

丁艳萍,夏焕焕,谢芳芳,等. 农田土中外源 Ti(IV)对 Cd 胁迫下油葵生长的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(13):299-303.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.069

# 农田土中外源 Ti(IV)对 Cd 胁迫下油葵生长的影响

丁艳萍,夏焕焕,谢芳芳,李 玲

(新疆大学化学化工学院,新疆乌鲁木齐 830046)

**摘要:**以新疆某石化企业周边农田土为供试土壤,采用室内静态土培盆栽试验,研究 Cd 单一及 Ti、Cd 复合作用对油葵生长及其 Cd 生物有效性的影响。结果表明,单施 Cd 时,适量( $\leq 10$  mg/kg)Cd 能促进油葵的生长,但高添加量( $\geq 20$  mg/kg)Cd 却抑制其生长。Ti 和 Cd 复合作用时,油葵对 Cd 的吸收既存在协同效应,也存在拮抗效应,当外源施入适量( $\leq 1\ 000$  mg/kg)Ti 能够促进油葵的生长,提高油葵的耐性;当外源 Ti 添加量 $\geq 2\ 000$  mg/kg 时,油葵对 Cd 的富集及耐性低于相同添加量单施 Cd 的情况。种植油葵后土壤中 Cd 的有效态含量远低于种植油葵前,说明油葵耐 Cd 能力较强,可与适量 Ti 结合,用于修复被 Cd 污染的土壤。

**关键词:**Ti;Cd 胁迫;油葵;生长指标;Cd 生物有效性;有效态;土壤污染;修复;吸收;富集转运

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)13-0299-05

多年来,土壤中重金属污染问题备受关注,关于土壤中重金属的防治及修复技术正成为研究的重点。镉(Cd)是植物非必需元素,但许多植物均能从水中和土壤中摄取 Cd 并在体内累积,累积量取决于环境中 Cd 的含量和形态<sup>[1-2]</sup>。土壤中过量的 Cd,不仅能在植物体内残留,还会在土壤及植物中迁移转化,在食物链中积累和放大,对植物的生长发育产生明显的危害并影响动植物的生存<sup>[3]</sup>。由于 Cd 对人体危害的风险水平超过汞(Hg)和铅(Pb)的 3~4 个数量级<sup>[4]</sup>,故 Cd 的存在在很大程度上对人类健康构成威胁。钛(Ti)是一种非必需元素,可以通过加强植物叶部光合作用及根部固氮作用而达到增产的目的<sup>[5]</sup>。我国城市近郊农田土壤由于大气沉降、污水灌溉、农药使用、固体废弃物堆放等问题,很多农田都受到了不同程度的重金属污染<sup>[6]</sup>,然而土壤中重金属的污染往往是多种金属同时存在的<sup>[7]</sup>,而这种复合污染受很多因素的影响,在治理中通常存在较大的难度。周坤等研究发现,喷施锌(Zn)能够提高番茄产量,同时番茄根部及叶部 Cd 含量最高<sup>[8]</sup>。Chlopecka 等发现,添加铁(Fe)的氧化物能够显著降低玉米及大麦 Cd 的含量,说明某些金属在促进植物生长的同时抑制重金属在植物中的累积<sup>[9]</sup>。Ti 通过不同方式进入土壤中,常以 TiO<sub>2</sub> 的形式存在<sup>[10]</sup>。张文通等提出,TiO<sub>2</sub> 吸收光子后,价带上产生空穴,其他重金属离子可作为受体被氧化,从而大大降低重金属的危害,同时也提出利用 TiO<sub>2</sub> 修复重金属 Pb、铜(Cu)等原位修复法降低污染土壤重金属治理的修复剂<sup>[11-13]</sup>。西北很多地区土地为盐碱性土壤,具有特殊的理化特性,土壤偏碱性,目前针对盐碱化土壤中 Ti 对重金属 Cd 累积规律的研究却鲜有报道。同时,油葵具有较强的

耐受性<sup>[14]</sup>,因此本试验采用油葵为供试作物,采用室内静态土培盆栽的方法,研究不同剂量外源 Ti 及 Cd 配施对油葵生长,Cd 吸收和转运作用的影响,探究 Ti 对重金属 Cd 的影响,旨在为土壤中重金属 Cd 的修复及钛肥的合理施入提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤及材料

供试土壤采自新疆某石化企业污水库周边农田 0~20 cm 表层土壤,土壤的采集采取棋盘采样法,每点相距 2 m,每点取土 2 kg。将采集的土壤经室内自然晾干后,剔除杂物、磨碎,过 2 mm 筛,置于自封袋中备用。前期经粉末衍射分析,发现该土壤主要的矿物组分为长石、石英、伊利石、闪脚石等<sup>[15]</sup>。试验中 Ti 与 Cd 分别使用分析纯草酸钛钾(C<sub>4</sub>K<sub>2</sub>O<sub>9</sub>Ti·2H<sub>2</sub>O)及氯化镉(CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O)。

### 1.2 试验方法

植物中重金属总量及土壤残渣态含量均采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub>-HCl 电热板法消解。土壤形态分析采取 Tessier 连续提取技术提取<sup>[16]</sup>。所有试验均进行 3 组平行样处理,用火焰原子吸收仪测定待测液中 Cd 的质量浓度。ICP-MS 测定土壤中重金属的背景值。

### 1.3 形态分析和盆栽试验

分别称取 1.0 kg 风干土壤于 16.5 cm(直径)×12 cm(高)的塑料花盆中,以溶液的形式,按 Cd 单一胁迫[设 0(对照)、5、10、20、30 mg/kg 共 5 个处理]、Ti+Cd 复合胁迫[设 0+0(对照)、500+5、1 000+10、2 000+20、3 000+30 mg/kg 共 5 个处理]设置处理,并与土壤混合均匀,每个处理 3 次重复。为防止淋溶渗漏损失,花盆下方放置塑料托盘,若发生渗漏将渗漏液倒入花盆。平衡 2 个月后,于 2015 年 4 月在新疆大学 5 号楼 511 温室内进行油葵的种植,培养期间用去离子水浇水,肥料均一次性施入作底肥,基肥中 P(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)、K(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)的用量分别为 250、109 mg/kg,N(NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>和尿素)为 250 mg/kg。同时向盆中播入油葵籽,出苗后油葵每盆

收稿日期:2017-03-03

基金项目:国家自然科学基金(编号:21467029)。

作者简介:丁艳萍(1989—),女,新疆库尔勒人,硕士研究生,主要从事土壤污染控制。E-mail:511576960@qq.com。

通信作者:李 玲,硕士生导师,副教授,主要从事土壤污染控制。E-mail:llnwz2@163.com。

定苗 3 株。放置室内培养,60 d 后收获。收获时,用去离子水洗净,并测定油葵地上、地下部分长度后,置于 120 ℃ 下杀青 30 min,然后 85 ℃ 烘干至恒质量,测定其干质量,再测定各部分的 Cd 含量。形态分布按照 Tessier 连续提取法将土壤中的 Cd 分成可交换态(EX)、碳酸盐结合态(CARM)、铁锰氧化物结合态(Fe-Mn)、有机质结合态(OM)和残渣态(RF)5 个形态,其中有效态(或称可利用态)指前 3 个形态之和,因其活性高而能够被植物吸收利用。

1.4 数据分析

试验数据的分析采用 Excel 2010 及 SPSS 20.0 统计分析软件,对照和处理之间的总体差异性采用重复测量,并对数据采用 Pearson 相关性分析和 LSD 多重比较法进行显著性检验分析( $P < 0.05$ )。所有测定数据结果以“平均值 ± 标准差”的形式表示,作图采用 Origin Pro 9.1 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质及各种金属质量比

土壤样品的 pH 值 7.97,呈弱碱性,有机质含量非常低,为 1.13 mg/g;阳离子交换量 7.68 cmol/kg;碱化度为 41.66%,属于碱性土;含水量低于 2%,较干旱;其中速效磷含量 86.30 mg/kg,速效钾含量 61.05 mg/kg,全氮含量 165.14 mg/kg。从表 1 可知,土壤背景值全 Ti 含量为 2 011.4 mg/kg,含量较高;全 Cd 含量为 0.50 mg/kg,未达到《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的一般农田 II 类标准(1.00 mg/kg)。

表 1 土壤基本理化性质

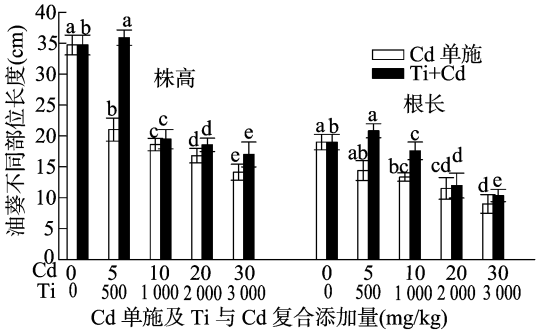
元素	含量 (mg/kg)
Cd	0.50
Co	10.70
Cr	34.80
Ni	17.90
Pb	16.19
Ti	2 011.40
V	108.20

2.2 Ti 与 Cd 复合作用对油葵生长的影响

2.2.1 Ti 与 Cd 复合作用对油葵株高和根长的影响 植物根系长度、株高等能够很好地反映作物的生长状况,根冠比( $R/T$ )在植物的生长中有着很重要的意义<sup>[17-19]</sup>。当植物根系吸收作用大于生长所需营养物质及地上部消耗能力时,植物地上部分生长速度则大于根系生长速度;当植物根系的吸收作用小于地上部所需营养物质及蒸腾作用时,植物的地上部分生长速度将小于根系生长速度;根冠比低的植物,茎秆细小,叶片发育不良;根冠比适当的植物,茎秆粗壮,叶片生长较旺盛;而根冠比大的植物,植株矮壮,多花多果,抗逆性强。

由图 1 可知,单施 Cd 及 Ti 与 Cd 复施均会抑制油葵株高及根长的增长,且随着剂量的增大而显著降低( $P < 0.05$ )。单施 Cd 及 Ti 与 Cd 复施对油葵株高及根长的影响与镉钛配施剂量有关,低添加量(5 mg/kg)单施 Cd 处理油葵的株高较空白对照组下降了 11.0%,而高添加量(30mg/kg)处理油葵株高较空白组明显下降了 59.3% ( $P < 0.05$ )。与株高相同,单施 Cd

抑制油葵根的生长,5、10、20、30 mg/kg 镉处理油葵根长分别较对照组明显下降了 39.4%、43.9%、46.5%、51.0% ( $P < 0.05$ )。从表 2 可知,单施 Cd 时油葵根冠比随 Cd 添加量的增大呈先增后降的趋势,在 Cd 添加量为 10 mg/kg 时,根冠比达到最大值,此时土壤中 Cd 能够在一定程度上促进油葵地上部及根部生长,而当 Cd 添加量 > 10 mg/kg 时,油葵地上部分及根系的生长则逐渐受到抑制。



图中不同小写字母表示同一处施肥方式下施用剂量处理之间在 0.05 水平达显著性差异。下同

图 1 Cd 单一及 Ti 与 Cd 复合作用对油葵株高及根长的影响

表 2 Cd 单施及 Ti 与 Cd 复合作用对油葵  $R/T$  的影响

Cd 添加量 (mg/kg)	$R/T$	Ti + Cd 添加量 (mg/kg)	$R/T$
0	0.55	0 + 0	0.55
5	0.68	500 + 5	0.58
10	0.72	1 000 + 10	0.90
20	0.68	2 000 + 20	0.65
30	0.64	3 000 + 30	0.61

Ti 与 Cd 复合处理对油葵株高及根长影响均与施用添加量有关。低 Cd 低 Ti(5、500 mg/kg)处理的株高显著高于同等 Cd 添加量处理的低 Cd 组(5 mg/kg);中添加量 Cd、Ti 对油葵株高有显著影响( $P < 0.05$ ),可以看出,此时 Ti 的加入较单一 Cd 处理时 Cd 对油葵株高增长的抑制作用逐渐减弱;高 Cd 高 Ti(30、3 000 mg/kg)处理的株高较对照组显著下降了 55.0%。与株高相似,低 Cd 低 Ti(5、500 mg/kg)处理的根长高于同等 Cd 添加量处理的低 Cd 组(5 mg/kg),Ti 添加量 > 1 000 mg/kg 时显著抑制油葵根系的生长( $P < 0.05$ )。当 Cd 添加量相同时,一定添加量( $\leq 1 000$  mg/kg)的外源 Ti 能够促进油葵的生长,表现为油葵根冠比增大(表 2),且中添加量 Cd、Ti 较单施 Cd 增加 25.0%。但当外源 Ti 添加量过大(> 1 000 mg/kg)时反而会抑制油葵地上及根系的发育,根冠比均小于同添加量 Cd 单施。

2.2.2 Ti 与 Cd 复合作用对油葵生物量的影响 由图 2 可知,油葵地上部分的生物量大于地下部分,前者约为后者的 10 倍,单施 Cd 时,低添加量 Cd 促进油葵地上部干物质的积累,当 Cd 添加量 > 10 mg/kg 时,对油葵生物量的积累产生了一定的抑制作用,但未达显著水平。同样地,油葵地下部分干物质积累量在低 Cd 处理时逐渐增大,随着外源 Cd 的增加,整株油葵的生物量呈先增后降的趋势,这与孙月美等的结论<sup>[14]</sup>基本一致。油葵总的生物量变化范围为 2.07 ~ 2.64 g。高 Cd 处理时,油葵的生长受到抑制,油葵的总生物量较对照降低了 21.7%。

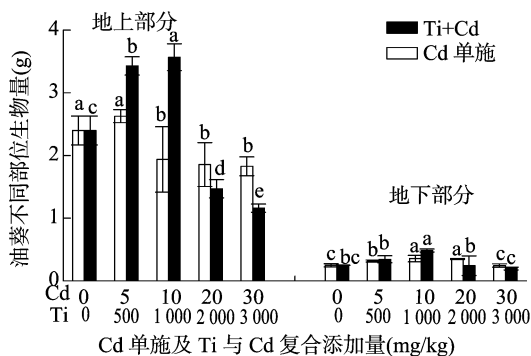


图2 Cd 单施及 Ti 与 Cd 复合作用对油葵生物量的影响

与单施 Cd 处理规律相同, Ti 与 Cd 复合作用时, 油葵地上部生物量随外源 Ti 与 Cd 添加量的增加呈先增后降的趋势, 当 Ti 与 Cd 达到 1 000、10 mg/kg 处理水平时, 减缓了 Cd 对油葵地上部分的毒害作用, 表现为地上部干物质累积显著增加 ( $P < 0.05$ ), 达到最大值 3.56 g, 较对照组增加 48.7%, 同时显著大于同等镉处理 (10 mg/kg)。而在高 Cd 高 Ti (30、3 000 mg/kg) 处理水平时, 油葵的生长受到抑制, 达到最小值 1.15 g, 并显著小于对照 ( $P < 0.05$ ), 较对照组下降 51.6%。Ti 与 Cd 复合对油葵地下部的生长与地上部规律相同, 表现为油葵根部干物质累积随外源 Ti 与 Cd 添加量的增加呈先增后减趋势。

总之, 油葵总的生物量较少, 是由于盐碱土中盐分离子含量较高, 且有机质及营养物质含量较少, 同时土壤碱化度高, 在油葵生长过程中, 土壤产生了不同程度的板结, 导致土壤结构较差, 影响土壤水分的渗入, 不利于油葵干物质的累积<sup>[20]</sup>。本研究中, 外源 Cd 的添加, 在一定范围内对油葵生物量的积累产生抑制作用, 而外源 Ti 与 Cd 共同作用时, 当 Ti 的添加量  $< 1\ 000$  mg/kg 时, 对油葵地上部生物量的累积产生一定的促进作用, 因为 Ti 的施入能够促进植物的光合作用<sup>[21]</sup>, 此时油葵外观表现为植株根茎变粗, 叶片大而绿。在植物生长的过程中, 随着外源 Ti 添加量的增加, 油葵的外观表现为: 地上部分叶片发黄, 植株整体变细, 根系有发黑现象, 这是由于 Cd 在根部主要集中在质体外, 尤其是细胞壁中, 细胞壁中的负电荷使金属离子在细胞膜外富集起来, 从而增加了跨膜梯度, 可推动金属离子进入细胞, 使 Cd 富集在油葵的根系中<sup>[22]</sup>。Cd 也会通过抑制植物的光合作用、呼吸作用及其对水分的吸收, 而使植物减产, 生物量降低<sup>[23]</sup>, 同时高添加量的 Ti 对植物生长也产生了一定的抑制作用<sup>[10]</sup>。

### 2.3 Ti 与 Cd 复合作用对油葵 Cd 吸收、富集、转运及耐受性的影响

**2.3.1 Ti 对油葵中 Cd 吸收及转运作用的影响** 植物体内元素含量能够直观地反映吸收元素的能力及强度。同时为了表明油葵吸收转运 Cd 的能力, 本研究引进转运系数公式 ( $TF_{r-s} = C_{地下部}/C_{地上部}$ ), 其中  $C_{地下部}$ 、 $C_{地上部}$  分别表示地上部 Cd 含量、地下部 Cd 含量,  $TF_{r-s}$  用来表征油葵根部向地上部转运 Cd 的能力, 可以说明转运系数越大, 植物对重金属的转运能力越强<sup>[24]</sup>。由图 3 可知, 油葵地下部分 Cd 含量均大于地上部分。单施 Cd 时, 随着外源 Cd 添加量的增加, 油葵地上及地下部分 Cd 含量也呈现出显著递增的趋势 ( $P < 0.05$ )。不同添加量 Cd 单施处理油葵中 Cd 含量较空白对照分别增

加 19.1%、50.6%、99.7%、108.0%。由图 4 可知, Ti 与 Cd 复合处理时, 油葵地上部 Cd 添加量随 Cd 添加量的增加整体呈先增后减再增的趋势, 当 Cd、Ti 添加量为 10、1 000 mg/kg 时, 地上部 Cd 含量达到最小值 4.69 mg/kg, 较同等剂量 Cd 处理 (10 mg/kg) 下降 15.7%。然而, 高 Cd 高 Ti (30、3 000 mg/kg) 处理时, Ti 的加入却促进了油葵地上部对 Cd 的吸收, 此时地上部 Cd 含量达到最大值 8.26 mg/kg, 是空白对照的 1.29 倍, 较同等添加量 Cd 单施处理 (30 mg/kg) 增加 9.1%。与油葵地上部不同, 当 Ti 与 Cd 复合处理的 Ti 添加量  $< 1\ 000$  mg/kg 时, 会对油葵根部积累 Cd 产生一定的促进作用; 当外源 Ti 添加量超过这个范围时, Ti 的促进作用受到抑制, 说明存在一定的拮抗作用, 表现为油葵根部 Cd 含量随外源 Cd、Ti 添加量的增加呈先增后降的趋势, 并在 Cd、Ti 添加量为 10、1 000 mg/kg 时达到最大值 16.67 mg/kg, 是对照组的 2.57 倍, 在高 Cd 高 Ti (30、3 000 mg/kg) 处理时, 达到最小值 1.76 mg/kg, 较对照降低 72.8%。

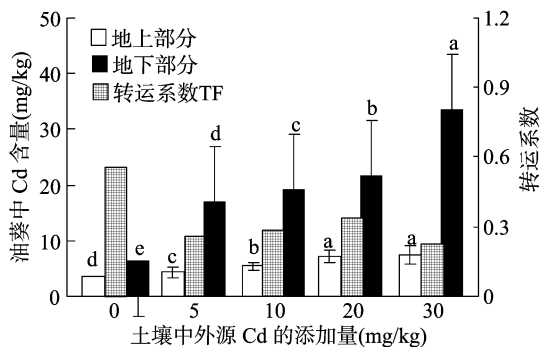


图3 Cd 单施对油葵地上部和地下部 Cd 吸收及转运的影响

单施 Cd 会抑制 Cd 从油葵根部向地上部的转运, 且 Cd 在油葵中的转运系数均小于无外源添加时, 并随外源 Cd 添加量的增加整体呈先降低的趋势。这说明施 Cd 抑制油葵地下部向地上部的转运, 且随 Cd 添加量的增加, 抑制作用越强, 这也说明 Cd 在土壤及油葵中有较强的移动性。而 Ti 与 Cd 复合处理时, 油葵中 Cd 的转运系数随 Cd 添加量的增加呈先略降后急剧增的趋势, 并于高 Cd 高 Ti (30、3 000 mg/kg) 处理时达到最大值 4.69, 是空白对照的 8.42 倍 (图 4)。说明土壤中外源 Ti 的加入, 在一定范围内能够显著提高油葵中 Cd 由地下部向地上部转运的能力。

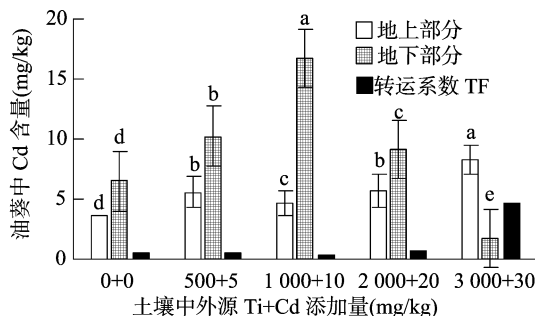


图4 Ti 与 Cd 复合作用对油葵地上部和地下部 Cd 吸收及转运的影响

**2.3.2 Ti 与 Cd 复合作用下油葵对土壤中 Cd 的富集作用** 为了研究油葵不同部位对土壤中 Cd 的富集作用, 本研究引进地上部富集系数公式 ( $BCF_{Cd-shoot} = C_{地上部}/C_{土壤}$ ) 和地下

部镉富集系数公式( $BCF_{Cd-root} = C_{地下部}/C_{土壤}$ )<sup>[24]</sup>,表征油葵不同部位富集镉的能力,式中, $C_{地上部}$ 、 $C_{地下部}$ 、 $C_{土壤}$ 分别指地上部镉含量、地下部镉含量与土壤中镉含量。由图 5 可以看出,单施 Cd 对油葵 Cd 富集有一定的抑制作用。油葵地下部分(主要指根部)对 Cd 的富集作用整体要大于地上部分对 Cd 的富集作用。相同添加量 Cd 处理下,油葵地上部 Cd 富集系数单施 Cd 与 Ti、Cd 复合处理变化趋势相差不大,均随处理添加量的增加呈显著的先降低后缓慢增加的趋势,且均在 Cd 添加量为 10 mg/kg 时,达到最小值。单施 Cd 处理时,油葵地下部(主要指根部)Cd 富集量随外源 Cd 添加量的增加呈先急剧下降后缓慢增加再急剧下降的趋势,各处理组间差异显著( $P < 0.05$ ),在未添加外源 Cd 时,根部 Cd 富集系数最大,为 3.36;在高 Cd (30 mg/kg) 处理时,根部 Cd 富集系数最小,为 0.22,较对照组降低 93.5%。不同的是,Ti 与 Cd 复合处理时,油葵根部 Cd 富集系数则随 Ti 与 Cd 添加量的增加整体呈先降后增的趋势,且各处理间有显著差异( $P < 0.05$ )。当土壤中添加外源 Ti 的添加量超过 1 000 mg/kg 时,油葵根部 Cd 的富集系数呈显著增加的趋势,并在高 Cd 高 Ti (30、3 000 mg/kg) 处理时,达到最大值 4.12,较对照组显著增加 22.6%,此时油葵的外观表现为根部发黑、生长受到明显的抑制。

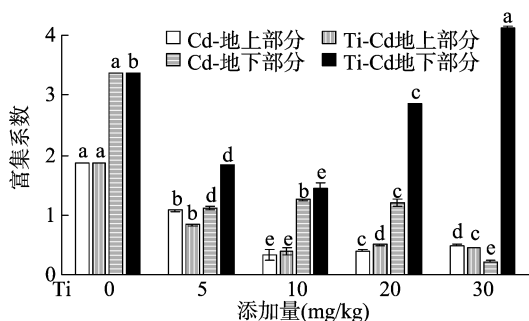


图5 Cd 单施及 Ti 与 Cd 复合作用对油葵地上部和地下部 Cd 富集作用的影响

2.3.3 Ti 与 Cd 复合作用对油葵耐受性的影响 耐性指数 (tolerance index, TI) 以地上部干质量或根干质量表示,其中  $TI_{shoot}$  指油葵地上部干质量与对照组的比值,  $TI_{root}$  指油葵地下部分干质量与对照组的比值<sup>[25]</sup>。TI 用来表征油葵对不同处理条件下的耐受性,当  $TI > 0.5$  时,表明这种植物对此重金属在环境中生长情况较好,有较强的耐受性;当  $TI < 0.5$  时,则反之,同时也说明这种植物在该种土壤条件下很难生存。由图 6 可以看出,添加外源 Ti 后,油葵地上部分和地下部分的耐性指数整体高于单施 Cd 时的耐性指数,且均大于 0.5,说明油葵耐 Cd 的性能较强,同时施 Cd 对油葵地下部分的毒害作用更大。单施 Cd 时,油葵  $TI_{shoot}$  随 Cd 添加量的增加呈先增后减的趋势;Ti 与 Cd 复合作用时,油葵  $TI_{shoot}$  呈先增后降趋势,并在高 Cd 高 Ti (30、3 000 mg/kg) 处理时达到最小值 0.61,较对照组下降 66.2%,此时油葵地上部耐 Cd 胁迫的能力较弱。油葵根部的 TI 在单施 Cd 及 Ti 与 Cd 复合处理时均表现出相同规律,即呈先增加后下降的趋势,其中 Ti 与 Cd 复合处理时各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ),当 Ti 添加量  $\leq 1\ 000$  mg/kg 时,油葵  $TI_{root}$  随 Ti 添加量的增加而增加并在 Ti 为 1 000 mg/kg 时达到最大值,此条件下 Ti 的施入提高了油葵在土壤中的抗逆性。高 Cd 高 Ti (30、3 000 mg/kg) 处理时

油葵耐 Cd 能力不如相同剂量时单施 Cd 处理,也就是说高 Cd 高 Ti (30、3 000 mg/kg) 处理时油葵整体的耐性下降。虽然适量 Ti 能够通过参与植物新陈代谢过程,提高植物对养分的吸收、利用和运转能力,促进植物生长,但一旦过量,则会对油葵产生一定的毒害作用,并影响其对 Cd 的耐受能力。

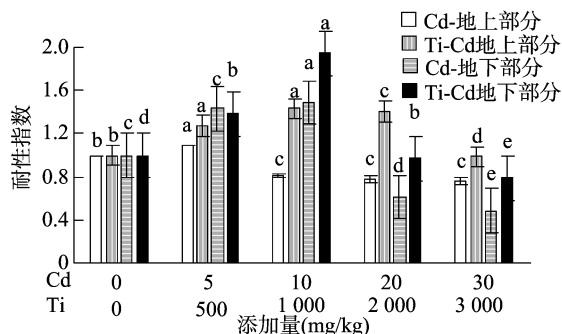


图6 Cd 单施及 Ti 与 Cd 复合作用对油葵地上部和地下部耐受性的影响

## 2.4 油葵种植前后土壤中 Cd 的有效态变化情况

由表 3 可知,镉元素在种植油葵前的土壤中的有效态含量与全量呈一定关系的正相关,镉元素在土壤中的含量呈递增趋势,且高 Cd (30 mg/kg) 处理时达到最大值 16.68 mg/kg。这一结果与孙月美等的研究结果<sup>[14]</sup>较为一致,而 Ti 与 Cd 复合作用时,有效态 Cd 含量随 Cd 添加量增加没有表现出一定的规律性。

种植油葵后的土壤中 Cd 有效态含量随 Cd 添加量的增加呈显著递增趋势 ( $P < 0.05$ ),与种植前呈现出相同规律,但整体小于种植前。此时,未添加外源 Cd 的对照土中有效态 Cd 含量较种植油葵前降低了 94.8%。低 (5 mg/kg) Cd 处理时,种植油葵后的土壤中有有效态 Cd 含量为最小值 1.32 mg/kg,较种植油葵后土壤降低 74.4%;高 Cd (30 mg/kg) 处理时,达到最大值 6.96 mg/kg,较种植前降低了 58.3%。另外,回归方程的相关系数表明,种植油葵后土壤中有有效态 Cd 含量与全量有较好的相关性,相关系数均在 0.90 以上。土壤中有有效态 Cd 含量随各处理添加量的增加呈递增关系,结合油葵对 Cd 的作用可知, Ti、Cd 复合处理的 Ti 添加量  $> 1\ 000$  mg/kg 时,油葵的耐性减小,富集能力减弱,剩余未吸收部分则残留在土壤中。

## 3 结论

施 Cd 对油葵生长的影响与 Cd 在油葵中存在的部位有关,低添加量 (10 mg/kg) Cd 时,促进油葵地上部及根部生长,高添加量 ( $\geq 10$  mg/kg) Cd 时却抑制其生长。

施入低添加量 ( $< 1\ 000$  mg/kg) Ti 能够减缓 Cd 对油葵的胁迫,表现为油葵地上部干物质的生物量随 Ti 添加量的增加呈递增趋势。高添加量 ( $\geq 2\ 000$  mg/kg) Ti 时,抑制油葵的生长,表现为油葵地上部及根部干物质的生物量随 Ti 剂量的增加呈降低趋势。

种植油葵后土壤中的 Cd 有效态含量远低于种植油葵前,说明油葵对 Cd 的富集效果较好。综合油葵的株高,干质量、对土壤中 Cd 富集作用等指标,本研究推荐污染严重地区种植油葵时,根据 Ti : Cd (质量比)  $\leq 100 : 1$  时, Ti 添加量  $\leq 1\ 000$  mg/kg 作为修复 Cd 污染土壤的最佳添加量。

表3 油葵修复前后土壤中 Cd 的有效态变化

土壤状态	处理	Cd 的有效态含量 (mg/kg)	生物可利用系数	镉的全量与镉的 有效态含量的回归方程	相关系数
种植前土壤	CK	1.92 ± 0.54c	0.25	$y = 1.640x + 3.512$	0.881 *
	Cd - 5	5.15 ± 0.40bc	0.41		
	Cd - 10	14.10 ± 0.1abc	0.80		
	Cd - 20	14.21 ± 0.32ab	0.51		
	Cd - 30	16.68 ± 0.39a	0.44		
	Ti <sub>500</sub> Cd <sub>5</sub>	9.16 ± 0.15a	0.73	$y = 0.791x + 14.228$	0.269
	Ti <sub>1 000</sub> Cd <sub>10</sub>	13.24 ± 0.13a	0.75		
	Ti <sub>2 000</sub> Cd <sub>20</sub>	7.55 ± 0.60a	0.27		
	Ti <sub>3 000</sub> Cd <sub>30</sub>	8.10 ± 0.72a	0.22		
种植后土壤	CK	0.10 ± 1.03d	0.01	$y = 4.469x + 6.566$	0.993 **
	Cd - 5	1.32 ± 0.88c	0.10		
	Cd - 10	2.97 ± 0.77b	0.17		
	Cd - 20	4.35 ± 0.84ab	0.16		
	Cd - 30	6.96 ± 0.79a	0.19		
	Ti <sub>500</sub> Cd <sub>5</sub>	1.30 ± 0.89c	0.10	$y = 6.050x + 5.088$	0.968 **
	Ti <sub>1 000</sub> Cd <sub>10</sub>	2.54 ± 0.83b	0.14		
	Ti <sub>2 000</sub> Cd <sub>20</sub>	4.19 ± 0.85a	0.15		
	Ti <sub>3 000</sub> Cd <sub>30</sub>	4.69 ± 0.96a	0.12		

参考文献:

[1]冯子龙,卢 信,张 娜,等. 农艺强化措施用于植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(2):14-20.

[2]韩春梅,王林山,巩宗强,等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志,2005,24(12):1499-1502.

[3]王晓娟,王文斌,杨 龙,等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. 生态学报,2015,35(23):7921-7929.

[4]沈体忠,朱明祥,肖 杰. 天门市土壤-水稻系统重金属迁移积累特征及其健康风险评估[J]. 土壤通报,2014,45(1):221-226.

[5]范秀菊. 钛的氧化还原特性及其在植物生化过程中的作用[J]. 中国土壤与肥料,2012(5):1-4.

[6]郭观林,周启星. 土壤-植物系统复合污染研究进展[J]. 应用生态学报,2003,14(5):823-828.

[7]樊 霆,叶文玲,陈海燕,等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报,2013,22(10):1727-1736.

[8]周 坤,刘 俊,徐卫红,等. 外源锌对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学学报,2014,34(6):1592-1599.

[9]Chlopecka A, Adriano D C. Influence of zeolite, apatite and Fe - oxide on Cd and Pb uptake by crops[J]. The Science of the Total Environment,1997,207(2/3):195-206.

[10]杜 娟,许自成,李志刚,等. 植物钛素营养研究进展[J]. 江西农业学报,2010,22(1):42-44.

[11]张文通,陈 勇,陈 超,等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化材料在环境土壤修复中的应用研究进展[J]. 材料导报,2015,29(11):49-54.

[12]刘义新,孟丽华,齐 帅,等. 利用纳米二氧化钛原位固定土壤重金属的可行性探讨[C]// 2008 中国环境科学学会学术年会优秀论文集(中卷). 2008:1104-1108.

[13]邵庆辉,洪 伟. 纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化材料催化机理及其在环境污染防治中的应用研究[J]. 北方环境,2011,23(9):103-104.

[14]孙月美,宁国辉,刘树庆,等. 耐受性植物油葵和棉花对镉的富集特征研究[J]. 水土保持学报,2015,29(6):281-286.

[15]段晴枫,李晓萍,任丽娟,等. 新疆某石化企业污水库周边土壤对钴的吸附行为研究[J]. 安全与环境学报,2015,15(3):256-260.

[16]陈春强,邓 华,黄芳芳. 广西桂平锰矿区土壤重金属含量及形态分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2014,32(4):108-114.

[17]Wilsey B J, Polley H W. Aboveground productivity and root - shoot allocation differ between native and introduced grass species[J]. Oecologia,2006,150(2):300-309.

[18]杨婷婷,高 永,吴新宏,等. 小针茅草原植被地下与地上生物量季节动态及根冠比变化规律[J]. 干旱区研究,2013,30(1):109-114.

[19]王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2013,21(3):282-289.

[20]Xun F F, Xie B M, Liu S S, et al. Effect of plant growth - promoting bacteria ( PGPR ) and arbuscular mycorrhizal fungi ( AMF ) inoculation on oats in saline - alkali soil contaminated by petroleum to enhance phytoremediation [ J ]. Environmental Science and Pollution Research,2015,22(1):598-608.

[21]刘 铮. 土壤与植物中的钛[J]. 土壤学进展,1991,19(1):1-7.

[22]张玉秀,于 飞,张媛雅,等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. 中国生态农业学报,2008,16(5):1317-1321.

[23]薛 永,王苑嫫,姚泉洪,等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. 生态环境学报,2014,23(3):528-534.

[24]李庚飞. 4 种草类植物对矿区土壤重金属的富集特征[J]. 草业科学,2013,30(2):185-189.

[25]田胜尼,刘登义,彭少麟,等. 香根草和鹅观草对 Cu、Pb、Zn 及其复合重金属的耐性研究[J]. 生物学杂志,2004,21(3):15-19,26.