 4 种油料作物组织中 Cr、Pb 积累量和迁移率的变化

由表 3 可知,随着 Cr^{3+} 处理浓度升高,大豆、向日葵、蓖麻根部 Cr 积累量呈下降趋势,而花生在不同浓度 Cr^{3+} 处理下,根部 Cr 积累量无显著差异($P>0.05$)。说明在中、高浓度(100 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Cr^{3+} 处理下,花生根部仍能保持较高的 Cr 积累量,其他作物根部则由于 Cr^{3+} 处理浓度升高造成的生物量下降,以及 Cr 含量下降导致 Cr 积累量降低。4 种作物中,大豆在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理下地上部 Cr 积累量最高 ($1533 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)。4 种作物 Cr 迁移率均随 Cr^{3+} 处理浓度升高而增加, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr^{3+} 处理下迁移率为:大豆>向日葵>花生>蓖麻。

随着 Pb^{2+} 处理浓度的升高,4 种作物地上部和根

表 1 不同浓度 Cr^{3+} 处理下 4 种油料作物根长、株高、生物量和耐受指数的变化

Table 1 Changes of root length, plant height, root biomass, shoot biomass and TI of four oil crops under different Cr^{3+} treatments

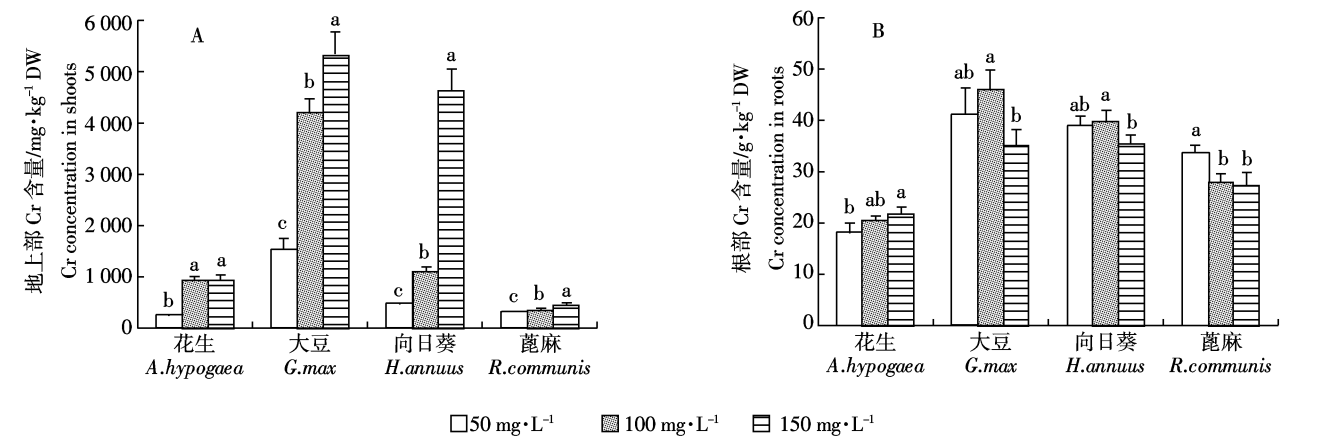
生长参数 Growth parameter	铬处理/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ treatments	花生 <i>A. hypogaea</i>	大豆 <i>G. max</i>	向日葵 <i>H. annuus</i>	蓖麻 <i>R. communis</i>
根长/cm	0	34.40±0.56a	25.88±1.71a	17.83±1.42a	21.37±2.64a
Root length	50	28.00±1.25b	18.30±1.41b	17.73±1.72a	13.47±1.53b
	100	22.40±1.05c	15.97±1.29bc	12.77±0.47b	13.13±1.19b
	200	17.10±1.04d	13.70±0.53c	11.67±0.71b	12.27±1.36b
株高/cm	0	29.40±3.00a	84.93±2.79a	21.30±0.92a	35.07±3.66a
Plant height	50	26.50±0.60ab	75.90±1.15b	18.83±0.38b	23.57±1.61b
	100	25.00±0.72b	69.10±3.14c	16.97±0.68c	21.83±0.93bc
	200	17.60±0.61c	65.57±3.72c	16.33±1.31c	19.40±0.70c
根系生物量/ $\text{g} \cdot 5 \text{ 株}^{-1}$	0	0.453±0.040a	0.206±0.020a	0.129±0.008a	0.278±0.017a
Root biomass	50	0.353±0.028b	0.171±0.019b	0.114±0.007b	0.160±0.009b
	100	0.343±0.023b	0.141±0.015b	0.086±0.006c	0.137±0.018bc
	200	0.319±0.018b	0.093±0.013c	0.075±0.004c	0.113±0.013c
地上部生物量/ $\text{g} \cdot 5 \text{ 株}^{-1}$	0	2.951±0.200a	2.220±0.148a	0.757±0.051a	1.331±0.076a
Shoot biomass	50	2.556±0.227b	2.069±0.125b	0.637±0.076ab	0.800±0.110b
	100	2.230±0.200b	1.881±0.130b	0.629±0.075ab	0.762±0.105b
	200	1.839±0.127c	1.223±0.108c	0.611±0.054b	0.685±0.070b
根系耐受指数/%	50	78	83	89	58
TI of roots	100	76	68	67	49
	200	70	45	58	41
地上部耐受指数/%	50	87	93	84	60
TI of shoots	100	76	85	83	57
	200	62	55	81	51

注:同列数据标有不同字母表示差异有显著性(LSD 检验, $P=0.05$)。下同。

Note: Values with different letters in the same column indicate a significant difference at $P=0.05$ level according to LSD test. The same below.

表 2 不同浓度 Pb²⁺处理下 4 种油料作物的根长、株高、生物量和耐受指数的变化

Table 2 Changes of root length, plant height, root biomass, shoot biomass and TI of four oil crops under different Pb ²⁺ treatments					
生长参数 Growth parameter	铅处理/mg·L ⁻¹ Pb ²⁺ treatments	花生 <i>A.hypogaea</i>	大豆 <i>G.max</i>	向日葵 <i>H.annuus</i>	蓖麻 <i>R.communis</i>
根长/cm Root length	0	34.40±0.56a	25.88±1.71a	17.83±1.42a	21.37±2.64a
	100	25.80±3.74b	20.33±1.86b	15.97±1.02ab	17.93±2.10ab
	200	22.23±0.64bc	18.63±2.11b	15.63±0.85bc	15.50±2.25bc
	400	20.37±0.61c	15.03±1.65c	13.67±1.04c	11.53±2.22c
株高/cm Plant height	0	29.40±3.00a	84.93±2.79a	21.30±0.92a	35.07±3.66a
	100	25.40±0.82b	71.50±5.72b	19.23±0.75b	25.70±3.20b
	200	21.33±1.59c	67.13±3.65bc	17.70±1.15bc	21.37±0.84bc
	400	20.47±1.00c	64.20 ±1.22c	16.27±0.55c	19.53±2.61c
根系生物量/g·5 株 ⁻¹ Root biomass	0	0.453±0.040a	0.206±0.020a	0.129±0.008a	0.278±0.017a
	100	0.407±0.045ab	0.159±0.012b	0.125±0.015ab	0.233±0.008b
	200	0.359±0.031b	0.129±0.008c	0.105±0.013bc	0.228±0.020b
	400	0.345±0.018b	0.122±0.008c	0.099±0.010c	0.221±0.010b
地上部生物量/g·5 株 ⁻¹ Shoot biomass	0	2.951±0.200a	2.220±0.148a	0.757±0.051a	1.331±0.076a
	100	2.638±0.180b	1.625±0.125b	0.680±0.075ab	0.837±0.118b
	200	2.448±0.054b	1.504±0.100b	0.602±0.091b	0.762±0.114b
	400	2.072±0.125c	1.245±0.091c	0.562±0.090b	0.733±0.078b
根系耐受指数/% TI of roots	100	90	77	97	84
	200	79	63	81	82
	400	76	59	77	80
地上部耐受指数/% TI of shoots	100	89	73	90	63
	200	83	68	80	57
	400	70	56	74	55



图中不同字母表示同一作物不同处理差异达显著水平(LSD, $P=0.05$)。下同
Different letters in the figure indicate a significant difference among different treatments in the same crop at $P=0.05$ level according to LSD test. The same below

图 1 不同浓度 Cr³⁺处理下 4 种油料作物地上部和根部 Cr 含量的变化

Figure 1 Changes of Cr contents in shoots and roots of 4 oil crops at different concentrations of Cr³⁺

部的 Pb 积累量呈增加趋势(表 4)。相同浓度 Pb 处理下,蓖麻根部 Pb 积累量大于其他 3 种作物。200 mg·L⁻¹ Pb²⁺处理下,花生的地上部 Pb 积累量最高(492 μg·株⁻¹)。在此浓度处理下,4 种作物的 Pb 迁移率为:花生>大豆>向日葵>蓖麻。

3 讨论

植物根系、地上部的生物量和生长速率,可作为评价植物对重金属耐受性的间接指标^[15]。同时,生物量也直接影响重金属污染土壤的植物修复效果,生物

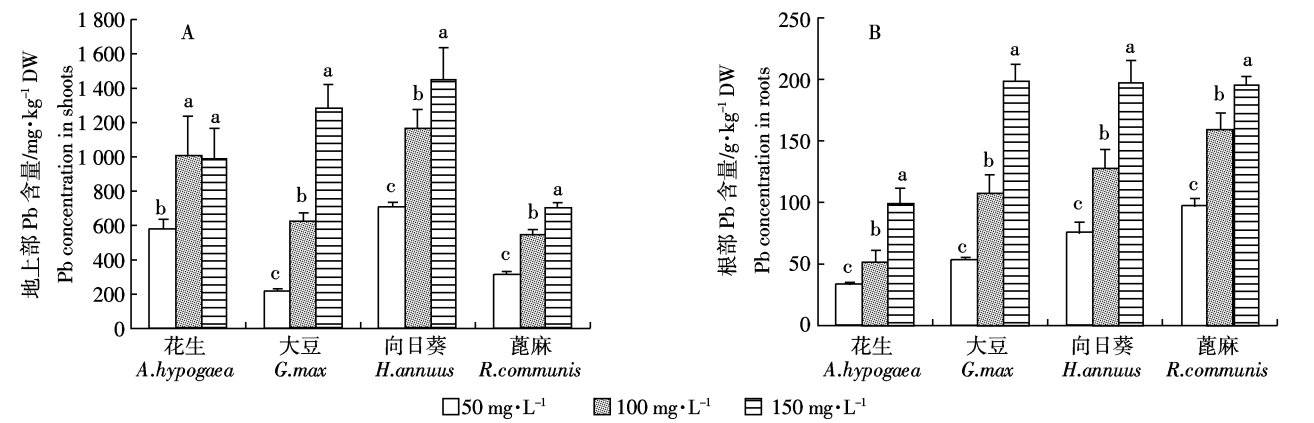


图 2 不同浓度 Pb²⁺处理下 4 种油料作物地上部和根部 Pb 含量的变化
Figure 2 Changes of Pb contents in shoots and roots of 4 oil crops at different cocentrations of Pb²⁺

表 3 不同浓度 Cr³⁺处理下 4 种油料作物组织 Cr 积累量和迁移迁移率的变化

Table 3 Changes of Cr accumulation in crop tissues and translocation rate (TR) of four oil crops grown under different Cr³⁺ treatments

作物 Crops	铬处理 Cr ³⁺ treatments/mg·L ⁻¹	作物组织 Cr 积累量/μg·株 ⁻¹ Cr accumulation in crop tissues		迁移率/% TR
		地上部分 Shoot	根部 Root	
花生 <i>A.hypogaea</i>	50	119.6±13.8b	1 274.5±206.4a	8.6±0.4b
	100	420.5±67.5a	1 407.2±132.5a	23.1±4.2a
	200	351.1±38.9a	1 391.6±115.8a	20.1±0.8a
大豆 <i>G.max</i>	50	637.3±82.2b	1 419.0±323.6a	31.5±6.1c
	100	1 533.7±118.2a	1 296.7±118.9a	54.2±0.5b
	200	1 307.4±209.0a	650.0±98.1b	66.7±4.0a
向日葵 <i>H.annuus</i>	50	56.8±8.1c	886.7±91.8a	6.1±1.5c
	100	141.2±16.0b	683.5±8.9b	17.1±1.6b
	200	563.9±19.8a	531.0±48.5c	51.6±3.0a
蓖麻 <i>R.communis</i>	50	45.2±9.2a	1 076.8±32.9a	4.0±0.9c
	100	54.4±12.0a	766.1±131.4b	6.6±0.6b
	200	64.3±8.9a	620.4±126.9b	9.5±0.8a

量高的植物能起到良好的修复作用^[16]。本研究中,4 种作物的生物量、生长速率随着 Cr³⁺、Pb²⁺处理浓度的升高而降低,这与曹莹等^[17]采用 Pb 处理花生的研究结果类似。此外,郭艳丽等^[18]研究发现,随着 Cd 处理浓度的升高,向日葵生长受到明显阻碍,根、茎、叶生物量显著下降。

植物耐受指数反映了植物对重金属的耐受性,耐受指数越大,表示植物对重金属的耐受性越强^[19]。当耐受指数小于 0.5 时,则说明重金属对这种植物的毒害作用明显,植物基本很难在这种浓度的重金属环境中生长。本研究对 4 种油料作物的生长参数和耐受指数综合分析表明,花生和向日葵对高浓度 Cr³⁺(200 mg·L⁻¹)、Pb²⁺(400 mg·L⁻¹)处理均具有较强的耐受性,而大豆和蓖麻的耐受性相对较弱。

植物对重金属的积累能力在种间差异较大,通过

本研究可以看出,花生、大豆、向日葵、蓖麻均对 Cr、Pb 的富集能力不同,这点在不同花卉对铅富集特征的研究中也有体现^[20]。同时,培养条件也对重金属的积累产生很大影响。一般而言,植物在液体环境中对重金属的吸收量高于在土壤条件下,但可反映植物对重金属的富集能力。本研究中,4 种油料作物体内的 Cr、Pb 大部分滞留在根系,根中 Cr、Pb 含量最高分别达到 46 g·kg⁻¹(大豆)和 198 mg·kg⁻¹(蓖麻)。在其他水培试验中也发现,根系有较高的重金属含量,陈亚华等^[21]研究了芥菜型油菜对 Pb²⁺的吸收,经过 12 d 的培养,油菜根系 Pb 含量在 140 g·kg⁻¹ 以上。Chen 等^[22]观察到蕹菜在 10 mg·L⁻¹ Cr³⁺处理下,根部的 Cr 含量大于 6 000 mg·kg⁻¹。

作为土壤修复的理想植物,在其可收获部位应具有高重金属耐受性和高积累能力^[23],一般来说,植物

表 4 不同浓度 Pb^{2+} 处理下 4 种油料作物组织 Pb 积累量和迁移率的变化Table 4 Changes of Pb accumulation in crop tissues and translocation rate (TR) of four oil crops grown under different Pb^{2+} treatments

作物 Crops	铅处理 Pb^{2+} treatments/ $mg \cdot L^{-1}$	作物组织 Pb 积累量/ $\mu g \cdot g^{-1}$ Pb accumulation in crop tissues		迁移率/% TR
		地上部分 Shoot	根部 Root	
花生 <i>A.hypogaea</i>	100	298.4±12.9b	2 617.4±245.9b	10.3±1.3a
	200	492.4±122.0a	3 675.1±378.8b	11.7±2.2a
	400	406.3±62.0ab	6 854.2±1270.5a	5.7±1.4b
大豆 <i>G.max</i>	100	67.2±12.0c	1 685.1±158.7c	3.9±0.9b
	200	184.2±9.7b	2 782.2±507.0b	6.4±1.3a
	400	317.9±42.6a	4 813.9±60.7a	6.2±0.8a
向日葵 <i>H.annuus</i>	100	94.8±12.7b	1 873.4±300.3b	4.9±1.3a
	200	138.4±9.2ab	2 642.3±30.1b	5.0±0.3a
	400	163.7±43.6a	3 928.3±658.2a	4.0±0.5a
蓖麻 <i>R.communis</i>	100	51.1±3.8b	4 512.0±125.0c	1.1±0.1a
	200	82.3±17.3a	7 248.1±112.4b	1.1±0.2a
	400	102.5±9.1a	8 618.8±625.3a	1.2±0.0a

的可收获部位是地上部分。迁移率是地上部重金属积累总量与全株重金属积累总量的比值,可以很好地说明对重金属的转移能力^[24]。本研究显示,大豆对 Cr 的迁移率较高,200 $mg \cdot L^{-1}$ 处理下为 66.7%,说明在此浓度下,大豆地上部积累 Cr 总量大于根部。相对而言, Pb 的迁移率较 Cr 低,可能是由于植物对 Pb 的富集大多是通过植物细胞间隙(质外体)中的沉积作用^[25]。4 种作物中,花生的 Pb 迁移率较高,200 $mg \cdot L^{-1}$ Pb^{2+} 处理下为 11.7%。本研究中虽然大豆地上部 Cr、Pb 积累量较高,但是随着 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 处理浓度的升高,大豆叶片萎蔫、发黄脱落现象也逐渐加重。在 200 $mg \cdot L^{-1}$ Cr^{3+} 和 400 $mg \cdot L^{-1}$ Pb^{2+} 处理下植株接近死亡,说明植株体内吸收的重金属对其造成严重伤害,也间接说明了大豆对 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 的耐受性较弱。 Pb^{2+} 处理下向日葵的 Pb 含量较高,但由于其生物量较低,导致 Pb 积累量低于花生。

综合分析花生、大豆、向日葵、蓖麻在不同浓度 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 处理下的生长及对 Cr、Pb 的吸收量,可以看出,花生表现出较强的耐受性,并且对 Cr、Pb 的富集能力也较强。因此,可将花生作为修复 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 污染环境的油料作物。本研究只限于 4 种油料作物在幼苗期和水培条件下对重金属 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 的耐受性和积累状况,有关其他生育期及全生育期作物在土壤环境中的重金属耐受和积累能力,以及收获后籽粒中重金属的积累量有待进一步研究。

4 结论

在 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 胁迫条件下,4 种油料作物的生长参

数和生物量随处理浓度的升高而呈现不同程度的降低。相对于大豆、向日葵和蓖麻,花生根部及地上部生物量较大,耐受性较高,并且对 Cr、Pb 的积累量较大,可以作为重金属 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 污染环境植物修复的油料作物。

参考文献:

- [1] Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8: 279-284.
- [2] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.
WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [3] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14: 277-282.
- [4] Linger P, Mussig J, Fiseher H, et al. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: Fiber quality and phytoremediation potential[J]. *Industrial Crops and Products*, 2002, 16: 33-42.
- [5] 李 军, 吴平治, 李美茹, 等. 能源植物的研究进展及其发展趋势[J]. 自然杂志, 2007, 29(1): 21-25.
LI Jun, WU Ping-zhi, LI Mei-ru, et al. Development of energy plant: Progress and suggestions[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007, 29(1): 21-25.
- [6] SHI Gang-rong, CAI Qing-sheng. Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops[J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27: 555-561.
- [7] Lin J, Jiang W, Liu D. Accumulation of copper by roots, hypocotyls, cotyledons and leaves of sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. *Biores Technol*, 2003, 86: 151-155.

- [8] 陆晓怡, 何池全. 蓖麻对重金属 Cd 的耐性与吸收积累研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4):674-677.
LU Xiao-yi, HE Chi-quan. Tolerance, uptake and accumulation of cadmium by *Ricinus communis* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4):674-677.
- [9] 陆晓怡, 何池全. 蓖麻对重金属锌的耐性与吸收积累研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(6):414-419.
LU Xiao-yi, HE Chi-quan. Environmental behavior of zinc in *Ricinus communis* L.[J]. *Environment Pollution and Control*, 2005, 27(6):414-419.
- [10] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1):48-51.
SU De-chun, WONG J W C. The phytoremediation potential of oilseed rape(*B. juncea*) as a hyperaccumulator for cadmium contaminated soil [J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(1):48-51.
- [11] 柳 玲, 吕金印, 张 微. 铬在芹菜中的累积、亚细胞分布及化学形态分析[J]. 核农学报, 2010, 24(5):1093-1098.
LIU Ling, LU Jin-yin, ZHANG Wei. Accumulation subcellular distribution and chemical form of chromium in celery(*Apium graveolens* L.) [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24 (5):1093-1098.
- [12] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth[J]. *New Phytologist*, 1978, 80:623-633.
- [13] 刘爱荣, 张远兵, 张雪平, 等. 铅污染对高羊茅生长、无机离子分布和铅积累量的影响[J]. 核农学报, 2009, 23(1):128-133.
LIU Ai-rong, ZHANG Yuan-bing, ZHANG Xue-ping, et al. Effect of lead pollution on growth, inorganic ion distribution and Pb²⁺ accumulation in *Festuca arundinacea* [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(1):128-133.
- [14] 赵 汝, 韩烈保, 曾会明. 铅胁迫下转 DREB1A 高羊茅对铅的吸收与耐受性研究[J]. 中国草地学报, 2010, 32(2):54-60.
ZHAO Ru, HAN Lie-bao, ZENG Hui-ming. Research on lead uptake and tolerance of tall fescue with foreign DREB1A under lead stress[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(2):54-60.
- [15] Ali N A, Bernal M P, Ater M. Tolerance and bioaccumulation of copper in *Phragmites australis* and *Zea mays*[J]. *Plant Soil*, 2002, 239:103-111.
- [16] Papoyan A, Kochian L V. Identification of *Thlaspi caerulescens* genes that may be involved in heavy metal hyperaccumulation and tolerance [J]. *Plant Physiology*, 2004, 136:3814-3823.
- [17] 曹 莹, 韩 豫, 蒋文春, 等. 铅胁迫对花生生长与铅积累特性的研究[J]. 中国油料作物学报, 2008, 30(2):198-200.
CAO Ying, HAN Yu, JIANG Wen-chun, et al. Absorption characteristics of lead in peanut under the stress of lead[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2008, 30(2):198-200.
- [18] 郭艳丽, 台培东, 韩艳萍, 等. 镉胁迫对向日葵幼苗生长和生理特性的影响[J]. 环境工程学报, 2009, 3(12):2291-2296.
GUO Yan-li, TAI Pei-dong, HAN Yan-ping, et al. Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sunflower seedlings [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(12):2291-2296.
- [19] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6 种植物对 Pb²⁺的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5):533-537.
LIU Xiu-mei, NIE Jun-hua, WANG Qing-ren. Research on lead uptake and tolerance in six plants[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5):533-537.
- [20] 李翠兰, 邵泽强, 王玉军, 等. 几种花卉植物对铅富集特征的研究 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(4):127-134.
LI Cui-lan, SHAO Ze-qiang, WANG Yu-jun, et al. Enrichment characteristics of Pb by several kinds of ornamental plants[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4):127-134.
- [21] 陈亚华, 沈振国, 宗良纲. EDTA 对 2 种芥菜型油菜幼苗富集 Pb 的效应[J]. 环境科学研究, 2005, 18(1):67-70.
CHEN Ya-hua, SHEN Zhen-guo, ZONG Liang-gang. Effects of EDTA on Pb accumulation by seedlings of two *Brassica juncea* varieties [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(1):67-70.
- [22] Chen J C, Wang K S, Chen H, et al. Phytoremediation of Cr(Ⅲ) by *Ipomoea aquatica*(water spinach) from water in the presence of EDTA and chloride: Effects of Cr speciation[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:3033-3039.
- [23] Salt D E, Smith R D, Raskin I. Phytoremediation[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49:643-668.
- [24] 徐华伟, 张仁陟, 谢 永. 铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6):1136-1141.
XU Hua-wei, ZHANG Ren-zhi, XIE Yong. Accumulation and distribution of heavy metals in *Artemisia lavandulaefolia* at lead-zinc mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6):1136-1141.
- [25] 叶春和. 紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理的研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4):331-334.
YE Chun-he. Phytoremediation of Pb-contaminated soil with alfalfa: Capacity and mechanisms[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4):331-334.